

Flujo de agua subterránea y transporte en medios geológicos fracturados: una revisión

Marcos Adrián Ortega-Guerrero

Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México,
Campus Juriquilla, Querétaro, 76230, México.

*maog@geociencias.unam.mx

RESUMEN

El flujo de agua subterránea y el transporte de solutos y contaminantes en medios geológicos fracturados juega un papel muy importante en diversos procesos tanto hidrogeológicos como geológicos. Las fracturas son discontinuidades que se presentan prácticamente en todo tipo de rocas, sedimentos consolidados y semi-consolidados, en las que circula el agua subterránea en diferentes escalas de espacio y de tiempo. En este artículo se hace una revisión de 20 años de investigación en el CGEO de diferentes ejemplos seleccionados en México, desde escalas locales hasta regionales, asociados con 1) los Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea, 2) la interacción hidrogeoquímica del agua subterránea con rocas fracturadas por las que circula, 3) instrumentación y análisis numérico acoplado de parámetros de flujo y mecánicos variables en el tiempo, durante la consolidación asociada al bombeo, 4) análisis de generación de fracturas con el desarrollo y aplicación de ecuaciones acopladas de flujo y geomecánicas, 5) formación de nuevos minerales, 6) sustento de los ecosistemas, 7) fracturamiento artificial de suelos para su conservación y favorecer la infiltración de agua de lluvia; y en el tema de transporte en los mecanismos de migración de solutos naturales: 8) utilizados como trazadores, 9) elementos tóxicos a la salud y al ambiente, 10) derrames de derivados de hidrocarburos en medios de baja permeabilidad y doble porosidad por fracturamiento y 11) calor. Los resultados muestran la importancia de la interacción fisicoquímica entre los medios geológicos fracturados y granulares a escalas tanto locales como regionales, donde intervienen tiempos de residencia del agua subterránea desde días hasta miles de años; lo que implica modificar los criterios de gestión de agua y permanencia de ecosistemas en el país. La complejidad de estos procesos requiere de diferentes metodologías para su evaluación, entre ellas la instrumentación y la calibración de modelos numéricos de 1D a 3D para el análisis, predicciones y el planteamiento de soluciones de restauración, sustentabilidad y gestión; también permiten ayudar a prevenir, controlar y mitigar los impactos negativos en la salud y el ambiente causados por la inducción de elementos geogénicos y por diversos tipos de contaminantes; los medios geológicos fracturados sustentan también numerosos ecosistemas terrestres y marinos; en el caso de suelos agrícolas dañados el fracturamiento artificial permite incrementar la infiltración del agua de lluvia y mejorar la productividad, en adaptación al cambio climático y reducir la extracción en los acuíferos, donde la capacidad segura se ha sobrepasado; desafortunadamente, la extracción excesiva en cuencas cerradas está causando el fracturamiento, tanto hidráulico como por asentamientos diferenciales de los acuitardos, lo que favorece la migración de agua de poro antigua, rica en elementos nocivos a la salud

humana y al ambiente, cuya función natural era su protección. Todo esto requiere diseñar mecanismos de transferencia del conocimiento científico a la sociedad en general y a tomadores de decisiones para plantear estrategias novedosas de restauración y sustentabilidad, bajo el nuevo paradigma de los Sistemas Gravitacionales de Flujo.

Palabras clave: agua subterránea; medios geológicos fracturados; contaminación de agua subterránea; Sistemas Gravitacionales de Flujo.

ABSTRACT

The groundwater flow and the transport of solutes and contaminants in fractured geologic media play a very important role in various hydrogeological and geological processes. Fractures are discontinuities that occur in practically all types of rocks, consolidated and semi-consolidated sediments, in which groundwater flows at different scales of space and time. This article reviews more than 20 years of research in the CGEO of different selected examples in Mexico, from local to regional scales, associated with 1) gravitational Groundwater Flow Systems, 2) hydrogeochemical interaction of groundwater with fractured rocks through which it circulates, 3) instrumentation and coupled numerical analysis of flow parameters and time-varying geomechanics, during consolidation associated with pumping, 4) analysis of fracture generation with the development and application of coupled flow and geomechanical equations, 5) formation of new minerals, 6) sustenance of ecosystems, 7) artificial fracturing of soils for their conservation and infiltration of rainwater improvement; and on the issue of transport of natural solutes, 8) used as tracers, 9) toxic elements to health and environment, 10) spills of hydrocarbon derivatives in low permeability and double porosity media due to fracturing and 11) heat. The results show the importance of the physical-chemical interaction between fractured and granular geological media at both local and regional scales, where groundwater residence times range from a few days to thousands of years; which implies modifying the criteria for water management and the permanence of ecosystems in the country. The complexity of these processes requires different methodologies for their evaluation, among them the instrumentation and calibration of numerical models from 1D to 3D for analysis, predictions and the proposal of restoration, sustainability and management solutions; they also help to prevent, control and mitigate the negative impacts on health and the environment caused by the induction of geogenic elements and by various types of pollutants; fractured geologic media also support numerous terrestrial and marine ecosystems; in the case of damaged agricultural soils, artificial fracturing allows increasing rainwater infiltration and improving productivity in

adaptation to climate change and reducing the extraction in aquifers where safe capacity has been exceeded; unfortunately, excessive extraction in closed basins is causing fracturing of the aquitards, both hydraulic and due to differential settlement, which favors the migration of pore water rich in elements harmful to human health and the environment, whose natural function was its protection. All this requires designing mechanisms for the transfer of scientific knowledge to society and decision makers to propose novel restoration and sustainability strategies, under the new paradigm of Gravitational Groundwater Flow Systems.

Key words: Groundwater flow; fractured geologic media; groundwater contamination; Gravitational Groundwater Flow Systems.

INTRODUCCIÓN

El flujo de agua subterránea y el transporte en medios fracturados son temas importantes en hidrogeología para diferentes fines como son: la interacción con medios granulares –comúnmente reconocidos como acuíferos–, el abastecimiento de agua para consumo humano, agricultura e industria; en la contaminación-restauración y disposición de residuos peligrosos; sostenibilidad de ecosistemas terrestres y marinos; también, en geotermia, petróleo, gas, y yacimientos minerales, entre otros (Tóth 2016).

Existen la aproximación continua o *continuum* y la discreta o *noncontinuum* en el análisis de flujo en medios fracturados dependiendo del objetivo y de la escala de la investigación. La aproximación del *continuum* considera que la masa de roca fracturada es hidráulicamente equivalente al medio granular y la Ley de Darcy

puede aplicarse considerando un tensor de conductividad hidráulica anisotrópico; mientras que en el *noncontinuum* se basa en la hidráulica de flujo en fracturas individuales (Freeze y Cherry, 1979; Domenico y Schwartz, 1998; Fitts, 2013). En la literatura científica internacional se han realizado algunas revisiones de hidrogeología de medios geológicos fracturados por Berkowitz, (2002), Neuman (2005) y Berre *et al.* (2019), entre otros.

Los medios geológicos fracturados representan más de la mitad de la superficie en el Planeta y dada su importancia se han desarrollado los fundamentos teóricos de flujo, principales tipos de rocas fracturadas, caracterización geológica de las fracturas y otro tipo de discontinuidades, así como aplicaciones regionales (Cook, 2003; Singhal y Gupta, 2010; Tóth, 2009, 2016; Koike *et al.*, 2015, entre otros muchos más); mientras que, en estudios de migración de compuestos derivados de hidrocarburos ligeros y solventes clorados, en sitios fracturados, se han desarrollado sistemas de instrumentación y modelos numéricos para la evaluación y restauración utilizando una representación de medio *noncontinuum* (Mackay y Cherry, 1989; Pankow y Cherry, 1996; Graf y Therrien, 2005, entre otros).

El propósito de este trabajo es compartir una revisión descriptiva-integrativa de los avances en el conocimiento del flujo y transporte en agua subterránea en medios geológicos fracturados, a lo largo de un poco más de 20 años de investigación en el Centro de Geociencias (CGEO) de la Universidad Nacional Autónoma de México Campus Juriquilla, de varios ejemplos seleccionados en México. La Figura 1a muestra el modelo conceptual de la revisión, que se divide en dos apartados, uno de flujo de agua subterránea y otro de transporte de solutos, contaminantes y calor; la Figura 1b muestra la ubicación de los ejemplos que se describen. En el apartado de flujo se presentan

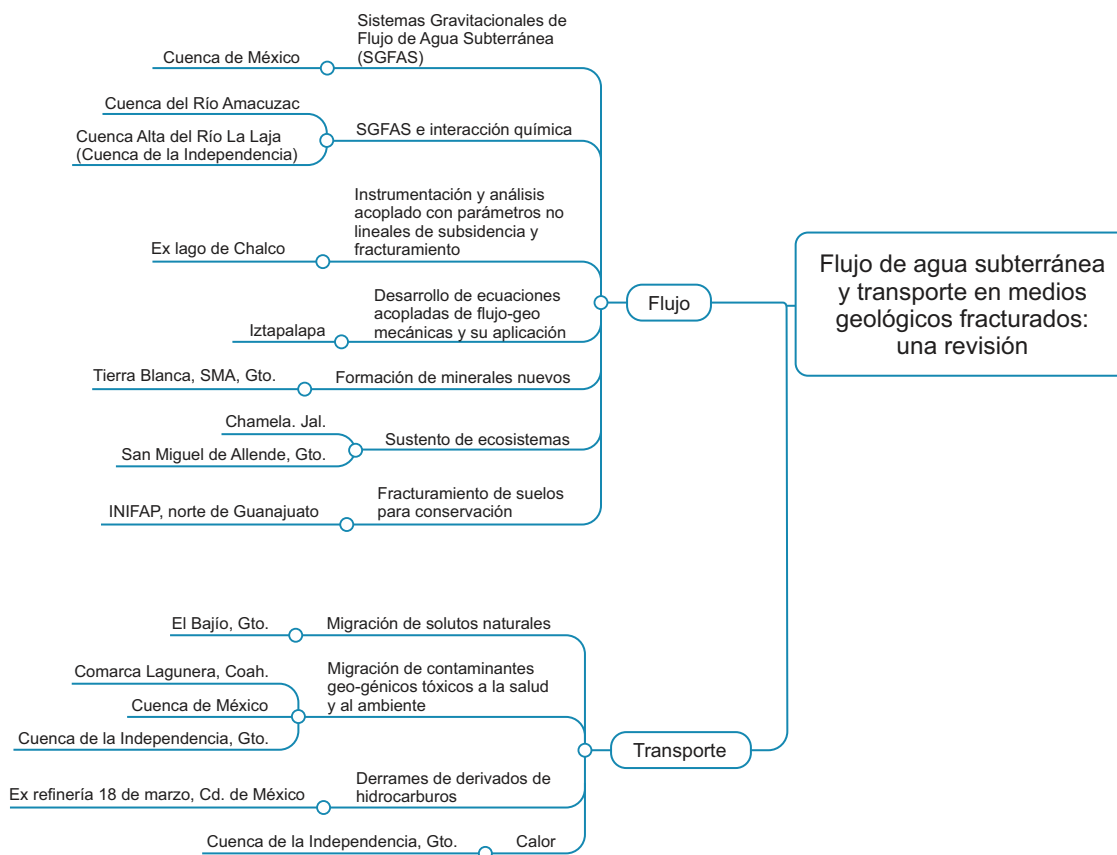


Figura 1. a) Modelo conceptual de la revisión de flujo de agua subterránea y transporte en medios geológicos fracturados. Se presentan nueve casos de flujo de agua subterránea y seis de transporte (*continúa*).

siete temas, con un ejemplo cada uno a excepción de los Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea (SGFAS) e interacción hidrogeoquímica con dos ejemplos; mientras que, en el apartado de transporte, son cuatro temas con un ejemplo cada uno a excepción del de migración de elementos tóxicos inducidos por bombeo, con tres. Los detalles de cada ejemplo pueden consultarse en las fuentes originales.

FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Los Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea

Los Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea (SGFAS) integran a todos los componentes del ciclo hidrológico en un solo modelo científico con el objetivo de entender el flujo del agua subterránea en su conexión con el agua superficial, el clima, el relieve, el suelo, la vegetación, los ecosistemas y el medio geológico donde se mueve y almacena –controlados por el potencial hidráulico, los patrones de flujo (locales, intermedios y regionales)–, la evolución química, la interacción dinámica entre todos ellos y la actividad humana que modifica estos sistemas (Freeze y Cherry, 1979; Tóth, 2009, 2016; Ortega-Guerrero, 2021).

Los SGFAS, desde la década de 1960 a la fecha, tienen una enorme capacidad explicativa en su metodología integradora del ciclo del agua, misma que se utiliza y perfecciona por los científicos alrededor del mundo e incorporando al conocimiento de numerosos temas

hidrogeológicos y de otros campos del conocimiento, entre los que se encuentran la interpretación de la composición química del agua subterránea, génesis de suelos salinos y su mejora, conceptualización de la interacción agua superficial-agua subterránea en diferentes ambientes topográficos, recursos de agua subterránea, génesis y explotación de yacimientos minerales, migración de petróleo y su acumulación, mecánica de suelos y de rocas, transporte de calor y geotermia, apoyo en la datación de agua subterránea, investigación de karst, disposición de residuos peligrosos (nucleares en particular), ecología del subsuelo, hidrogeología satelital, entre los que destaca recientemente la gestión integral del agua en diversos países del mundo y la adaptación al cambio climático (Tóth, 2009; 2016).

La Cuenca de México

El primer ejemplo de la aplicación de los SGFAS se realizó en la Cuenca de México en la década de 1980 y una revisión en 2004 (Ortega y Farvolden, 1989; Ortega-Guerrero, 2004) y desde entonces ha apoyado diversas investigaciones relacionadas con la influencia hidrogeológica de las rocas volcánicas fracturadas de los macizos montañosos de las Sierras Nevada, Las Cruces y Chichinautzin con los acuíferos que abastecen de agua subterránea a la ZMCM y el acuitardo lacustre; sobre el cual se encuentra construida gran parte de la Ciudad de México, sujeta a subsidencia y agrietamientos del terreno (Figura 2a).

La Ciudad de México está situada principalmente sobre depósitos lacustres que sobreyacen a acuíferos altamente productivos de origen



Figura 1 (cont). b) Ubicación de las cuencas donde se localizan los diferentes ejemplos que son considerados en la revisión de flujo de agua subterránea y transporte en medios geológicos fracturados. 1) Cuenca de México, 2) Cuenca Río Amacuzac, 3) Cuenca de la Independencia (Cuenca Alta del Río La Laja) y Región Bajío SW, 4) Comarca Lagunera en la Cuenca Nazas-Aguanaval y 5) Cuenca del Arroyo Chamela. Las figuras de las cuencas de estudio no están a la misma escala.

volcánico y sedimentario. La Cuenca de México está delimitada por montañas de origen volcánico, que se extienden hacia su interior y a profundidad (Figura 2a). Las condiciones de flujo natural asociadas con las rocas fracturadas de las sierras –utilizando una representación *continuum* del medio– y su relación con los acuíferos principales se estudiaron utilizando un modelo bidimensional en sección, por elementos finitos, en estado estacionario en condiciones hidrológicas existentes antes de la intensa extracción de agua subterránea (Ortega y Farvolden, 1989).

La Figura 2b, muestra los resultados del análisis numérico en dos de las secciones para las Sierras de Las Cruces (A-B) y Nevada (B-C) hacia el interior de la cuenca donde se ubicaron las zonas principales con evidencias de descarga. Las líneas de flujo y equipotenciales son resultado del análisis de factores tales como las conductividades hidráulicas de las diferentes rocas existentes en el subsuelo, tasas de infiltración regional, observaciones en campo de diferentes manifestaciones físicas, químicas y biológicas asociadas a descarga de agua subterránea, la ubicación de las divisorias de agua subterránea asociadas y el nivel freático en las montañas. Los patrones de flujo obtenidos por la modelación son consistentes con los registros hidrológicos históricos, las características piezométricas y las características superficiales observadas del agua subterránea en la Cuenca de México.

De los resultados del modelo, las rocas volcánicas fracturadas permiten la recarga de agua subterránea en las montañas del 30–50 % de la precipitación promedio. Tasas más altas y bajas dan como resultado un régimen de flujo que no es compatible con las observaciones de campo. En general, la ubicación de las divisorias en las montañas se desplaza hacia las zonas lacustres, lo que influye en la distribución del agua subterránea. El nivel freático en algunos lugares se encuentra

a varios cientos de metros por debajo de la superficie del terreno, de acuerdo con las observaciones de campo de una zona no saturada muy amplia. Antes de que comenzara la explotación importante del agua subterránea hace unos 150 años, el 50–70 % de la descarga se concentraba en las márgenes lacustres donde existían numerosos manantiales –en especial en la Época Prehispánica–, mientras que entre el 30–50 % de la descarga total en el interior de la cuenca era por flujo ascendente a través de los depósitos lacustres, echo que se analiza y discute ampliamente en secciones posteriores a partir de instrumentación detallada en estos sedimentos y su comportamiento transitorio al bombeo en el acuífero; donde la presencia de solutos naturales en el acuitardo y de contaminantes en su superficie representa un riesgo importante al agua subterránea de la que depende el abastecimiento a la ZMCD. La presencia de materia orgánica en los sedimentos que constituyen el acuitardo lacustre y su fracción arcillosa –56 % en promedio, dominados por arcilla alófana y 30 % montmorillonita– proporcionan una gran capacidad de absorción de contaminantes orgánicos y metales (Warren y Rudolph, 1997; Leal-Bautista, 1997); sin embargo, el fracturamiento del acuitardo –que se discute en secciones posteriores–, reduciría de manera importante su capacidad de retención.

El tiempo de residencia del agua subterránea calculado en el análisis numérico, sin considerar el tiempo en la zona no saturada, éste es de 4000–6000 años –consistentes con estimaciones de la edad en muestras de agua subterránea entre 6000 y 14000 años (Edmunds *et al.*, 2002; Morales-Casique *et al.*, 2014)– hacia la parte central de la cuenca; de 1000 años hacia los límites lacustres, y de 5 a 200 años de los flujos locales cerca de los límites lacustres donde existían numerosos e importantes manantiales en el pasado. El análisis numérico demuestra claramente la importancia de las rocas volcánicas fracturadas en el control de la recarga, flujo y descarga del agua subterránea.

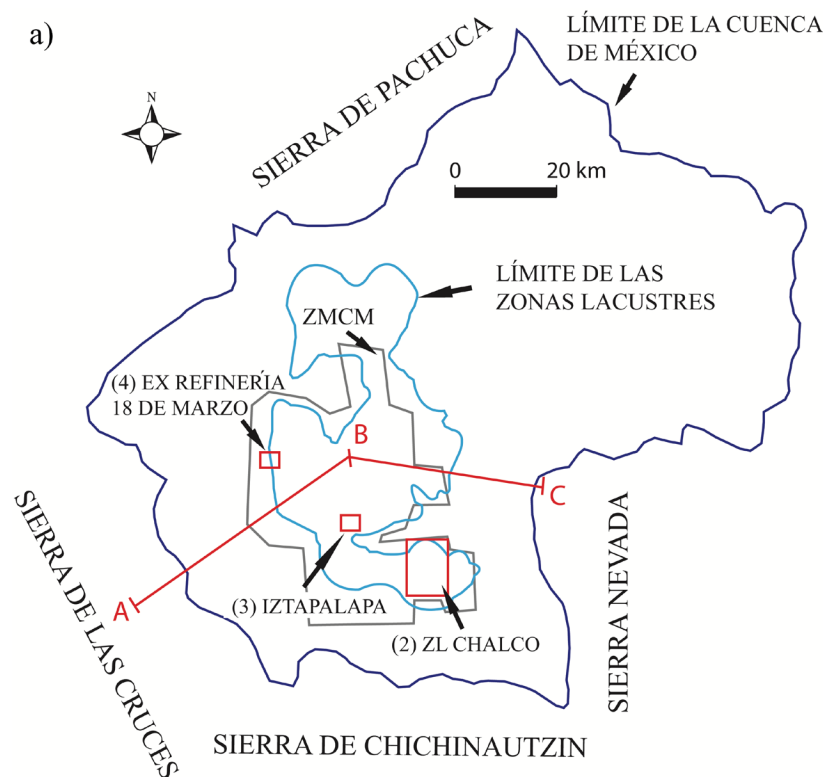


Figura 2. a) Ubicación de las zonas lacustres y de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) en el interior de la Cuenca de México. Se muestran, además, la ubicación de los diferentes ejemplos de flujo y transporte en medios geológicos fracturados que se describen en este trabajo como son: (1) las secciones hidrogeológicas (líneas rojas) del análisis de los SGFAS (Ortega y Farvolden, 1989), (2) Zona lacustre del antiguo Lago de Chalco (Ortega-Guerrero *et al.*, 1999; Ortiz-Zamora y Ortega-Guerrero, 2007, 2010), (3) Zona de Iztapalapa (Aguilar *et al.*, 2006) y (4) Ex Refinería 18 de marzo (Delgado, 2017) (*continúa*).

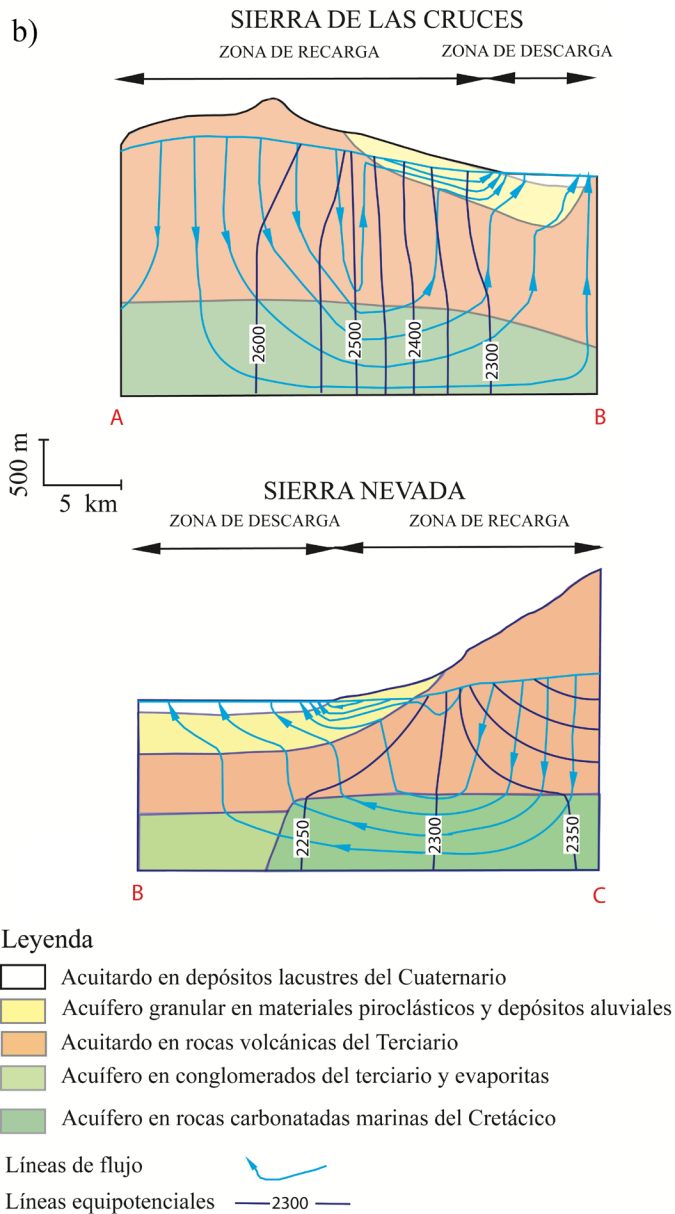


Figura 2. b) Líneas de flujo de agua subterránea y líneas equipotenciales del análisis numérico, donde las rocas volcánicas fracturadas del Terciario muestran su importancia tanto en la recarga, como en la conexión con los acuíferos granular regional y carbonatado, y con el acuitardo lacustre. (Modificado de Ortega y Farvolden, 1989).

Los SGFAS e interacción hidrogeoquímica con rocas por las que circula

El agua subterránea, al circular por las fracturas de las rocas y a través de los poros en los medios granulares, interactúa con los minerales que las conforman a través de reacciones químicas que incorporan diferentes iones en solución. La definición de los SGFAS también se apoya en aspectos geoquímicos del agua y las rocas (Morales-Casique *et al.*, 2016; Ortega-Guerrero, 2009, 2022). Son ejemplos de particular importancia, en este tema, la Cuenca del Río Amacuzac en el estado de Morelos y de la Cuenca de la Independencia (Cuenca Alta del Río La Laja) en el estado de Guanajuato. Ambos casos contrastan con las características de los SGFAS y en la intensidad de la extracción del agua subterránea.

La Cuenca del Río Amacuzac

En la Cuenca del Río Amacuzac (CRA), las investigaciones iniciaron con un convenio de colaboración con la Comisión de Inversiones del Estado de Morelos en 1996 para limitar la explotación del agua subterránea a través de pozos y orientar la ubicación de sitios de disposición de residuos sólidos. De los resultados, se identificaron dos proyectos de tesis de maestría que fueron posteriormente desarrollados y publicados en Morales-Casique *et al.* (2016).

La CRA se ubica al sur de la Cuenca de México y de la Cuenca del Río Lerma (Figuras 1b y 3a). El flujo de agua subterránea y su evolución química en la cuenca fueron estudiados utilizando modelos de flujo transversal de elementos finitos y geoquímicos de equilibrio termodinámico, respaldados por un análisis estadístico multivariado. El modelo produce un sistema tradicional gravitacional de flujo de agua subterránea, que muestra las características principales del sistema de flujo a través de las rocas fracturadas y se retroalimenta con los resultados de la composición química del agua subterránea (Figura 3b) (Morales-Casique *et al.*, 2016).

El flujo se lleva a cabo a través de cinco unidades hidrogeológicas principales, cuatro de ellas corresponden a medios geológicos fracturados de origen volcánico y sedimentario. La recarga de agua subterránea en las rocas fracturadas de las zonas montañosas se calculó entre el 35 y el 50 % de la distribución de la precipitación media. El rango de conductividades hidráulicas de las seis unidades hidrogeológicas utilizadas en el modelo se obtuvo de las mejores fuentes disponibles y de las observaciones de campo de las rocas y las características de escorrentía de los valores citados en la literatura y ajustados durante el modelado (Morales-Casique *et al.*, 2016).

Del flujo total que circula hacia la cuenca del río Amacuzac, alrededor del 73 % de la descarga se presenta al sur de la ciudad de Cuernavaca, en el tercio superior de la cuenca, donde existen numerosos manantiales; el 6 % del agua se produce en la mitad de la cuenca, por la presencia del acuitardo HU-2; y el 21 % restante de las descargas en el Valle de Zacatepec-Jojutla (Morales *et al.*, 2016).

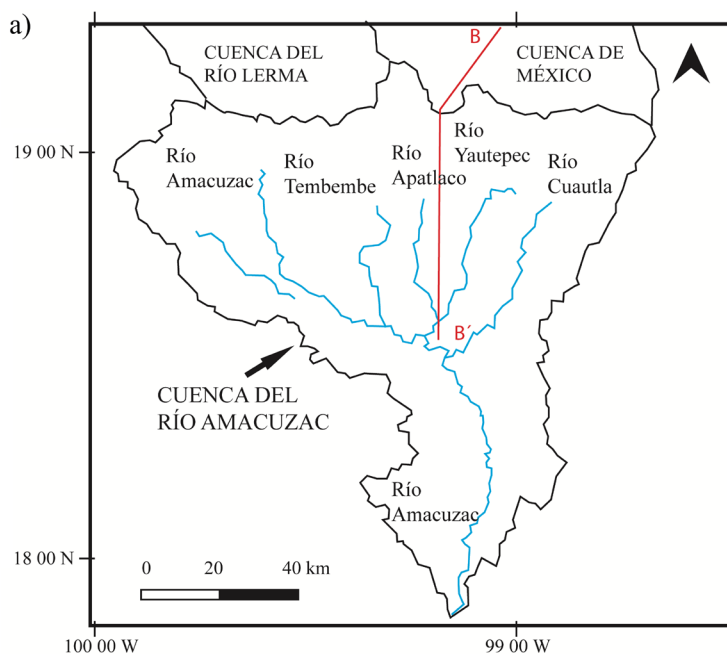
Los tiempos de residencia para los sistemas de flujo local, en el acuífero vulcano-sedimentario (HU-4) y rocas volcánicas Cuaternarias (HU-5), oscilan entre 10 y 500 años. Las líneas de flujo más profundas en las rocas carbonatadas del Cretácico (HU-1) y que descargan en la parte media de los valles tienen tiempos de residencia que oscilan entre 600 y 3000 años; mientras que los sistemas de flujo regional tienen tiempos de residencia que van de 4000 a 10000 años (Morales-Casique *et al.*, 2016).

Adicionalmente los autores muestran que las reacciones predominantes del agua subterránea en la cuenca del río Amacuzac están influenciadas por el orden en que el flujo de agua subterránea encuentra las diversas rocas ígneas y sedimentarias y las condiciones predominantes de presión de CO₂.

La Cuenca de la Independencia (Cuenca Alta del Río La Laja)

Las investigaciones en la Cuenca Alta del Río La Laja iniciaron con cinco convenios de colaboración con los Consejos Regionales –Norte y Noreste– para el Desarrollo del Estado de Guanajuato entre 1998 y 2002 (Figuras 1b y 4a). Desde entonces, los estudios en esta cuenca se presentan como el nuevo paradigma de los SGFAS en México y que por la región geográfica se le denominó Cuenca de la Independencia para diferenciarla de los límites administrativos de la Comisión Nacional del Agua (Ortega-Guerrero *et al.*, 2002; Ortega-Guerrero, 2009; 2011a; 2022).

La Cuenca de la Independencia (CI) con una extensión de 7000 km², se ubica en las inmediaciones de tres provincias geológicas: la Sierra Madre Occidental, la Faja Neovolcánica Transmexicana y la Placa Norteamericana. Las unidades litológicas que afloran en la CI la



Figuras 3. a) Ubicación de la cuenca del Río Amacuzac y de la sección hidrogeológica esquemática, en línea roja. Modificado de Morales *et al.*, 2016, (continúa).

constituyen 1) un complejo basal, compuesto por rocas volcánicas sedimentarias del Cretácico Inferior relacionadas con el Terreno Guerrero, y una secuencia de arcos de islas, y 2) una cobertura cenozoica, formada por rocas volcánicas de composición predominantemente riolítica y sedimentos que datan del Eoceno al Mioceno temprano, asociadas a la evolución de la Sierra Madre Occidental (SMOc); y (2) rocas volcánicas intermedias a máficas y sedimentos que se remontan al Mioceno tardío al Plioceno tardío (Figura 4b) (Nieto-Samaniego *et al.*, 1996; Aranda-Gómez y McDowell, 1998).

Desde una perspectiva hidrogeológica, se consideran dos unidades principales, una fracturada y otra granular; ésta última constituye un acuífero sujeto a explotación intensiva, donde la capacidad segura del acuífero se sobrepasó en la década de los 1980's (Figuras 4b y 4c). El medio fracturado aflora principalmente en las montañas que delimitan la cuenca y en conjuntos volcánicos del Terciario y en menor proporción rocas fracturadas del Cretácico Superior, que se extienden hacia el interior de la cuenca formando un conjunto de fosas tectónicas centradas en el Río La Laja, donde el acuífero granular lo cubre con espesores promedio de 100 a 200 m y en cuatro áreas hasta de 300 a 400 m (Figuras 4b y 4c) (Ortega-Guerrero, 2009).

Los estudios consistieron en identificar a escala de cuenca hidrológica los tipos de acuífero, su continuidad, geometría (extensión superficial y profundidad), por medio de sondeos electromagnéticos por transitorio, el origen y edad del agua subterránea por métodos isotópicos tanto estables como radiactivos, zonas de recarga y descarga en el contexto de los SGFAS, calidad química para diversos usos y tipo de roca por la que circula el agua subterránea (interacción agua-roca). Se integró una base de datos históricos y recientes en un Sistema de Información Geográfica.

En la descripción de esta cuenca se presenta primero la interacción del agua subterránea con las rocas del subsuelo a través de su composición hidrogeoquímica (Ortega-Guerrero *et al.*, 2002; Ortega-Guerrero, 2009), y a continuación el análisis de las condiciones de los SGFAS en condiciones isotérmicas (Ortega-Guerrero, 2022).

Hidrogeoquímica

Se realizaron análisis químicos por 75 elementos en muestras de agua subterránea provenientes de 246 pozos, algunos que extraen agua

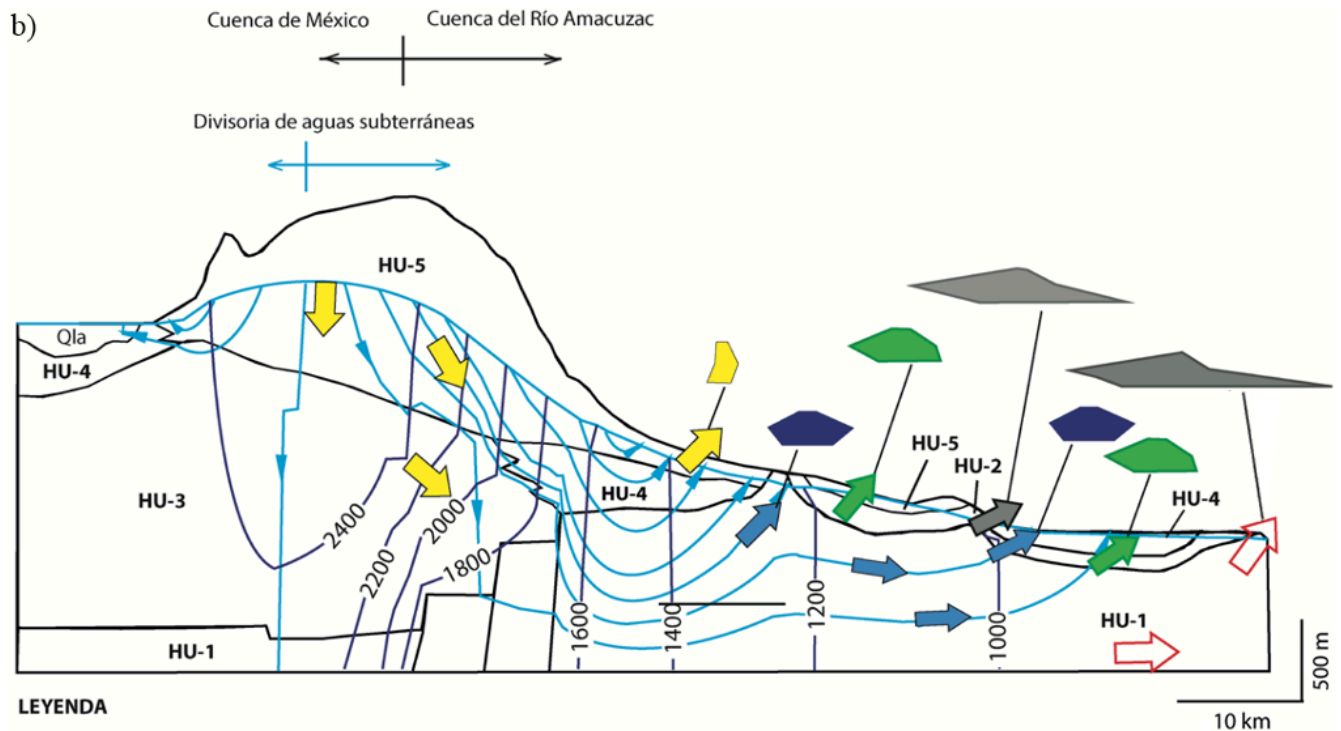
de un acuífero granular y otro fracturado subyacente, y otros pozos en ambos. La Figura 4d muestra el Diagrama de Piper con las familias hidrogeoquímicas dominantes que son de carácter bicarbonatado-sódicas y cálcicas; la primera se asocia a una mayor influencia del medio fracturado y la segunda al granular (Ortega-Guerrero *et al.*, 2002).

Entre los resultados resalta la presencia de altas concentraciones de arsénico (As) en el rango de 0.025–0.12 mg/L y fluoruro (F⁻) en 1.5–16 mg/L, ambos en la porción noreste de la cuenca, en un área aproximada de 500 km² (Figura 4e y 4f) (Ortega-Guerrero, 2009); causando diferentes enfermedades entre la población y al ambiente (de la Fuente *et al.* 2016; Farías *et al.*, 2021).

Treinta y tres muestras de esta zona coinciden con un importante cono de abatimiento piezométrico regional (Figura 4g). La modelación geoquímica realizada y la presencia de rocas volcánicas sugieren que el origen e hidrogeoquímica del As y del F⁻ se encuentran asociados a altas concentraciones de HCO₃⁻ y Na⁺, producto de la disolución de feldespato sódico y de otros minerales constituyentes de las riolitas e ignimbritas que forman el acuífero fracturado. Además, se asocian con largos periodos de residencia del agua subterránea hasta de 35000 años estimados por C¹³/C¹⁴. La disolución de minerales de arsénico es un proceso secundario de concentración de As, mientras que el enriquecimiento en F⁻ se encuentra asociado a la disolución de fluorita, a altas concentración de Li⁺, Cl⁻, Cs, Br⁻ y a agua termal. No se encontraron correlaciones de As y F⁻ con otros metaloides o con elementos formadores de óxidos, ni con otros elementos traza en solución (Ortega-Guerrero, 2009).

Los isótopos estables, en 125 muestras, indican un origen meteórico local del agua subterránea, alturas variables de recarga en las montañas y que durante ésta no ocurrieron procesos de evaporación, incluyendo aquella cuya edad representa miles de años de residencia. Tampoco existen evidencias de que la cuenca haya sido cerrada (Ortega-Guerrero, 2009).

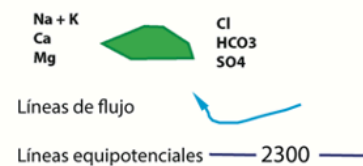
El autor propone un modelo conceptual que se desprende del análisis anterior y considera un ascenso vertical de agua termal, más antigua, rica en As, F⁻ y otros iones desde el acuífero fracturado, inducido por la intensa explotación del acuífero granular, es el proceso dominante de migración de estos compuestos, que se analizan en las secciones de transporte inducido por bombeo y de transporte de calor.



LEYENDA

- HU-5**, acuífero en rocas volcánicas del Cuaternario
- HU-4**, acuífero en rocas volcánico-sedimentarias del Terciario-Cuaternario
- HU-3**, acuitardo en rocas volcánicas del Terciario
- HU-2**, acuitardo en el Grupo Balsas y la Formación Mezcala
- HU-1**, acuífero en rocas carbonatadas del Cretácico

Diagrama de Stiff



- Flujo a través de rocas volcánicas de composición máfica e intermedia HU-4 y HU-5). Incrementos en la concentración de HCO₃, Mg y Ca. Baja concentración de iones disueltos y composición dominante bicarbonatada-cálcica-magnésica.
- STD de bajos a medios, agua de tipo bicarbonatado-cálcico. Flujo a través del acuífero carbonatado del Cretácico (HU-1).
- STD medios, agua tipo cálcica-bicarbonato-sulfatada. Flujo a través del acuífero carbonatado del Cretácico (HU-1) y después en el Grupo Balsas (HU-2).
- Flujo a través de rocas evaporíticas. Agua subterránea con altas concentraciones de iones disueltos y composición dominante de tiposulfatada-cálcica
- (a) Flujo a través de lentes superficiales de yeso (HU-2)
- (b) Flujo a través de anidrita profunda, miembro inferior de HU-1.

Figure 3 (cont.). b) Distribución de líneas de flujo y equipotenciales obtenidas del análisis numérico, consistentes con la interacción química del agua subterránea –se muestran las familias de las condiciones de agua con los Diagramas de Stiff y las flechas con diferentes colores el tipo de roca por la que circula– HU-1 a HU-5. (Modificado de Morales *et al.*, 2016).

Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea

Las condiciones naturales de flujo fueron estudiadas utilizando un modelo de flujo por elementos finitos en 3D, evaluando tanto condiciones isotérmicas como las dependientes de la temperatura (Ortega-Guerrero, 2022). En esta sección se muestran los resultados bajo condiciones isotérmicas y se dedica una sección especial al transporte de calor más adelante.

En la Figura 5a se muestran 1) las diferentes manifestaciones naturales de las condiciones del agua subterránea asociados a los sistemas de flujo en la cuenca, tales como zonas lacustres y humedales, manantiales, suelos salinos y vegetación freatófita, y la presencia de dos lagos importantes en la época prehispánica (Juagué-Nandé y el Curi-

Nitz). La fundación de las principales ciudades de la cuenca ocurrió en zonas con manantiales (San Felipe (SF), San Luis de la Paz (SLP), San Diego de la Unión (SDU), San Miguel de Allende (SMA)) y áreas con niveles freáticos someros y presencia de humedales en el pasado (San José Iturbide (SJI)-Doctor Mora (DM)). Cerca del río La Laja, entre las ciudades de SMA y Dolores Hidalgo (DH), se han descrito importantes fuentes termales, denominadas Xoté, Montecillo y Atotonilco (lugar de agua caliente). Todas estas ciudades se encuentran en la zona principal de descarga en el área central de la cuenca. Se han reportado numerosos manantiales a lo largo del tiempo en áreas montañosas, pero la mayoría han desaparecido. Las condiciones fundamentales del análisis y del proceso de modelado se describen en Ortega-Guerrero (2022).

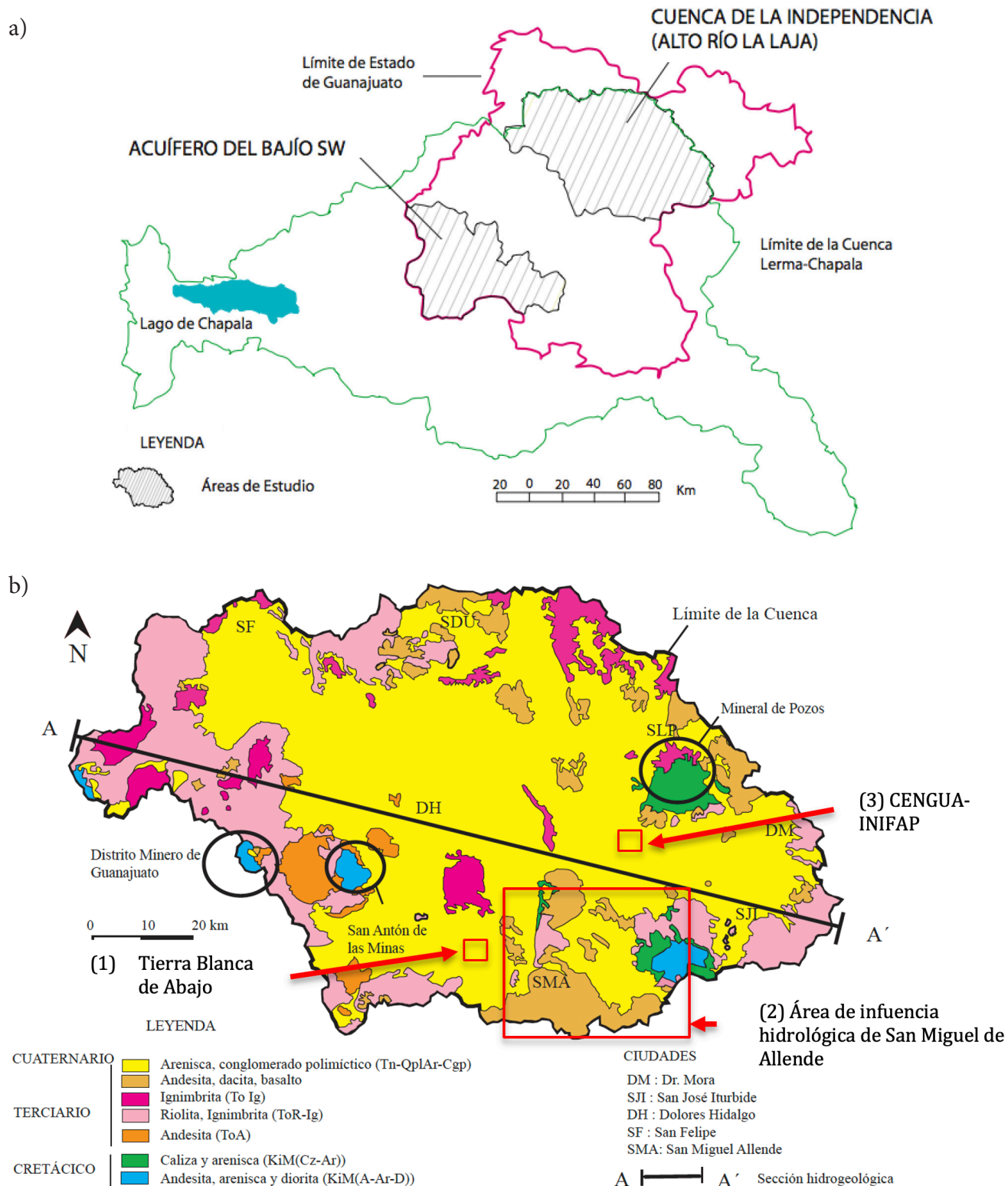


Figura 4. a) Ubicación de la Cuenca de la Independencia (Cuenca Alta del Río La Laja) y del Acuífero del Bajío Suroeste, en el Estado de Guanajuato; ambas se ubican en la Cuenca Lerma-Chapala (modificado de Ortega-Guerrero, 2011a). b) Tipos de litología que constituyen la Cuenca de la Independencia (Cuenca Alta del Río La Laja). Se encuentra delimitada por rocas ígneas y sedimentarias que se extienden hacia su interior, por debajo de un acuífero granular, que rellena un sistema de fosas tectónicas centradas en el Río La Laja. Se incluyen otras tres áreas de estudio que se tratan en el documento: (1) Tierra Blanca de Abajo donde formó un mineral cancerígeno (erionita), en las cercanías de San Miguel de Allende, (2) el área de influencia hidrológica de San Miguel de Allende, donde se describe el sustento de los ecosistemas con el flujo en medios fracturados, y (3) Campo Experimental del Norte de Guanajuato del INIFAP, donde una práctica de conservación es el fracturamiento del suelo. También se muestra la ubicación de las ciudades principales al interior de la CI, y los Distritos Mineros de Guanajuato y Mineral de Pozos. (Modificado de Ortega-Guerrero, 2009) (continúa).

c)

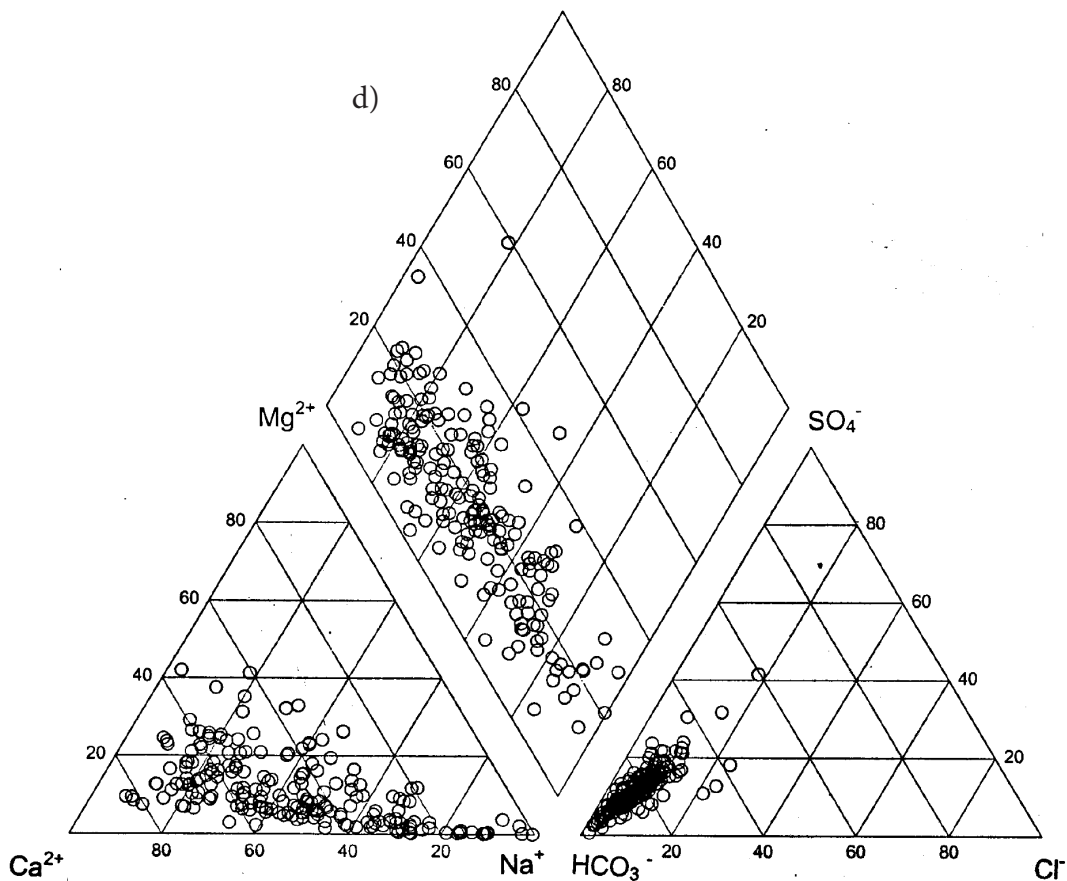
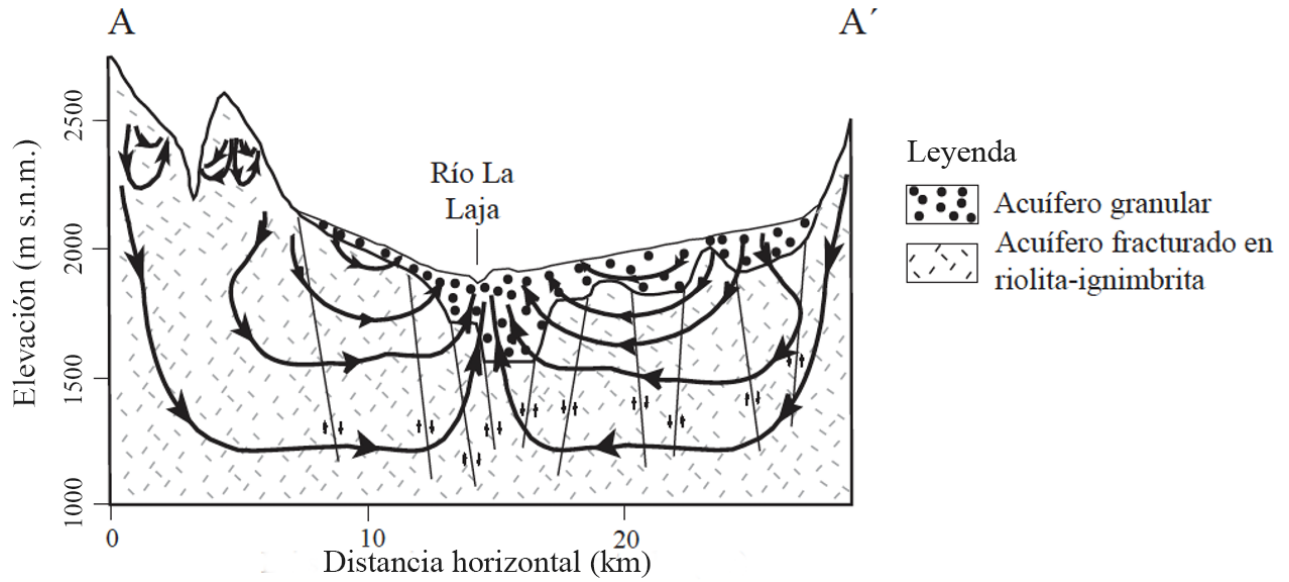


Figura 4 (cont.). c) Sección hidrogeológica mostrando la estructura del sistema escalonado de fosas tectónicas en el medio fracturado, centradas en el Río La Laja; el acuífero granular cubre a las rocas fracturadas. Se muestra de manera esquemática el desarrollo de diferentes sistemas de flujo destacando la interacción del medio fracturado con el granular. (Modificado de Ortega-Guerrero 2009). d) Diagrama de Piper con los contenidos de iones mayores en 246 muestras de agua subterránea de pozos en la Cuenca de La Independencia. (Tomado de Ortega-Guerrero *et al.*, 2002) (continúa).

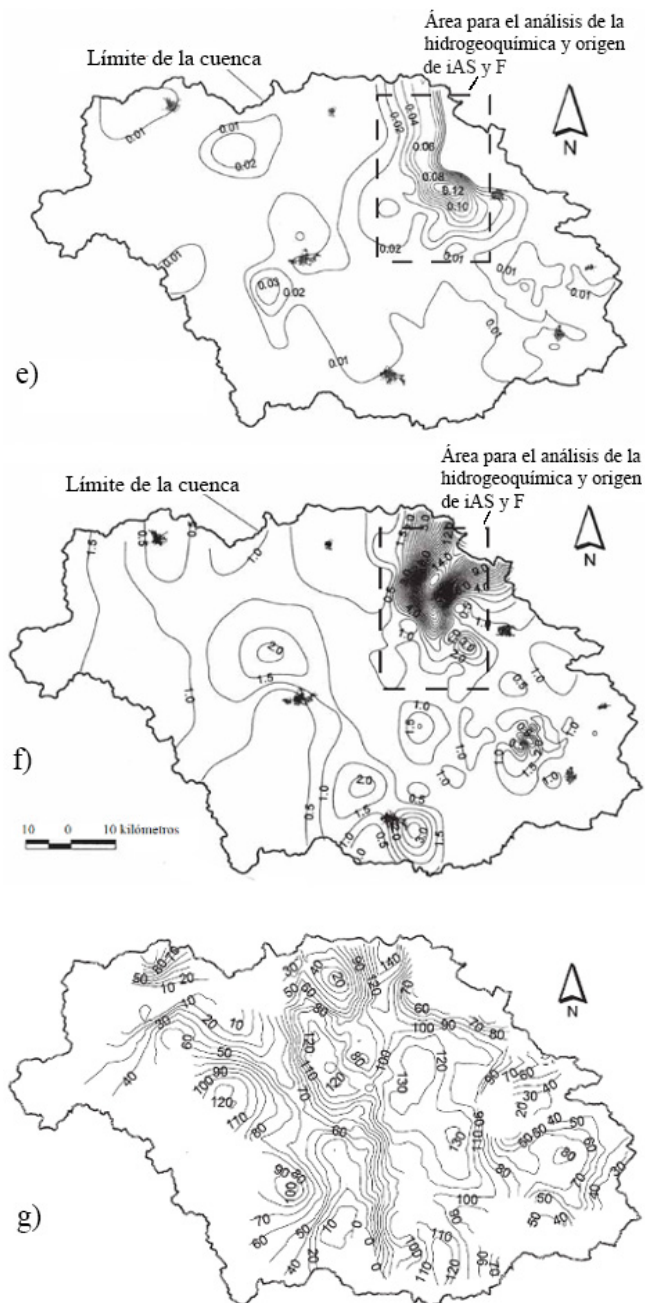


Figura 4 (cont). e) Distribución de la concentración de arsénico inorgánico (As) disuelto en el agua subterránea; f) concentración de fluoruro (F), y g) profundidad al nivel freático al interior de la CI en 1998. En general las mayores concentraciones de As y F se asocian con las zonas de mayor extracción de agua subterránea. (Modificado de Ortega-Guerrero, 2009).

Los resultados en planta (plano XY) muestran la dirección y las variaciones en el flujo de Darcy (Figura 5b). La distribución de las líneas equipotenciales del dominio en 3D ilustra la disminución progresiva de las líneas equipotenciales con la profundidad, definiendo claramente las zonas de recarga representadas por las rocas volcánicas fracturadas de las sierras que delimitan la cuenca, mientras que el valor de las líneas equipotenciales decrece progresivamente hacia la superficie, indicando la zona de descarga, principalmente en las inmediaciones del Río La Laja (Figura 5c). En la Figura 5d se observa el flujo de Darcy en la sección laja-E.

Instrumentación y análisis numérico acoplado de parámetros de flujo y mecánicos variables en el tiempo, durante la consolidación del acuitardo lacustre asociada al bombeo en el acuífero subyacente

Los acuitardos se describen como unidades de menor conductividad hidráulica, constituidos por fracciones de limos y arcillas en una secuencia estratigráfica; y que a diferencia de un acuífero no aportan cantidades importantes de agua para su explotación –en la industria de la perforación y abastecimiento– (Freeze y Cherry, 1979). Sin embargo, los acuitardos juegan un papel muy importante en 1) el estudio de los sistemas de flujo de agua subterránea como se mostró en una sección anterior, 2) en la protección de los acuíferos a la contaminación, 3) en un tema que cada vez cobra mayor importancia, que es el fracturamiento progresivo de estos depósitos ocasionados por la extracción excesiva de agua subterránea en acuíferos subyacentes y adyacentes y 4) en el caso de cuencas cerradas, la acumulación de elementos químicos por evaporación a lo largo de miles de años como se describe en las secciones de migración de solutos naturales y contaminantes inducidos por la extracción excesiva de agua subterránea por bombeo en los acuíferos subyacentes, como es el caso de la Cuenca de México y la Comarca Lagunera.

Se presentan dos ejemplos, uno de la respuesta transitoria del agua subterránea en el acuitardo asociada a la extracción de 14 pozos en la Planicie Lacustre de Chalco (Figura 2), el fracturamiento en los primeros metros de profundidad y el fracturamiento –falla mecánica asociada a los esfuerzos inducidos por el bombeo– a diferentes escalas. En la siguiente sección, se desarrollan las ecuaciones de flujo y mecánicas que generan este tipo de fracturamiento del acuitardo y sus consecuencias en el daño a la infraestructura urbana y la migración de contaminantes hacia el acuífero subyacente.

Planicie lacustre de Chalco

En el interior de la Cuenca de México, de carácter endorreico, se desarrollaron una serie de lagos con depósitos excepcionalmente porosos (60–90%) que cubren un acuífero granular, regional, altamente productivo. Históricamente, el hundimiento severo del terreno, debido a la consolidación de los sedimentos lacustres y el daño a la infraestructura hidráulica y riesgo de inundaciones, causado por la explotación del acuífero resultó en restricciones de bombeo en el centro de la Ciudad de México, transfiriendo el bombeo a otras planicies lacustres periféricas donde las comunidades satélites se están expandiendo rápidamente, entre ellas Valle de Chalco y Tláhuac. La periferia del ex Lago de Chalco es una de estas áreas lacustres donde el bombeo comenzó en la década de 1950 y aumentó considerablemente en la década de 1980 (Ortega *et al.*, 1993; Ortega-Guerrero *et al.*, 1999).

La extracción de agua en los acuíferos granular y fracturados volcánicos en la periferia de la planicie lacustre de Chalco (Figuras 6a y 6b), además de los procesos de secado y humedecimiento de los primeros metros de la secuencia lacustre, provocaron el micro fracturamiento del acuitardo. Existen varias evidencias de ello, basados en una extensa instrumentación del acuitardo con más de 200 piezómetros individuales en varios sitios al interior de la planicie de Chalco, en colaboración con el Dr. John Cherry de la Universidad de Waterloo, Canadá. Los resultados del estudio de los procesos de migración de solutos y contaminantes se detallan en varias tesis de licenciatura y posgrado: (1) en los perfiles de trazadores naturales (Ortega-Guerrero, 1994), (2) la conductividad hidráulica en los primeros 5 m se asocia a la presencia de microfracturas, que es hasta dos órdenes de magnitud mayor (Vargas y Ortega-Guerrero, 2004), (3) una rápida respuesta del nivel freático por sensores electrónicos de presión (Ramírez, 1995), (4) perfiles de isótopos radiactivos Tritio-Helio (Cervantes, 1996), (5) rápida respuesta de flujo y contaminantes no-orgánicos, debajo de canales de aguas residuales (Ortiz-Zamora, 1996), y contaminantes orgánicos

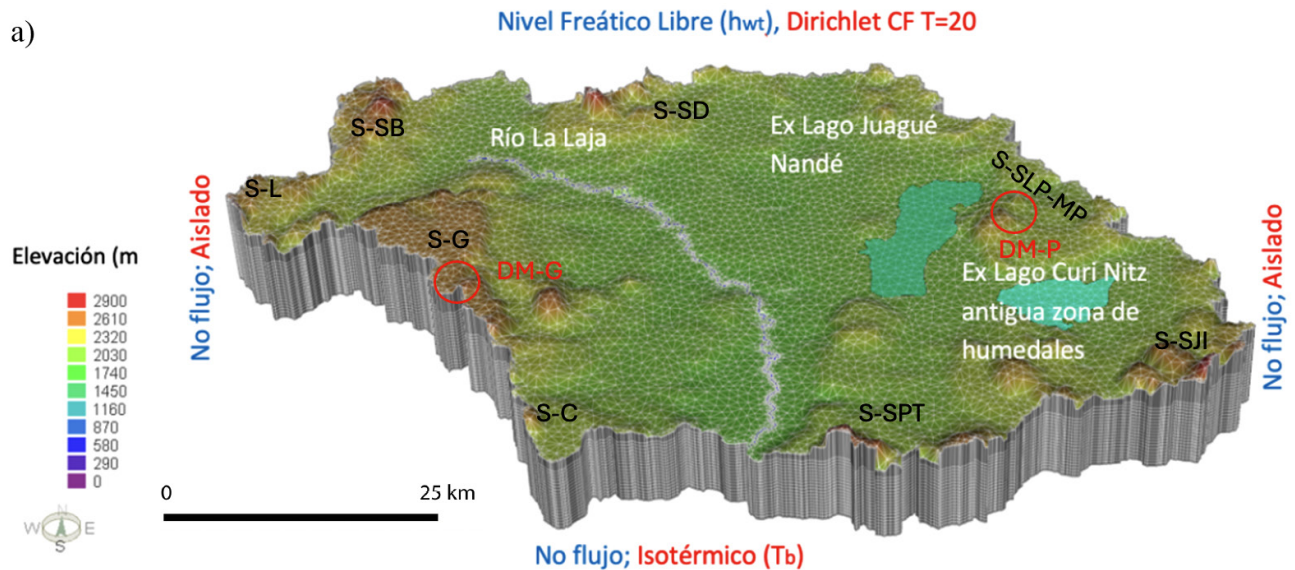


Figura 5. a) La discretización por elementos finitos, en 3D, de la Cuenca de la Independencia delimitada por las sierras principales de: Guanajuato (S-G), Santa Bárbara (S-SB), San Diego de la Unión (S-SD), San Luis de la Paz-Mineral de Pozos (S-SLP-MP), Dr. Mora, San José Iturbide (S-SJI), Picachos-Támbula (S-SPT), Las Codornices (S-C). El Río La Laja corre Noroeste a Sur; dos lagunas importantes existieron en la época prehispánica: Juagué Nandé y Curi-Nitz –actualmente Laguna Seca y el Salitre–. La zona principal con las manifestaciones de descarga de agua subterránea se ubica en el tercio inferior de la cuenca, en las proximidades del río. La exageración vertical de la elevación del terreno es 5:1. (Modificado de Ortega-Guerrero, 2022) (continúa).

(Leal-Bautista, 1997). La inspección directa en trincheras, en combinación con técnicas geoquímicas y geofísicas de resistividad mostró la presencia de fracturas de diferentes dimensiones (Zawadzky, 1997).

El análisis estadístico de la conductividad hidráulica y la estimación de la conductividad hidráulica efectiva en el acuitardo lacustre, en 201 mediciones de conductividad hidráulica mediante prueba de *slug* en el acuitardo arcilloso principal subyacente a la Ciudad de México, demostró que las Funciones de Densidad de Probabilidad (FPD) gamma y log-gamma poseen características estadísticas que las hacen ventajosas en comparación con las FPD log-normales más utilizadas (Loáiciga *et al.*, 2006).

La operación de catorce pozos adicionales al interior de la planicie lacustre para extraer agua del acuífero granular regional –Ramal Mixquic-Santa Catarina, en 1984– ha estado provocando fracturamiento adicional y más profundo, ambos fenómenos estudiados a través del desarrollo y aplicación de ecuaciones acopladas de flujo y geomecánicas, éstas últimas en la zona de Iztapalapa y su extensión a toda la zona lacustre de la Cuenca de México (Aguilar-Pérez *et al.*, 2006).

Los trabajos de Ortega-Guerrero *et al.* (1999) y de Ortiz-Zamora y Ortega-Guerrero (2007, 2010) muestran la evolución de los hundimientos diferenciales del terreno asociados al bombeo y el desarrollo de fracturas de diferentes dimensiones en la transición de coladas de basaltos y la formación de un nuevo lago en ausencia de ellos –denominado Nuevo Lago de Chalco– en zonas donde el hundimiento supera los 0.40 m/año (Figuras 6c y 6d).

La evolución de los hundimientos del terreno asociados a la respuesta transitoria del acuitardo al bombeo se ilustra en las Figuras 6e y 6f. En ambas figuras se observan los datos medidos desde principios de los 1980's y las predicciones numéricas utilizando un modelo con parámetros no lineales, alimentado con parámetros hidráulicos y mecánicos variables en el tiempo. En la parte superior del acuitardo en su zona de mayor espesor aún se observan condiciones de flujo ascendente vertical, indicador de las condiciones iniciales de descarga del flujo de agua subterránea en la Cuenca de México, consistente con el análisis de los SGFAS (Ortega y Farvolden, 1989).

Las predicciones de modelos matemáticos realizadas han sido muy precisas a la fecha. Los flujos de basalto restringen el desarrollo de fracturas de gran escala en la llanura lacustre. Aún se desconoce la profundidad a la que se extienden esas fracturas y su comportamiento hidráulico, pero con base a la precisión de las predicciones numéricas anteriores y la evolución del hundimiento del terreno durante un período de 15 años (1991–2020), se puede estimar que esas fracturas están aún sin influir en el régimen de flujo de agua subterránea en los sitios de monitoreo –NP2 y NP3–, donde se centró el análisis de modelado y el espesor del acuitardo es mayor de 100 m. Adicionalmente, donde el acuitardo es menor a 50 m de espesor, la integridad del acuitardo para proteger al acuífero de la migración de contaminantes, se ha perdido progresivamente por el desarrollo también progresivo de fracturas.

Análisis de generación de fracturas con el desarrollo y aplicación de ecuaciones acopladas de flujo y geomecánicas inducidas por el bombeo

Este proyecto inició como parte de un convenio de colaboración entre la Delegación Iztapalapa con el Instituto de Geología en 1996; en primera instancia con el fin de mapear la distribución de las fracturas y el daño a la infraestructura urbana. De ahí se derivó la necesidad de contar con un análisis cuantitativo que permitiera explicar la generación de fracturas asociadas a la extracción de agua subterránea.

Con el fin de evaluar la deformación vertical del terreno asociada a la extracción de agua subterránea en condiciones de acuífero libre y acuífero confinado –y las condiciones de formación de fracturas hidrodinámicas en este último– se llevó a cabo un análisis numérico acoplado de las ecuaciones de flujo de agua subterránea y geomecánicas, donde se obtuvo la solución analítica que permite determinar los esfuerzos y desplazamientos que se generarían por la extracción de agua subterránea, utilizando información histórica de los hundimientos y variaciones piezométricas en los acuíferos (Aguilar-Pérez *et al.*, 2006).

En la Figura 7a se muestra la ubicación del Peñón del Marqués –un cono volcánico del Pleistoceno– y sus alrededores donde se mapearon diferentes familias de fracturas, al NE de la Ciudad de México; donde

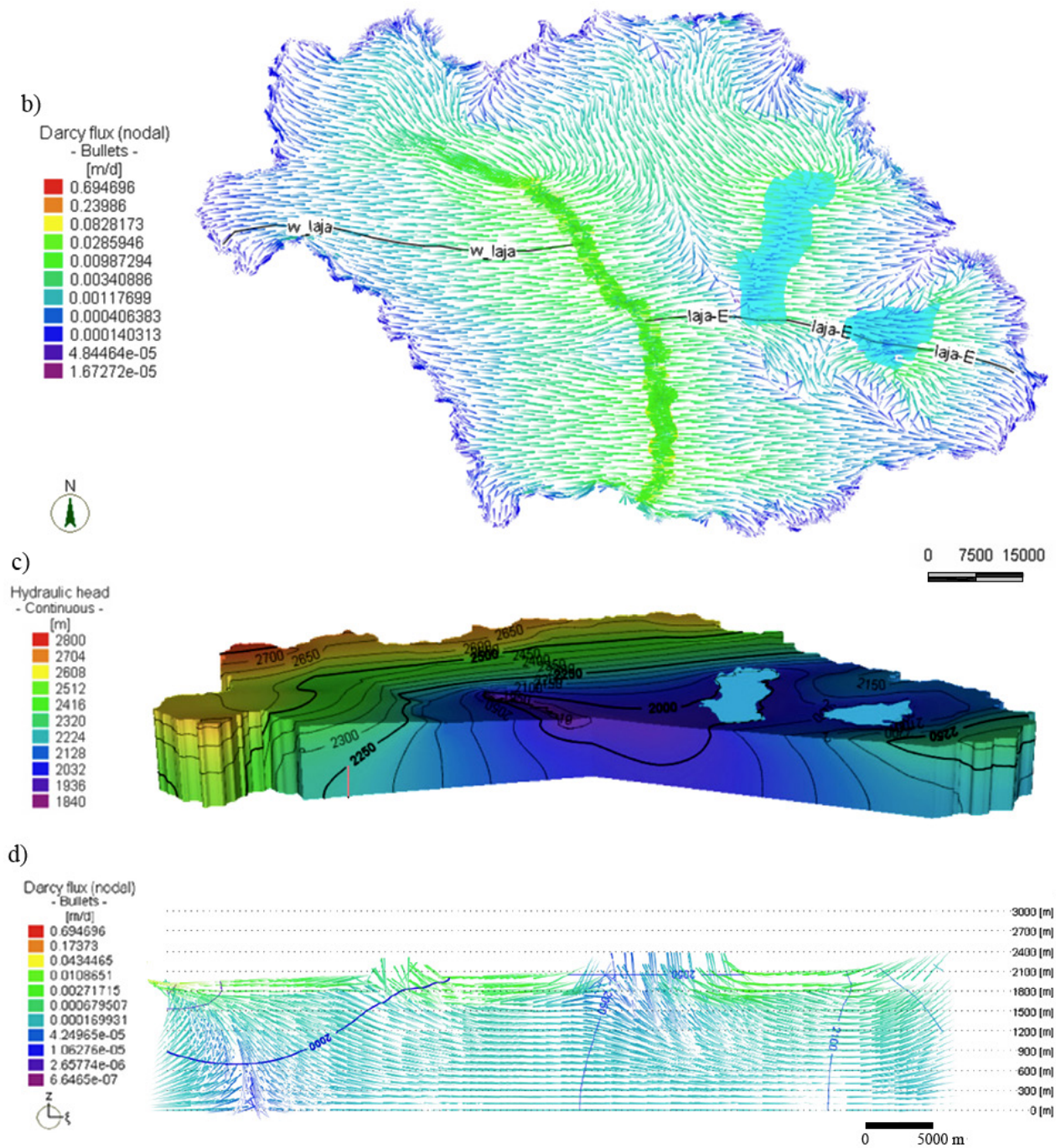


Figura 5 (cont.). b) Flujo de Darcy en planta, donde los valores mayores son hacia las proximidades del Río La Laja y las menores hacia las zonas montañosas; c) Distribución de cargas hidráulicas en 3D, y d) Flujo de Darcy en la Sección del Río La Laja a la Sierra de San José Iturbide (laja-E). (Modificado de Ortega-Guerrero, 2022) (continúa).

las diferentes fracturas empezaron a formarse aproximadamente 15 a 20 años después de iniciarse la operación del Sistema Peñón, constituido por nueve pozos que han causado una reducción de la carga hidráulica hasta de 35 metros en casi 40 años, medidos al año 2000, y dando lugar a una variación en la elevación del terreno superior a los seis metros para el acuífero confinado y de ocho metros para el no confinado (Figuras 7b y 7c) (Aguilar-Pérez *et al.*, 2006).

Los parámetros más sensibles a la deformación vertical fueron, en orden de importancia, el coeficiente de consolidación (C_v), la transmisividad (T) y el módulo de rigidez al corte (G), mientras que la

conductividad hidráulica del acuífero confinado (K) es el más sensible a los tiempos críticos de fracturamiento (Figuras 7b y 7c) (Aguilar-Pérez *et al.*, 2006).

La falla mecánica de los materiales del subsuelo para condiciones de confinamiento ocurrió cuando los caudales críticos de extracción en el acuífero se sobrepasaron desde el inicio de la operación del Sistema Peñón, desde la base del acuitardo hacia la superficie. Este proceso se aplica prácticamente a toda la zona lacustre donde el acuitardo sobreyace al acuífero principal. Se determinó también que es imposible ajustar la deformación con un solo conjunto de valores hidráulicos y

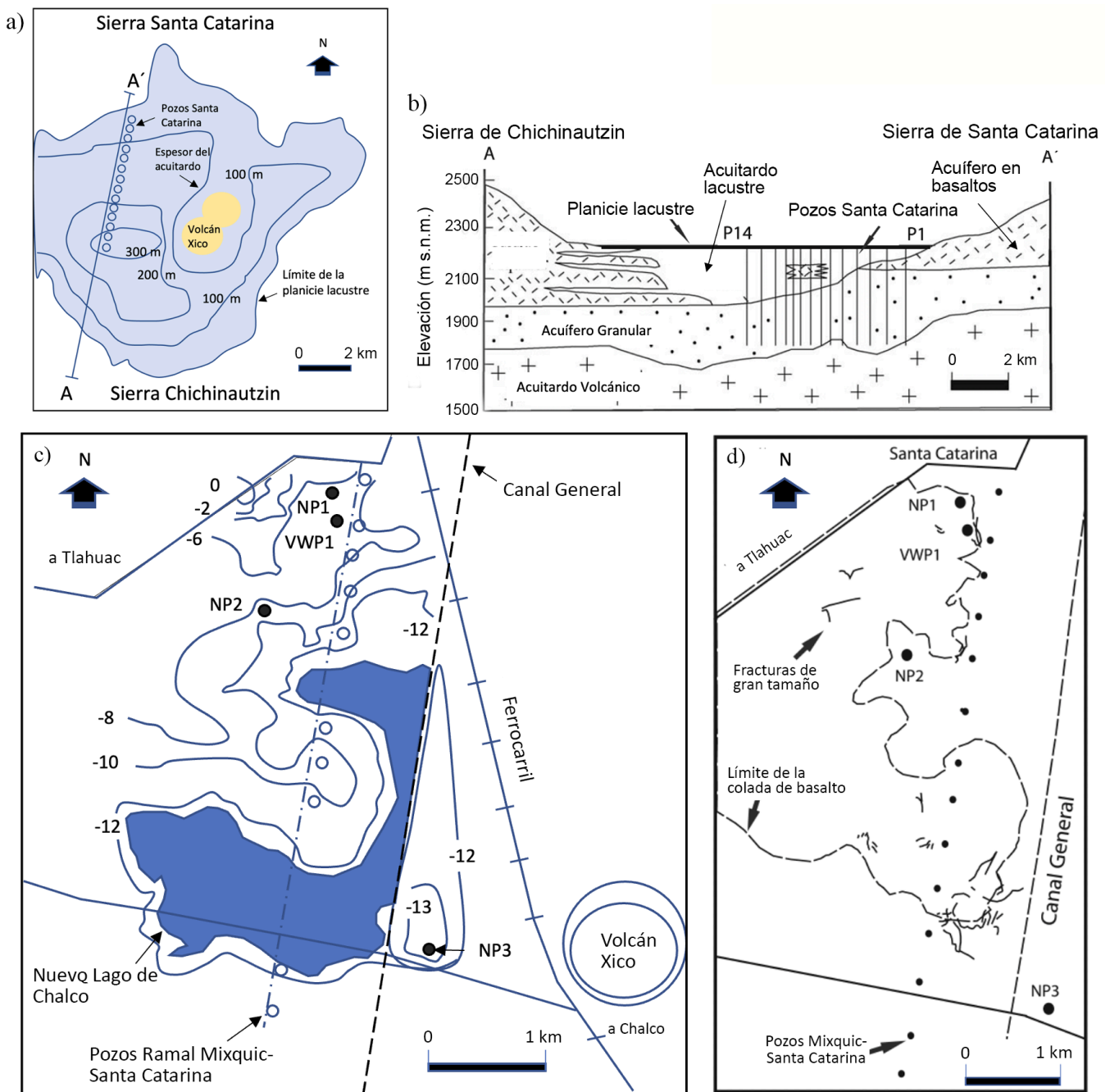


Figura 6. a) Planicie lacustre del Ex Lago de Chalco, con la ubicación de los 14 pozos de Santa Catarina. Se muestra el espesor del acuitardo lacustre que alcanza hasta 300 m en su parte central y la ubicación de la sección hidrogeológica con la distribución de los acuíferos granular y en basaltos fracturados. (Modificado de Ortiz-Zamora y Ortega-Guerrero, 2010). c) Hundimientos totales a 1960–2006 con el desarrollo una península por la consolidación diferencial y del Nuevo Lago de Chalco en la periferia de una colada de basalto. La profundidad al basalto fue identificada por métodos directos e indirectos. d) Desarrollo de fracturas de grandes dimensiones, hasta de 2 m de apertura en superficie. Se distribuyen preferentemente en las inmediaciones del límite de la colada de basalto que proviene de la Sierra de Santa Catarina. (Modificado de Ortiz-Zamora y Ortega-Guerrero, 2010) (continúa).

geomecánicos; necesariamente se tienen que considerar dos conjuntos de valores, uno para el periodo 1960–1984 y otro para 1985–1998; por los efectos hidráulicos y geomecánicos que causó el sismo de 1985. Las predicciones realizadas con el modelo numérico desarrollado sugirieron en el momento de realizarse el análisis que, de continuarse con los actuales caudales de bombeo, la deformación total vertical del terreno sería cercana a los diez metros para el año 2025 (Figura 7d) (Aguilar-Pérez *et al.*, 2006).

Formación de nuevos minerales

Este proyecto nace a través de un convenio de colaboración entre el Municipio de San Miguel de Allende y el CGEO-UNAM en el año de 2012. Tuvo como objetivo identificar la causa de la alta incidencia de cáncer de pleura (mesotelioma maligno, MM) y de cáncer de pulmón (CP) en habitantes de la comunidad rural de Tierra Blanca de Abajo, en las proximidades de la Ciudad de San Miguel de Allende, ubicados dentro de la Cuenca de la Independencia (Figura 4b).

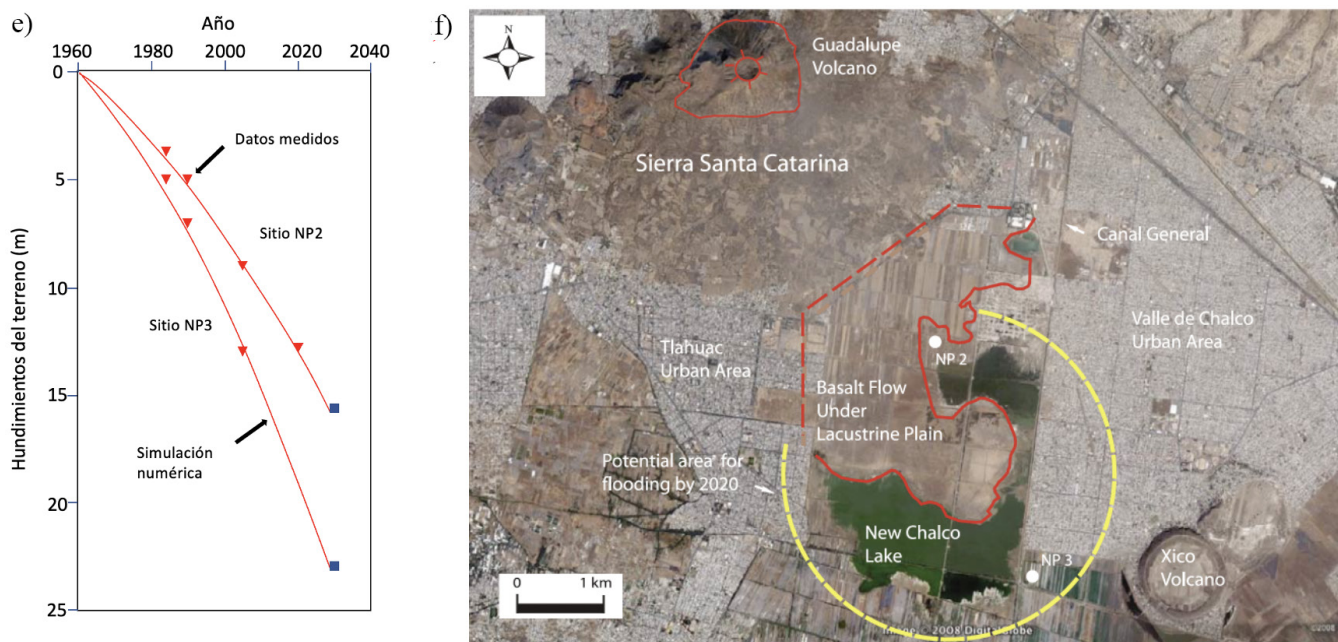


Figura 6 (cont.). e) Evolución de los hundimientos en los sitios de instrumentación y monitoreo NP2 y NP3 con espesor del acuitardo de 140 m y 300 m de espesor; los hundimientos observados en campo recientemente son 14 m y 20 m respectivamente y coinciden con las simulaciones numéricas de la respuesta transitoria del acuitardo al bombeo. f) Imagen mostrando el desarrollo del Nuevo Lago de Chalco en una imagen de Google Earth de 2006 y el riesgo de inundación hacia zonas urbanas próximas. (Modificado de Ortiz-Zamora y Ortega-Guerrero, 2010).

Se realizaron estudios geológicos detallados y la implementación de diferentes técnicas microscópicas y analíticas para la identificación de nueve agentes cancerígenos de pulmón y pleura del Grupo 1 enumerados por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC por sus siglas en inglés); en paralelo con una encuesta retrospectiva de registros clínicos y de mortalidad de los años 2000–2012. Los resultados geológicos muestran la presencia de erionita-K, que ocurre como un producto diagenético en una toba riolítica zeolítica confinada entre dos ignimbritas riolíticas fracturadas (Oligoceno-Mioceno), que están superpuestas por una secuencia sedimentaria lacustre del Plioceno (Figura 8a, 8b y 8c); este mineral quedó expuesto naturalmente por erosión, transporte a través del sistema hidrológico y por una variedad de actividades antropogénicas, incluido su uso en los materiales de construcción utilizados en las casas antiguas. También se encontraron fibras de erionita en suelos expuestos de la comunidad, que pueden volar fácilmente y llevarse a las calles y áreas recreativas cerca de escuelas y hogares (Ortega-Guerrero y Carrasco-Núñez, 2014).

Mientras que, de un total de 45 muertes entre 2000 y 2012, 14 muertes corresponden a diferentes neoplasias de pulmón y al menos cuatro muertes a MM. Las edades al diagnóstico de MM fueron entre 30 y 54 años. Las tasas anuales de mortalidad por mil por CP y MM estandarizadas por edad en el pueblo (edad >20 años) son 7.09 y 2.48 para los hombres y 4.75 y 1.05 para las mujeres, respectivamente (Ortega-Guerrero *et al.* 2015).

Los resultados indican que la exposición ambiental a la erionita es la principal causa de las altas tasas de mortalidad por MM en la Comunidad de Tierra Blanca de Abajo, lo que respalda casos similares para personas expuestas a fibras de erionita en Capadocia, Turquía.

El origen de la erionita estuvo asociado al flujo de agua subterránea –bicarbonatada, ligeramente termal y pH básico– a través de las ignimbritas fracturadas a lo largo de millones de años, lo que permitió las reacciones químicas con el vidrio riolítico, que dieron lugar a la formación de la serie de zeolitas heulandita-clinoptilolita y posteriormente la erionita-K. La erionita fue expuesta por fenómenos

de erosión a lo largo de miles de años y recientemente se incrementó por la deforestación; la construcción de casas de adobe con sedimentos fluviales que contienen erionita aumentó su exposición a los pobladores (Ortega-Guerrero y Carrasco-Núñez, 2014).

Sustento de ecosistemas

El flujo de agua subterránea en medios geológicos fracturados juega también un papel importante en su relación con los ecosistemas; interacción que se presenta en dos ejemplos, uno en la Cuenca de la Independencia del semiárido mexicano (Orozco-Urbe *et al.*, 2021) y otro en la Cuenca del Arroyo Chamela en un bosque tropical seco que se desarrolla sobre granito fracturado (Orozco-Urbe *et al.*, 2023).

La Cuenca de la Independencia

Este trabajo se enfocó a la parte sur de la Cuenca de la Independencia en el Área de Influencia Hidrológica de la ciudad de San Miguel de Allende que comprende la influencia de la Sierra de los Cuarzos y los volcanes Tábula y Picachos (Figuras 4 y 9), con el fin de comprender la evolución de las manifestaciones de agua subterránea, históricas y actuales de algunos manantiales para identificar y determinar propuestas de manejo hacia la conservación de la vegetación, de la biodiversidad y con base en ello, recuperar el funcionamiento hídrico en diferentes escalas de tiempo.

Se localizaron y caracterizaron 23 manantiales y tres ciénagas, controlados por un medio geológico compuesto por rocas volcánicas fracturadas en las partes altas de la subcuenca, así como por sedimentos granulares, poco consolidados y abanicos aluviales en las partes medias y bajas. Actualmente dos manantiales y una ciénaga se han secado completamente y dos ciénagas han disminuido su caudal histórico (El Chorro y El Tajo o Las Tinajas y la Ciénaga de Landeta), y existe el riesgo de que más de ellos desaparezcan, por el incremento del bombeo (Orozco-Urbe *et al.*, 2021).

La ubicación de los manantiales y ciénagas está relacionada con zonas de contacto geológico entre diferentes estructuras tectónicas,

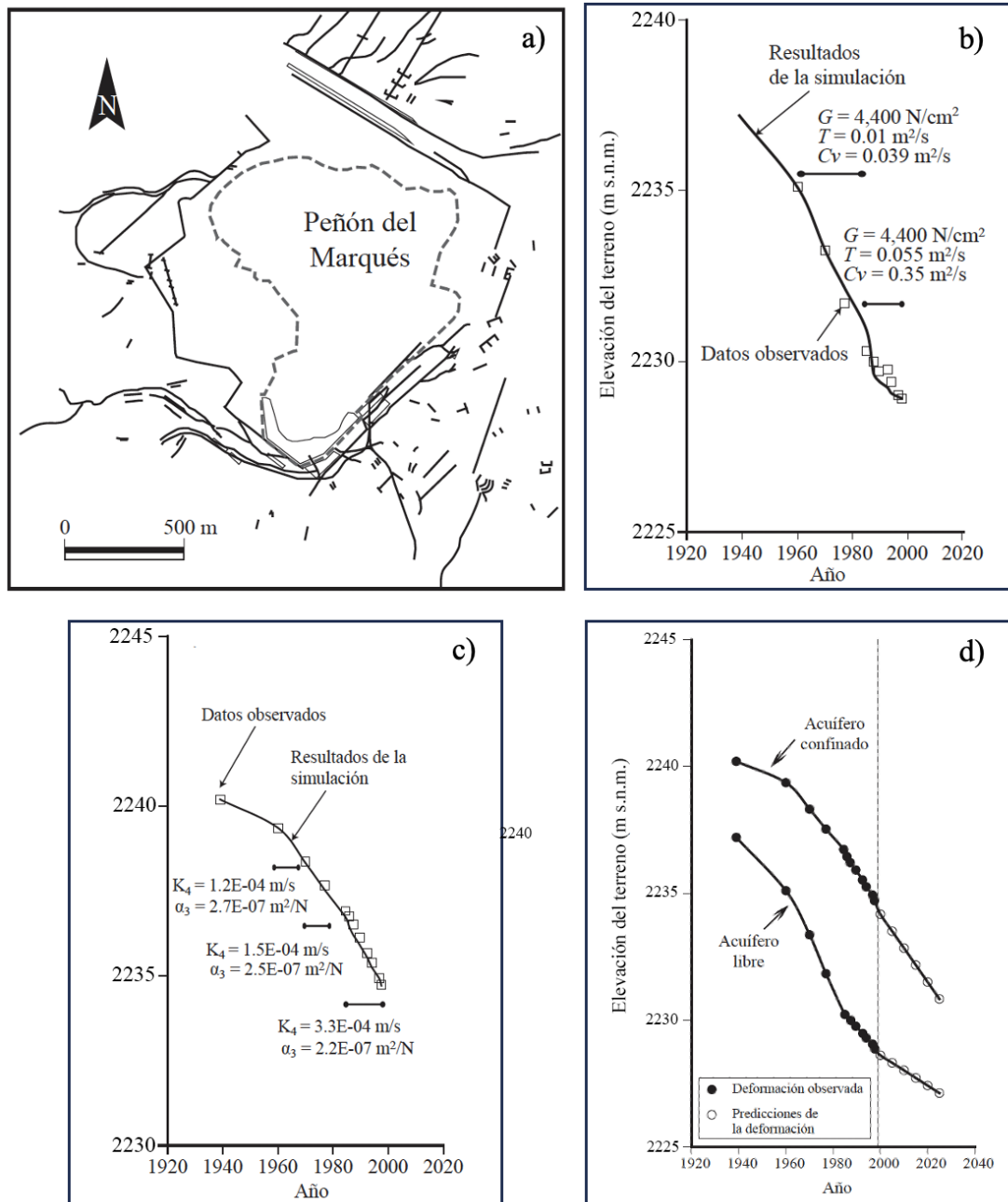


Figura 7. a) Mapeo de fracturas alrededor del Peñón del Marqués; b) Reproducción de la deformación vertical del terreno –acuifero libre– para dos conjuntos de valores de transmisividad (T) y coeficiente de consolidación (C_v), donde el módulo de rigidez al corte se mantiene constante $G=4400 \text{ N/cm}^2$; c) para el acuifero confinado; d) Predicciones numéricas de la deformación vertical del terreno al año 2025. (Modificado de Aguilar-Pérez *et al.*, 2006).

presentan diversas características que indican flujos locales y uno de tipo intermedio; la disminución o pérdida de caudal está asociada a la apertura de pozos cercanos. Se plantean propuestas de manejo hacia la conservación de la vegetación y la biodiversidad para recuperar el funcionamiento hídrico en diferentes escalas de tiempo.

Se propone el manejo de la biodiversidad (listado de especies de flora y fauna con un uso actual y potencial) y educación ambiental para mejorar las condiciones de infiltración del agua de lluvia; mientras que, la conservación de manantiales, requiere de acciones a nivel de zonas funcionales de recarga en el área de influencia, que ayuden a recuperar progresivamente el flujo subterráneo que los alimenta, a través de la oferta de servicios ecosistémicos por áreas funcionales. Se distinguen,

para ello, acciones en zonas altas, medias y bajas; la reducción de la extracción del agua subterránea y su uso eficiente es también una condición para la conservación (Orozco-Uribe *et al.*, 2021).

La Cuenca del Arroyo Chamela

La importancia del medio geológico fracturado en la dinámica físico-química del Ciclo Hidrológico de la Cuenca del Arroyo Chamela (CACH) con un área de 190 km^2 , que sustenta los ecosistemas terrestres y de transición con el Océano Pacífico, se estudió en 2010 (Figura 10a), como parte de un Convenio de colaboración con Impulsora Chamela-CGEO (CV-COSJ-CGEO-004-VII/2010) (Ortega-Guerrero, 2011b). Previo a estos estudios, se consideraba a las rocas graníticas

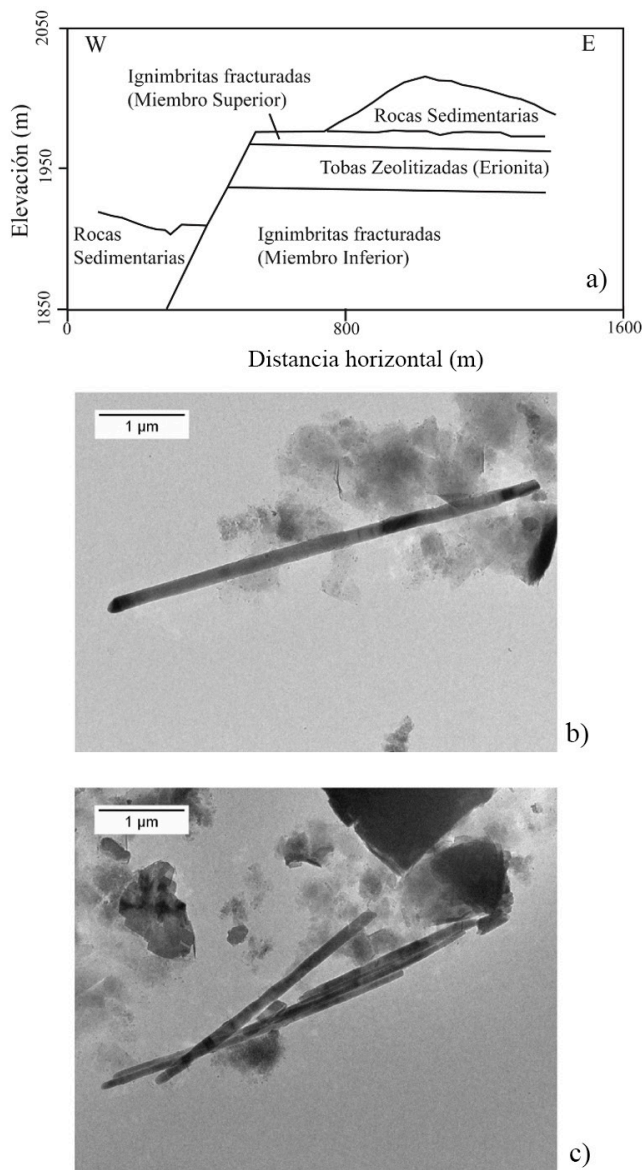


Figura 8. a) Sección transversal del afloramiento donde se ubica el mineral de Erionita, en una toba zeolitizada, ubicada entre dos capas de ignimbritas fracturadas. De acuerdo con el análisis de los SGFAS el sitio se ubica en una zona donde dominan las condiciones de descarga y cierto termalismo. b) y c) Las imágenes representan fibras de erionita por Microscopio de Escaneo Electrónico (MES) (inéditas). La sección es modificada de Ortega-Guerrero y Carrasco-Núñez (2014).

y vulcanoclásticas prácticamente impermeables; sin embargo, el flujo de agua subterránea en rocas ígneas fracturadas sustentan la recarga hacia un acuífero granular sujeto a extracción, a la presencia y dinámica ecosistémica en esta cuenca, además de la interacción del ciclo hidrológico entre el continente y el océano. La evaluación del ciclo hidrológico sobre bases horarias y la extracción del agua subterránea a través de pozos y norias concluyeron que no es factible incrementar la extracción existente hasta 2010 (Ortega-Guerrero, 2011b).

Orozco-Uribe *et al.* (2023), a través de un Proyecto PAPIIT-UNAM (IG200519), evaluaron la complejidad de los procesos hidrológicos sobre granito fracturado con suelos de alteración delgados (<1 m), en tres microcuencas (62.23 ha) en el denominado Bloque Colorado, en el interior de la Cuenca del Arroyo Chamela; las cuales sustentan

un Bosque Tropical Caducifolio (BTC) en estado de conservación, donde poco se conocía sobre el funcionamiento del agua subterránea y su conexión con los otros componentes del ciclo hidrológico (Figura 10a). Para ello, se realizaron vuelos para obtener imágenes LiDAR; trabajo de campo, para determinar la distribución de la vegetación y caracterización del medio fracturado; análisis de hidrogramas, a partir de mediciones en vertederos existentes automatizados de la respuesta precipitación-escorrimento; verificación de la respuesta de las propiedades de suelo delgado y arenoso por medio simulaciones numéricas del suelo para el estudio del proceso de infiltración hacia el medio fracturado subyacente; todo ello soportado por la integración y síntesis del conocimiento multidisciplinario existente, por 40 años principalmente de los Institutos de Ecología, Biología, y de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, que añade componentes ecosistémicos fundamentales en las microcuencas en estudio.

Se demostró que existe una infiltración muy rápida del agua de lluvia a través del suelo hacia el medio fracturado que se satura rápidamente y se manifiesta a la salida de dos de las microcuencas como un importante gasto de agua subterránea (caudal base) (Figura 10b y 10c); adicionalmente, la distribución de la vegetación y su fenología se asocia con las zonas de recarga y descarga de agua subterránea, controlados también por el sistema de fracturamiento (Figura 10c); y de las condiciones climáticas en cuatro temporadas: primavera seca (marzo-mayo); inicio de lluvias (junio y julio); lluvias (agosto-noviembre); e invierno (diciembre-febrero) (Orozco-Uribe *et al.*, 2023).

Se identificó por primera vez, el efecto y magnitud de la evapotranspiración (ET) en los descensos diurnos del caudal base en la zona de descarga en dos de las microcuencas, y se establecieron rangos de ET en las zonas de recarga (Figura 10c). Por lo que, la infiltración y recarga de agua subterránea es la principal componente del ciclo hidrológico que sustenta estos ecosistemas y mucho mayor a lo que previamente se consideraba, ya que más del 80 % del agua de lluvia se infiltra en cuestión de horas al medio fracturado.

La precipitación y los hidrogramas característicos del inicio de los escurrimientos, permitió integrar y proponer un modelo conceptual de la respuesta ecosistémica a los cambios estacionales relacionándola a la recarga y descarga de agua subterránea. Este modelo es un medio económico y continuo que puede ser utilizado como base en otros sistemas estacionales que se desarrollan sobre medios geológicos fracturados, con implicaciones importantes en el uso sustentable del agua en la región y para la conservación de los ecosistemas naturales; los cuales están íntegramente asociados y adaptados a su dinámica hidrológica histórica (Orozco-Uribe *et al.*, 2023).

Fracturamiento del suelo para su restauración, infiltrar agua de lluvia y sustituirla por agua subterránea: gestión de acuíferos y adaptación al cambio climático

Este proyecto surge de la colaboración con el M. en C. Ramón Aguilar García, investigador del Campo Experimental del Norte de Guanajuato (CENGUA), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Los resultados se encuentran reportados por Aguilar-García y Ortega-Guerrero (2017).

La erosión y daño en las propiedades de los suelos pueden causar efectos negativos a escalas regionales, en la producción de alimentos, sostenibilidad de ecosistemas, recarga y sustentabilidad de agua subterránea, y en el cambio climático, entre otros; ya que juegan un papel muy importante en la continuidad del ciclo hidrológico. En México, aproximadamente el 85 % del agua que se extrae para producción agropecuaria es subterránea, destacando el abatimiento rápido y progresivo del nivel freático, al que se asocia la contaminación y migración de elementos químicos nocivos a la salud y al ambiente. Adicionalmente,

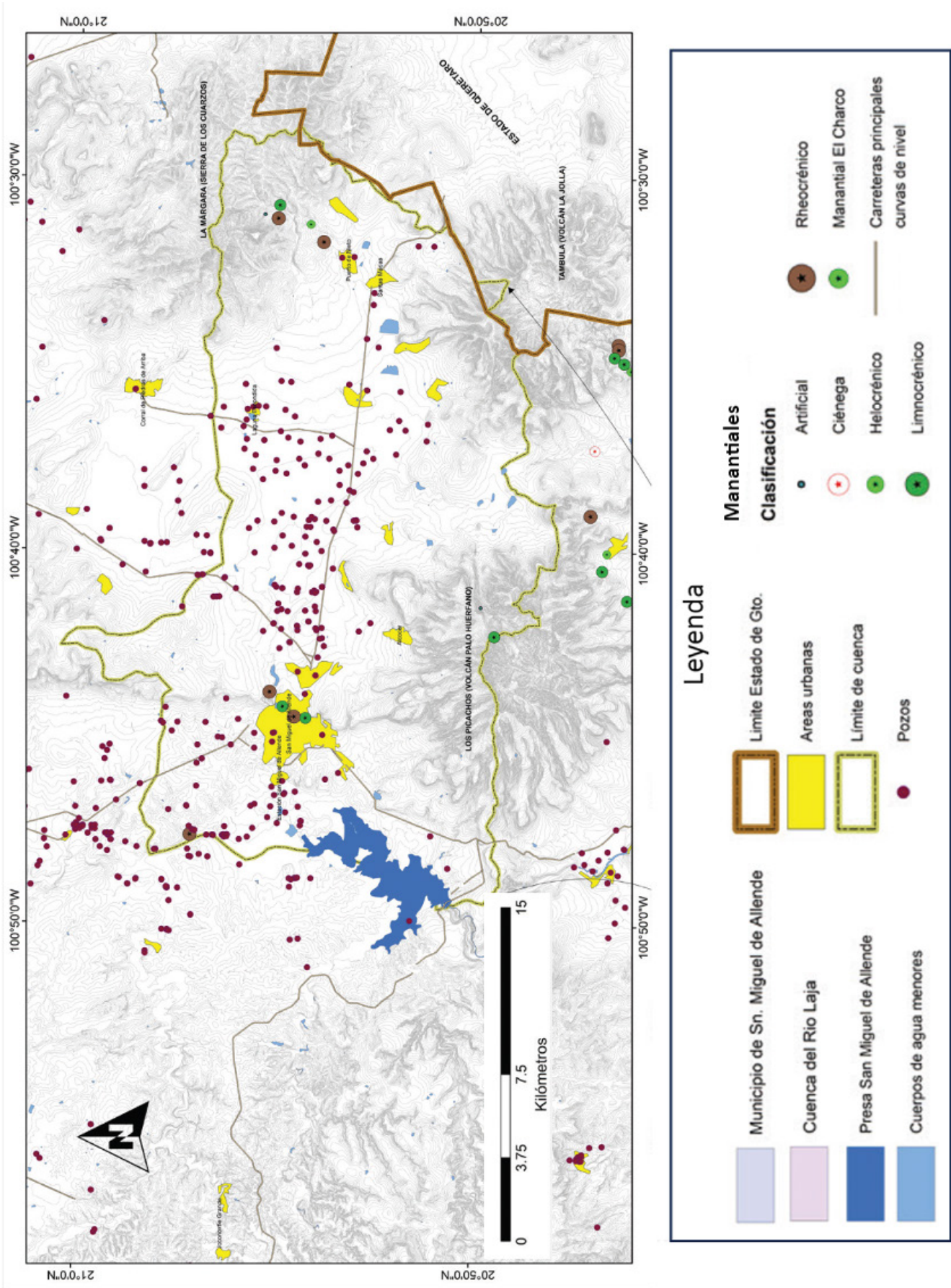


Figura 9. Ubicación de manantiales en el área de influencia hidrológica de San Miguel de Allende (RH12Hb). Se muestran las principales zonas urbanas y las elevaciones del terreno. Modificado de Orozco-Urbe *et al.* (2021).

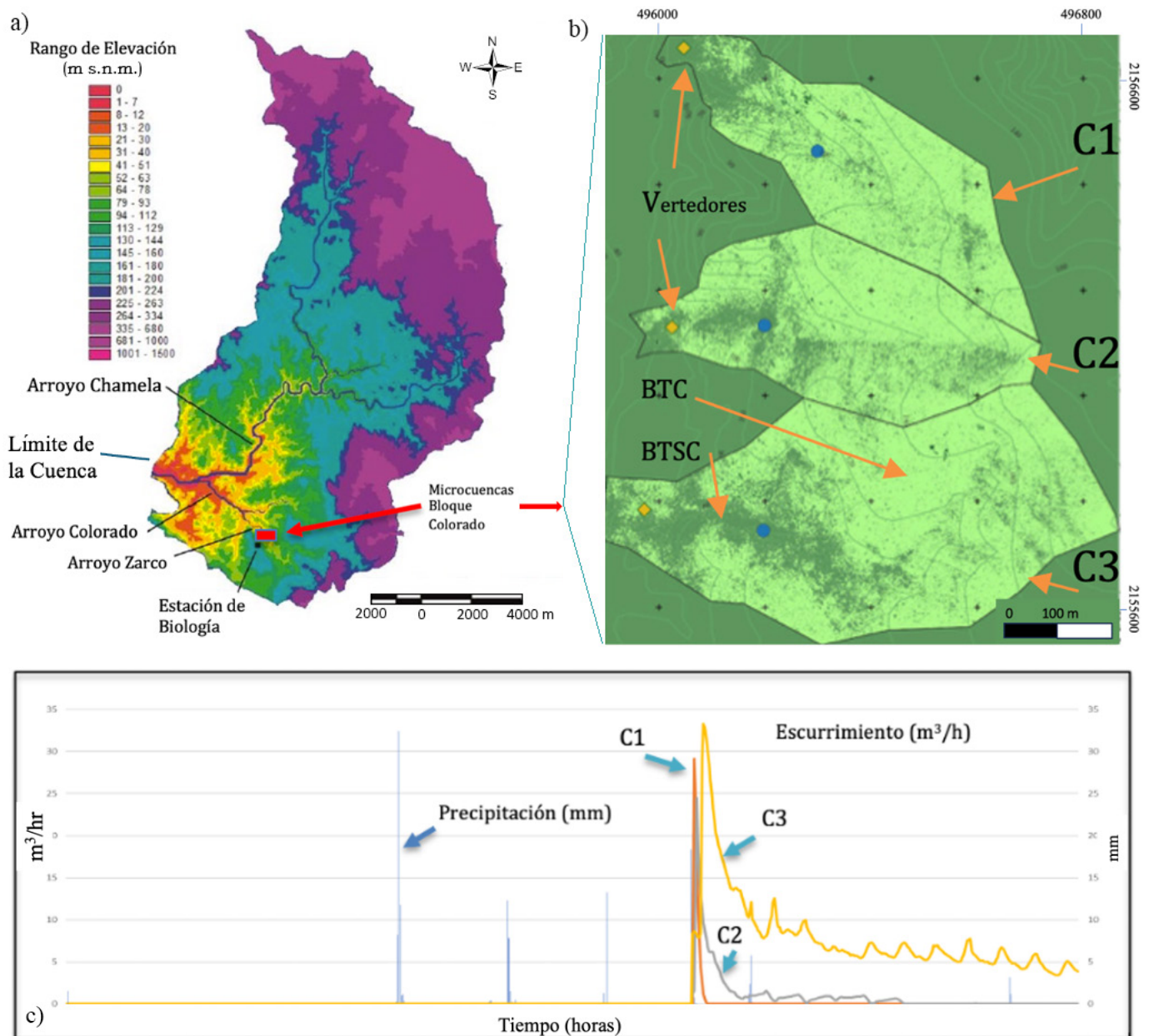


Figura 10. a) Ubicación de la Cuenca del Arroyo Chamela (Modificado de Ortega-Guerrero, 2011b). b) Imagen LIDAR de las tres microcuencas de estudio (C1 a C3) mostrando la ubicación de los vertedores a la salida de las microcuencas, distribución y orientación de la distribución del Bosque Tropical Caducifolio (BTC), en zonas de recarga y Subcaducifolio (BTSC) en las de descarga. (Modificado de Orozco-Urbe *et al.*, 2023). c) Respuesta lluvia-escorrentía en las tres microcuencas. Previo a la generación del primer escurrimiento hubo tres eventos de precipitación que incrementaron los contenidos de humedad en el suelo y medio fracturado, y solo en C2 y C3 se generó flujo base (descarga de agua subterránea). Las variaciones diurnas del caudal base se asocian a la evapotranspiración de raíces leñosas del BTSC en las fracturas. (Modificado de Orozco-Urbe *et al.*, 2023).

las actividades agropecuarias y forestales han dañado los suelos, reduciendo progresivamente su capacidad de infiltración y productivas en especial. De esta problemática surge la necesidad e importancia de restaurar estos suelos dañados para recuperar parte de sus funciones naturales, principalmente de infiltración y productividad.

En el CENGUA-INIFAP se han implementado técnicas de restauración de suelos por más de 40 años en lotes permanentes, no solo para mejorar sus propiedades productivas, sino la de mejorar su estructura e infiltrar agua de lluvia al subsuelo, que puede sustituir progresivamente el uso de agua subterránea y con ello reducir el minado de los acuíferos en el centro y norte del país. Uno de los principios de restauración que

se desarrolló por el M.C. Ramón Aguilar García consiste en fracturar el suelo en los primeros 0.10 a 0.40 m dependiendo de la magnitud del daño, conocido como rotura vertical[®], la cual se hace bajo condiciones especiales de contenido de humedad e incorporación de nutrientes bajo condiciones controladas.

Con el fin de mostrar la importancia de metódicamente fracturar el suelo en áreas agrícolas y pecuarias se cuantificó el balance y dinámica del agua en la zona no saturada por medio de mediciones diarias de diferentes parámetros meteorológicos y de los perfiles de humedad, en un lote permanente sujeto a prácticas de conservación donde una etapa del proceso consiste en fracturar el suelo (rotura vertical[®]) por medios

mecánicos o de tracción animal, en el Acuífero de la Independencia (Cuenca Alta del Río La Laja tributaria de la Cuenca Lerma-Chapala) (Figuras 1b, 4b y 11a). Para ello fue necesario determinar a detalle la estratigrafía del sitio con registros continuos de conductividad eléctrica (EC) (Geoprobe®) y granulometría en muestras inalteradas, a las que se determinaron propiedades físicas y contenido de materia orgánica, en sus primeros 2.5 m de profundidad; las variaciones del contenido de humedad (θ) a 0.15, 0.30, 0.60, 0.90 y 1.20 m se controlaron por Refractometría en el Dominio del Tiempo (RDT); la permeabilidad saturada se cuantificó con el Permeámetro de Guelph, complementadas con pruebas de infiltración. Se calibró un modelo numérico unidimensional para desarrollar herramientas predictivas.

La Figura 11a y 11b muestran la ubicación del sitio de estudio al interior del CENGUA-INIFAP, la ubicación de los registros de EC con el Laboratorio Móvil de Rastreo de Contaminantes (LMRC) y la instrumentación con el RDT.

Los resultados indican la captura progresiva de carbón y que se ha alcanzado una conductividad hidráulica saturada de hasta $Kfs=5\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$, en los primeros 0.60 m de profundidad, que contrasta hasta en dos órdenes de magnitud con suelos de manejo tradicional; esto permitiría infiltrar progresivamente una lámina total de agua de 6753 mm durante tres días, que cubriría cualquier secuencia de eventos máximos de lluvia registrados en la región, incluidos dos huracanes en ambas vertientes del país. Los sensores de RDT mostraron un rápido incremento en los contenidos de humedad a lo largo del perfil, indicando que las características logradas en el suelo permiten el ingreso inmediato y almacenamiento del agua de lluvia, con una mínima proporción de evaporación y cero escurrimientos (Figuras 11c y 11d).

El modelo numérico calibrado y aplicado a las condiciones del sitio de estudio confirma la magnitud de las propiedades físicas observadas, del fracturamiento del suelo y desarrollo de macro poros asociados a la actividad biológica que también se incrementa.

Los resultados obtenidos en esta investigación destacan la importancia del fracturamiento del suelo dañado y prácticas de conservación asociadas, en cambios importantes: 1) el incremento del contenido de materia orgánica, 2) el incremento progresivo de los valores de infiltración, 3) incremento de la conductividad hidráulica saturada, 4) la porosidad y la densidad aparente del suelo han sufrido transformaciones que reducen la erosión y permiten infiltrar agua de lluvia de cualquier evento ocurrido en la región; 5) se aplica a cultivos de riego, lo cual permitiría disminuir progresivamente la extracción de agua subterránea, en más de un 50 %, a través de prácticas adecuadas de conservación, aspecto fundamental en la gestión del acuífero en cuestión; 6) adaptación a los efectos negativos del cambio climático, ya que las propiedades del suelo generado, garantizan la presencia de agua en el subsuelo ante fenómenos de sequía y el de infiltrar potencialmente la lluvia máxima registrada en la cuenca; 7) se reduce la siniestralidad ante sequías, por la cantidad de agua almacenada en el subsuelo. Esta agua permitiría la producción de cultivos perennes cíclicos de temporal y forraje para los animales (Aguilar-García y Ortega-Guerrero, 2017).

TRANSPORTE DE SOLUTOS Y CONTAMINANTES

Mecanismos de migración de solutos naturales (Elementos de Tierras Raras)

La concentración y evolución de los elementos químicos presentes de manera natural en el agua subterránea, desde sus zonas de recarga, permiten evaluar diferentes procesos de la interacción del agua con los diferentes tipos de rocas por las que circula, en particular del orden de encuentro y de las reacciones químicas que se llevan a cabo (Palmer y Cherry, 1984; Johannesson *et al.*, 1997).

El ejemplo que aquí se presenta corresponde a la Región del Bajío de Guanajuato, que fue parte de un convenio de colaboración del CGEO con el Consejo Región IV del Suroeste de Estado de Guanajuato en 2003 (Figura 2).

La región de estudio forma parte de dos provincias geológicas en el centro de México: la Mesa Central (MC) y la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), donde existen rocas carbonatadas marinas del Cretácico, rocas fracturadas de origen volcánico de la MC del Terciario y FVTM de basaltos y andesitas del Mioceno medio al Plioceno tardío, y depósitos vulcanoclásticos del Cenozoico, que rellenan depresiones tectónicas. Con el fin de conocer la interacción del agua subterránea con los diferentes tipos de rocas en la región, se seleccionaron elementos de la Serie de los Lantánidos que forman parte de los Elementos de Tierras Raras (ETR) de la Tabla Periódica, en 96 muestras de agua subterránea. La concentración de ETR en las muestras de agua y su equilibrio geoquímico se estudió a través de su especiación acuosa e índices de saturación con respecto a fases minerales y mezclas de agua, así como la colecta de muestras de rocas volcánicas para determinar su concentración de ETR; adicionalmente se recopiló la información de diferentes fuentes de ETR en rocas.

El trabajo de Salinas-Reyes y Ortega-Guerrero (2019), presenta varios aspectos importantes de la interacción agua-roca (Figura 12): 1) de acuerdo con el sentido y magnitud de las anomalías de Cerio (Ce) y Europio (Eu), las muestras fueron agrupadas en nueve familias diferentes, asociadas a las diferentes unidades hidrogeológicas. 2) Se encontró que las anomalías negativas de Ce se asociarían a las aguas subterráneas que circulan en un acuífero carbonatado-marino del Cretácico; mientras que las anomalías negativas se asocian a acuíferos fracturados de la MC, y las positivas de Eu a los acuíferos fracturados de la FVTM. 3) La presencia de anomalías negativas de Ce, en los acuíferos fracturado y granular que se ubican por encima del acuífero carbonatado, sugieren continuidad hidráulica entre ellos a través de fallas y microfracturas conectadas a profundidades mayores a 1000 m; lo cual es consistente con el modelo de los SGFAS, en donde los ETR actúan como trazadores naturales en este medio geológico complejo, confirmando la importancia de considerar los tiempos de residencia y la componente vertical de los SGFAS en la gestión del agua subterránea.. 4) La sección esquemática de la Figura 12, ilustra los patrones de ETR en agua subterránea esperados en diferentes posiciones a lo largo de la dirección de flujo; donde el flujo regional a través de la secuencia marina cretácica está representada por los patrones 1, 2 y 3. El agua subterránea, de flujos intermedios, circula a través de las ignimbritas y riolitas de la SMOcc la representan los patrones 4, 5 y 6. Finalmente, un sistema de flujo local que se desarrolla en los depósitos vulcanoclásticos cenozoicos que rellenan la cuenca representan el patrón 7.

Contaminantes inducidos por el bombeo intensivo

La extracción excesiva de agua subterránea modifica el funcionamiento e interacciones del agua subterránea con los demás componentes de los SGFAS, entre ellos la migración de elementos químicos que se concentraron a lo largo de miles de años en sedimentos lacustres de grano fino –acuitardo– por procesos naturales, como el de evaporación en cuencas cerradas como la Comarca Lagunera y la Cuenca de México, o por la migración de agua termal –rica también en ciertos elementos químicos nocivos a la salud humana y al ambiente– de los sistemas regionales de flujo por efectos de densidad, como la Cuenca de la Independencia.

La Comarca Lagunera

La Comarca Lagunera (LCL), se ubica en la Cuenca endorreica de los Ríos Nazas y Aguanaval en los estados de Coahuila, Durango y Zacatecas, mientras que LCL se limita al interior de los estados

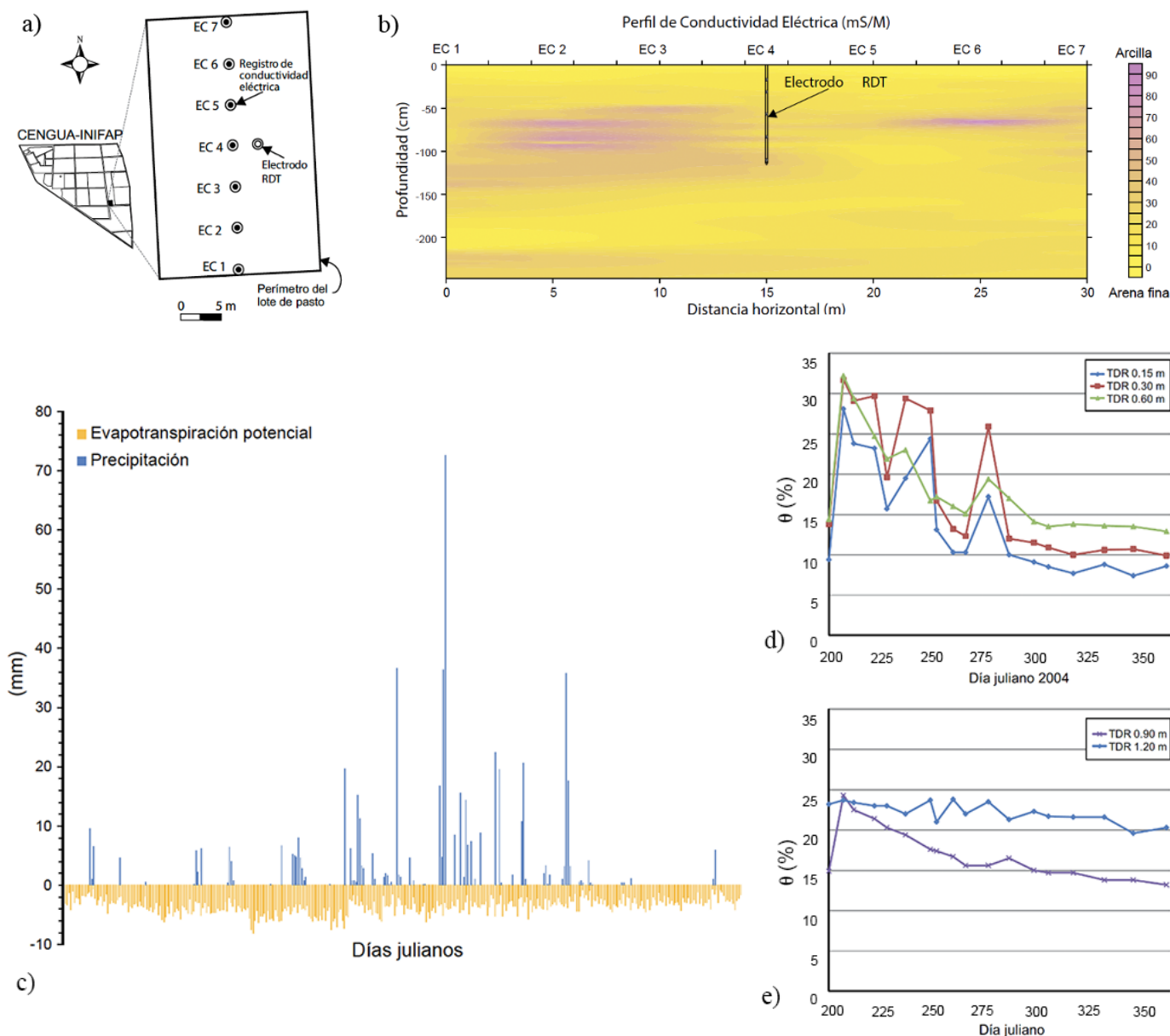


Figura 11. a) Ubicación de los registros de Conductividad Eléctrica (EC) en el lote de estudio separados cada 5 m. b) Perfil de EC mostrando las variaciones granulométricas entre arenas y arcillas de los depósitos fluvio-lacustres y la posición de los cinco sensores en el electrodo de Refractometría en el Dominio del Tiempo (RDT). c) Datos diarios de precipitación y evapotranspiración. d) Respuesta del contenido de humedad (θ) en la varilla de RTD para la secuencia de lluvias principales en los sensores ubicados a 0.15, 0.30 y 0.60 m; y e) en los sensores más profundos ubicados a 0.90 y 1.20 m.

de Coahuila y Durango. Desde el punto de vista hidrogeológico se reconocen dos acuíferos, uno en medios geológicos fracturados y desarrollo cárstico en las rocas carbonatadas del Mesozoico, y un acuífero granular regional en sedimentos fluvio-lacustres Terciario-Cuaternarios (CONAGUA, 2018). La importancia de un acuitardo lacustre, constituido por sedimentos finos de limos y arcillas, se formó en las antiguas lagunas terminales de Viesca, Mayrán, Los Remedios, Tlahualilo y Colorado-Liebres fue incorporado posteriormente por Ortega-Guerrero (2003, 2016) (Figuras 13a y 13b).

Cabe mencionar que se han documentado altas concentraciones de arsénico en las aguas subterráneas en la LCL, donde el envenenamiento por arsénico es crónico y endémico, desde la década de 1960, y donde un exaltado debate existió durante décadas sobre su origen dominante. La explotación del agua subterránea comenzó en la década de 1920

y para la década de 1980 había casi 3000 pozos que bombeaban más de 1000 millones de $m^3/año$, lo que provocó que los niveles piezométricos descendieran rápidamente a un ritmo de unos 2 a 3 $m/año$ (CONAGUA, 2018).

Las investigaciones en LCL se enfocaron a determinar la interacción fisicoquímica del acuitardo lacustre con los acuíferos granular y fracturado. La interacción física en función de la distribución de gradientes hidráulicos y la hidrogeoquímica para determinar el origen del arsénico y otros elementos químicos disueltos en el agua subterránea, y su evolución en tiempo y espacio utilizando estudios previos en la región.

Para ello, se colectaron muestras de agua subterránea de los acuíferos carbonatados y granulares y del acuitardo arcilloso en el lago terminal de Viesca, para determinar el origen a partir de la composición química

e isotópica del agua subterránea respaldada por modelado geoquímico. Los resultados se publicaron en Ortega-Guerrero (2003 y 2017).

Los resultados mostraron diferentes procesos físicos y químicos importantes del agua subterránea entre el acuitardo lacustre con los acuíferos carbonatado y granular: 1) Un origen meteórico que llegó a los lagos terminales a través de abundantes manantiales en el acuífero carbonatado y las inundaciones perennes de los ríos Nazas y Aguanaval principalmente; 2) El acuífero carbonatado contiene arsénico en concentraciones superiores al límite máximo para consumo humano de la norma mexicana (25 mg/L), asociado con rocas carbonatadas en las zonas de recarga (Figura 13c); 3) El agua del paleo-lago de Viesca –y cuyo comportamiento se puede extender a los demás paleo-lagos– experimentó una evaporación progresiva a lo largo de miles de años, como lo demuestra el enriquecimiento de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y patrones geoquímicos característicos en el acuífero granular y el acuitardo que resultaron en agua altamente salina con 35000 ppm de sales disueltas, rica en arsénico –hasta 5 mg/L, quinientas veces por encima del límite internacional para consumo humano– y con edades de hasta 30000 años (Figuras 13c y 13e) (Ortega-Guerrero, 2003, 2017).

4) La concentración de arsénico en el agua subterránea fue limitada por la adsorción o la coprecipitación en óxidos de hierro, superficies minerales arcillosas y carbono orgánico, que se encuentran ahora presentes en el medio granular y que coinciden con la presencia de arsénico en el suelo. 5) La desorción de arsénico incorporará concentraciones adicionales de arsénico en el agua subterránea. 6) El agua de poro en el acuitardo –que se extiende a lo largo de todos los paleo-lagos– es rica en arsénico y otros solutos, y de acuerdo con la distribución de arsénico en el acuífero (1980 y 1990), ha estado avanzando progresivamente desde los márgenes lacustres hacia el acuífero granular principal, debido a la inversión de los gradientes hidráulicos causados por la explotación intensiva de las aguas subterráneas y la reducción de la escorrentía de agua dulce provocada por la construcción de represas en los ríos Nazas y Aguanaval (Figuras 13f y 13g) (Ortega-Guerrero, 2017). El avance de este frente llegó hace más de 20 años a los pozos que abastecen a las ciudades de Torreón, Ciudad Lerdo y Gómez Palacio con variaciones estacionales (López-Urióstegui, 2007; Aguilar-Muñiz *et al.*, 2013).

La extracción de agua subterránea excede la capacidad segura del acuífero desde hace varias décadas y es de esperarse la invasión de esta agua de poro del acuitardo, con altas concentraciones de arsénico y otros solutos–sulfatos, cloruros, sodio, boro, manganeso, estroncio y compuestos nitrogenados–se incrementen en el futuro, causando daños significativos a la calidad de las aguas subterráneas en esta región, quizás, irreversible a escala humana.

La Cuenca de México

El acuitardo lacustre que cubre el acuífero granular principal y otros en rocas volcánicas fracturadas en la Cuenca de México (Figuras 2), contiene agua de poro con altas concentraciones de elementos químicos disueltos originados (tipo salmueras superiores a la concentración de agua de mar) por la evaporación del agua en los paleo lagos simultáneo con el depósito de sedimentos finos; de tal manera que la inversión del gradiente en el acuitardo, ocasionada por el bombeo intensivo en el acuífero, está induciendo el movimiento de estos elementos hacia el agua subterránea, fuente principal de abastecimiento a la ZMCM, agricultura e industria; riesgo que se incrementa con el fracturamiento del acuitardo (Ortega *et al.*, 1997).

La distribución natural de iones disueltos en el agua de poro del acuitardo se asocia al flujo ascendente derivado de los SGFAS –descrito anteriormente– y a la difusión molecular (Figura 14). Sin embargo, la inversión de gradientes hidráulicos (Ortega-Guerrero *et al.*, 1999; Ortiz Zamora y Ortega-Guerrero, 2010) está induciendo el movimiento de estos elementos hacia el agua subterránea en el acuífero granular. Los efectos de este proceso están ocurriendo en la actualidad y se incrementarán a futuro con el desarrollo de un mayor número de fracturas; algunas de ellas que se continúan hasta el acuífero subyacente.

La Cuenca de la Independencia (Cuenca Alta del Río La Laja)

El modelo conceptual descrito en la sección previa de los SGFAS en la Cuenca de la Independencia, considera un ascenso vertical de agua termal, más antigua, rica en As, F⁻ y otros iones desde el acuífero fracturado, –que conforma un graben compuesto a profundidad–, inducido por la intensa explotación del acuífero granular, como el proceso dominante de migración de estos compuestos; la Figura 15 ilustra esta respuesta.

Este proceso de migración se encuentra en un estado transitorio, donde a medida que sigan reduciéndose los espesores de agua fría en el acuífero granular, la influencia del As y F⁻ provenientes del acuífero fracturado será cada vez mayor, por efecto de densidad del agua termal, y que a medida que los conos de abatimiento incrementen su radio de influencia, la extensión de las áreas impactadas será progresivamente mayor, pasando de 500 km² en 2000 a cerca de 800 km² en 2014.

El número de pozos afectados también se incrementaría, incluyendo pozos destinados a consumo humano y muchos más para riego agrícola, por lo que estos elementos podrían integrarse también al suelo, al aire y a los alimentos tanto para consumo humano como para ganado y sus derivados, e industriales. El escenario más crítico se presentaría en comunidades rurales donde los controles de calidad del agua de consumo humano no existen o son mínimos.

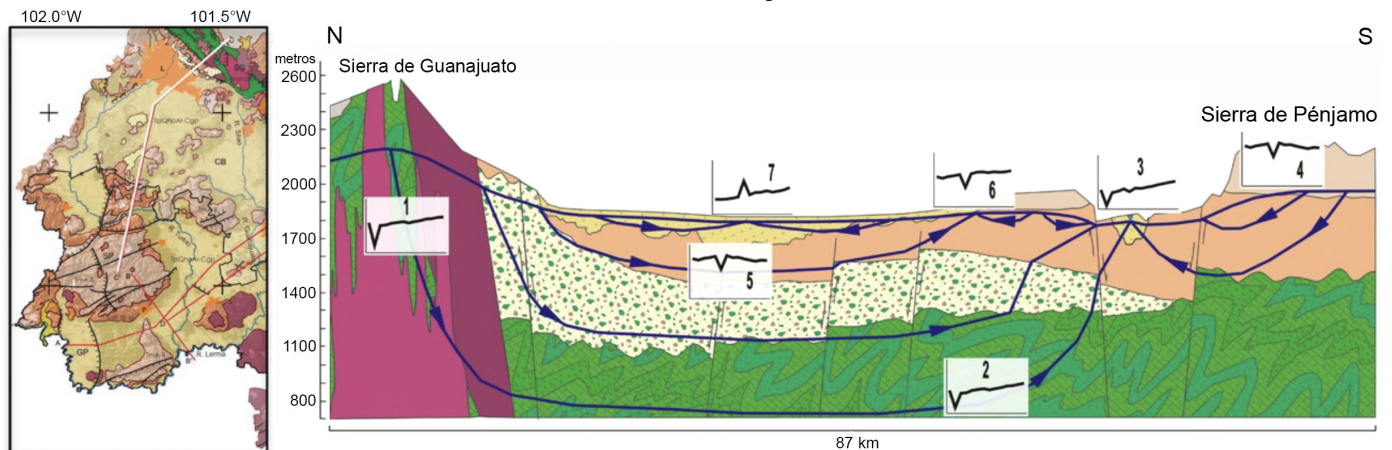


Figura 12. Patrones de flujo de agua subterránea a lo largo de una sección hidrogeológica desde la Sierra de Guanajuato (SG) hacia la Sierra de Pénjamo (SP). Ciudades principales: León (L), Pénjamo (P). (Modificado de Salinas-Reyes y Ortega-Guerrero (2019).

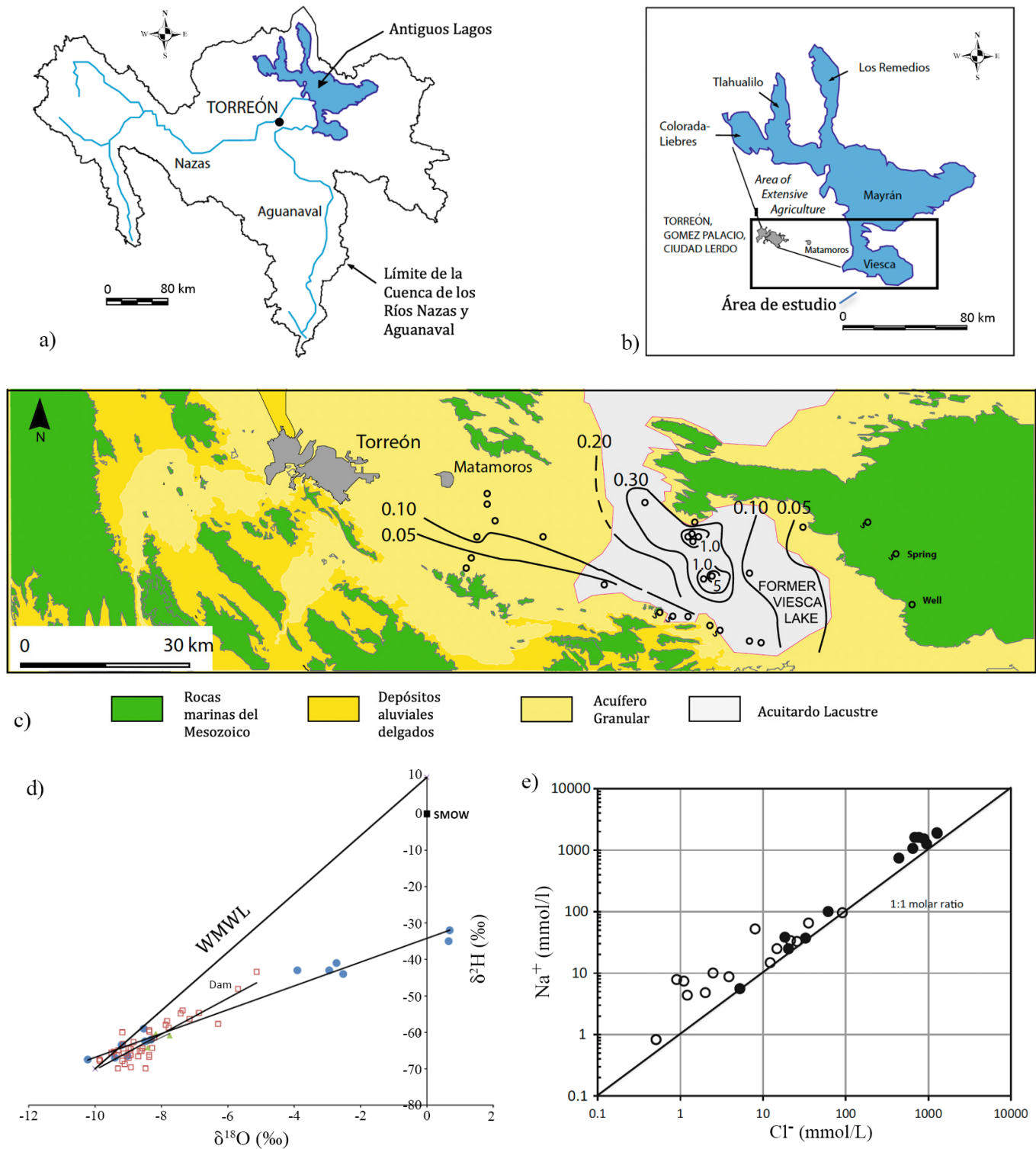


Figura 13. a) Cuenca endorreica de los Ríos Nazas y Aguanaval; ambos ríos convergían en la parte más baja en la zona de antiguas lagunas (Colorada-Liebres, Tlahualilo, Los Remedios; Mayrán y Viesca); b) Extensión del Acuífero Principal administrativo de CONAGUA; el rectángulo muestra la zona de estudio, entre Viesca y Torreón. (Modificado de Ortega-Guerrero, 2017); c) Concentración de arsénico en el agua subterránea. En el acuitardo lacustre se midieron hasta 5 mg/L, esto es 200 veces más que los límites permisibles para consumo humano de las normas mexicanas y 500 veces de la norma internacional. En el acuífero granular las concentraciones son también altas. (Modificado de Ortega-Guerrero, 2016); d) Enriquecimiento de $\delta^{18}\text{O}$ de diferentes estudios Latorre *et al.*, 1981 (cuadros en rojo), Brouste *et al.*, 1997 (triángulos en verde) y Ortega-Guerrero, 23106 (círculos llenos en azul) y $\delta^2\text{H}$ (SMOW, WMWL, Dam); e) concentración logarítmica de Cl^- y Na^+ (mmoles/L) alcanzan concentraciones superiores al agua de mar. (Modificado de Ortega-Guerrero, 2017) (continúa).

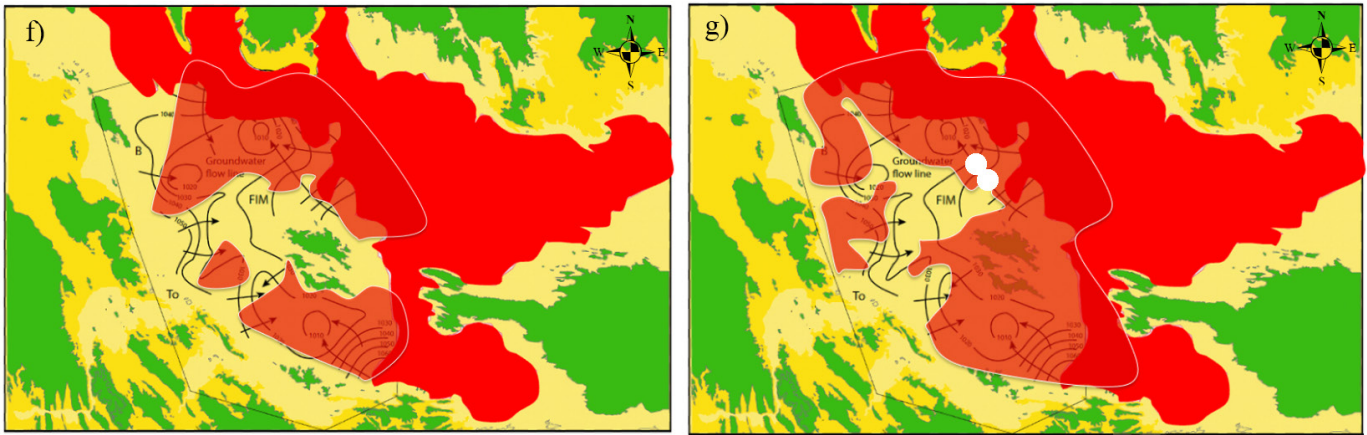


Figura 13 (cont.). Concentración de arsénico en el agua subterránea en el acuífero granular, f) en 1980 y g) en 1990. Las concentraciones más altas se ubican en las proximidades de los lagos antiguos y se reducen progresivamente hacia Torreón, Ciudad Lerdo y Gómez Palacio, en rojo se destaca la concentración que se encuentra por encima de los límites para consumo humano de acuerdo con las normas mexicanas. En 2007, prácticamente todo el acuífero se encontraba invadido por concentraciones superiores a 0.025 mg/L (Uriostegui, 2007). Modificado de Ortega-Guerrero, 2017).

El transporte del As y F⁻ estarían controlados por los efectos de temperatura del agua subterránea en el SGFAS la respuesta transitoria al bombeo. El transporte de calor se analiza en una sección posterior y se encuentra en proceso la evolución química del agua subterránea en el análisis acoplado de flujo de calor y transporte de estos elementos en la conexión del medio fracturado con el granular.

Derrames de derivados de hidrocarburos

Las investigaciones se realizaron bajo cinco convenios de colaboración con PEMEX-Refinación entre 2001 y 2005, para instrumentar y medir la presencia y distribución de derivados de hidrocarburos del subsuelo en 94 ha de superficie de la Ex refinería 18 de Marzo, ubicada al poniente de la Ciudad de México en las proximidades del límite lacustre (Figura 1b).

De estos proyectos se derivó la tesis de Delgado (2017) con el fin de entender los mecanismos que controlan su distribución y permanencia en el subsuelo del metil-tert-butil éter (MTBE), exclusivamente. El MTBE se utiliza como un aditivo oxigenante en las gasolinas, tiene una elevada solubilidad y baja adsorción en el suelo, que lo hacen difícil de degradar y representa riesgos a la salud y al ambiente.

Los primeros diez metros del subsuelo pertenecen a una secuencia lacustre de arcillas y arenas finas interestratificadas, con la presencia fracturas en los estratos de arcillas y conductos de raíces. El LMRC que se adquirió con los proyectos con PEMEX-Refinación permitió determinar la estratigrafía de detalle se obtuvo de a partir de registros de velocidad de penetración del sistema Geoprobe® y datos existentes del nivel freático para evaluar la dinámica del agua subterránea. El sistema Geoprobe® permitió determinar la distribución de derivados de hidrocarburos en fase libre, disuelta y residual, lo que ratificó identificar las zonas con mayor concentración de los derivados de hidrocarburos y tomar muestras inalteradas para análisis en suelos y agua subterránea. La Figura 16a muestra un perfil de la concentración relativa del grupo del benceno, tolueno, etil-benceno y xileno (BTEX) en uno de los sitios, junto con el perfil de concentración de metano, producto de la degradación de los hidrocarburos; también se puede observar los estratos de mayor movilidad de estos compuestos.

Existen variaciones del nivel freático hasta de 5 m asociados a la precipitación en la zona de recarga en la Sierra de la Cruces, dando lugar a una zona de ‘embarramiento’ lo que genera la redistribución de los contaminantes en el subsuelo, en particular del ascenso y descenso de los hidrocarburos en fase libre.

Para determinar la presencia, distribución y comportamiento de la contaminación por MTBE en suelo (seis sitios) y agua subterránea (48 muestras en 18 sitios) entre la superficie y diez metros de profundidad aplicando el método analítico EPA 8260B. Se identificó la presencia de MTBE en el 80 % de la superficie de la ex-refinería, con concentraciones máximas de 205 en suelo y 165 mg/L en agua. El MTBE se midió hasta los 9 metros en agua en concentraciones elevadas (125 mg/L), lo que indica que puede encontrarse incluso a mayores profundidades, poniendo en riesgo el agua subterránea del acuífero granular de la Ciudad de México, subyacente. La Figura 16b muestra la concentración de MTBE en agua subterránea a 6 m de profundidad condicionado por la presencia de microfracturas y raíces en la secuencia lacustre y la presencia de lentes de arena.

Existe una dirección preferencial del flujo de agua subterránea hacia el noreste, con una velocidad lineal promedio de 7.5 m/año durante algunos meses, con un transporte por advección de los derivados de hidrocarburos, y difusión molecular desde los bloques del acuitardo hacia las fracturas y lentes de arena.

Se estimó que se necesitan más de 60 años posteriores a un derrame para alcanzar concentraciones por debajo del límite que sugiere la

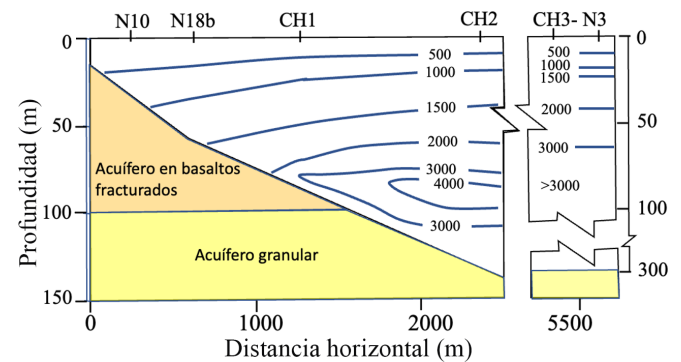


Figura 14. Concentración de cloruro (mg/L) disuelto en el agua de poro del acuitardo lacustre a lo largo de una sección que pasa por los sitios instrumentados (Figura 6c). Estas concentraciones que alcanzaron un equilibrio por miles de años se están desplazando hacia el acuífero subyacente por inversión de los gradientes hidráulicos en el acuitardo generados por el bombeo en el acuífero. El proceso de fracturamiento en el acuitardo, por falla hidrodinámica, favorecería esta migración. Modificado de Ortega *et al.* (1997).

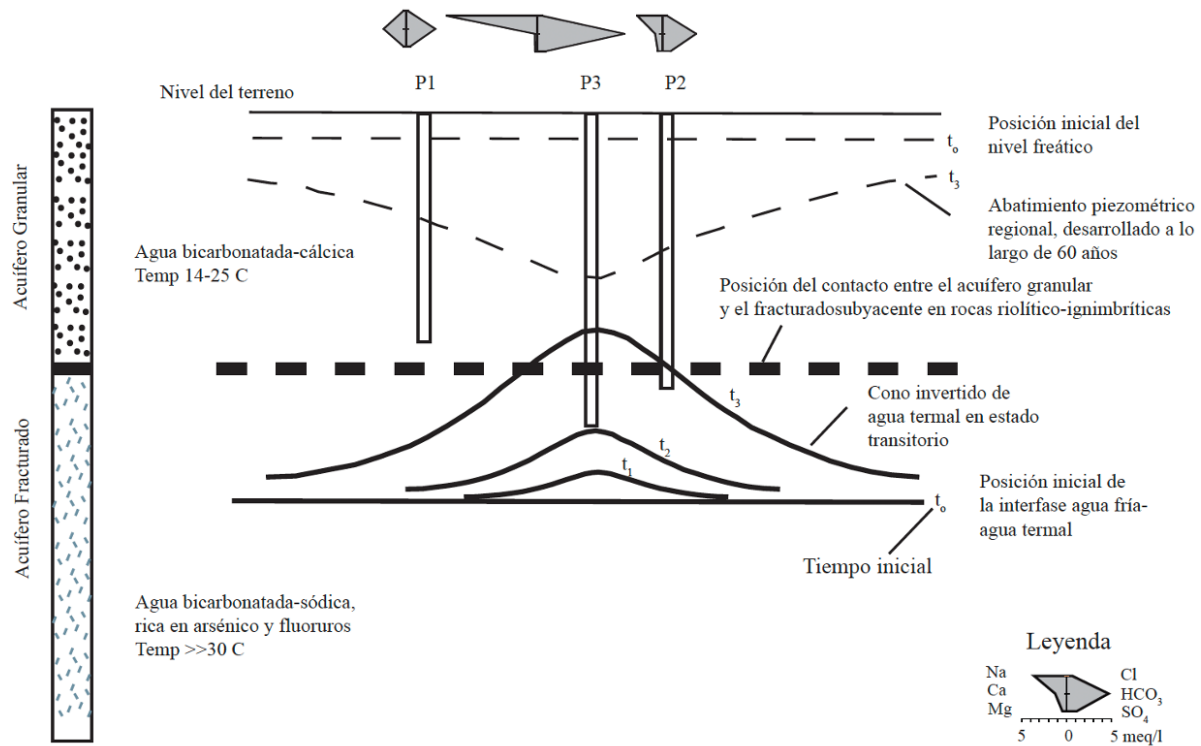


Figura 15. Modelo conceptual del ascenso progresivo de un frente termal de agua subterránea rica en arsénico y fluoruro hacia el acuífero granular a medida que se reduce la columna de agua en el acuífero en explotación. (Modificado de Ortega-Guerrero, 2009).

Agencia Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) de 0.04 mg/L (Delgado, 2017).

Las características del fracturamiento y heterogeneidades de la secuencia lacustre es consistente con la migración de solutos naturales, isótopos radiactivos (tritio-helio) y contaminantes en canales de aguas residuales como los del Ex Lago de Chalco, descritos en una sección anterior.

Transporte de calor

La existencia de diferentes provincias geotérmicas en el país (Prol-Ledesma y Morán- Centeno, 2019) y las evidencias regionales de agua subterránea termal, como el caso de la Cuenca de la

Independencia (Ortega-Guerrero, 2002, 2009), sugieren la importancia de considerar: 1) el transporte de calor, 2) el efecto de la temperatura en la densidad y viscosidad del fluido y sus efectos en los SGFAS, y 3) los efectos termodinámicos en la solubilidad y el transporte de solutos –descritos en secciones previas–. En el siguiente ejemplo se muestra la importancia del transporte de calor en la Cuenca de la Independencia en Guanajuato (Figura 4a y 4b) (Ortega-Guerrero, 2022).

La convección isotérmica en la Cuenca de la Independencia en las condiciones hidrológicas existentes, antes del bombeo, se describió en una sección anterior de este documento. La convección térmica forzada –donde la densidad varía en función de la temperatura– y libre –

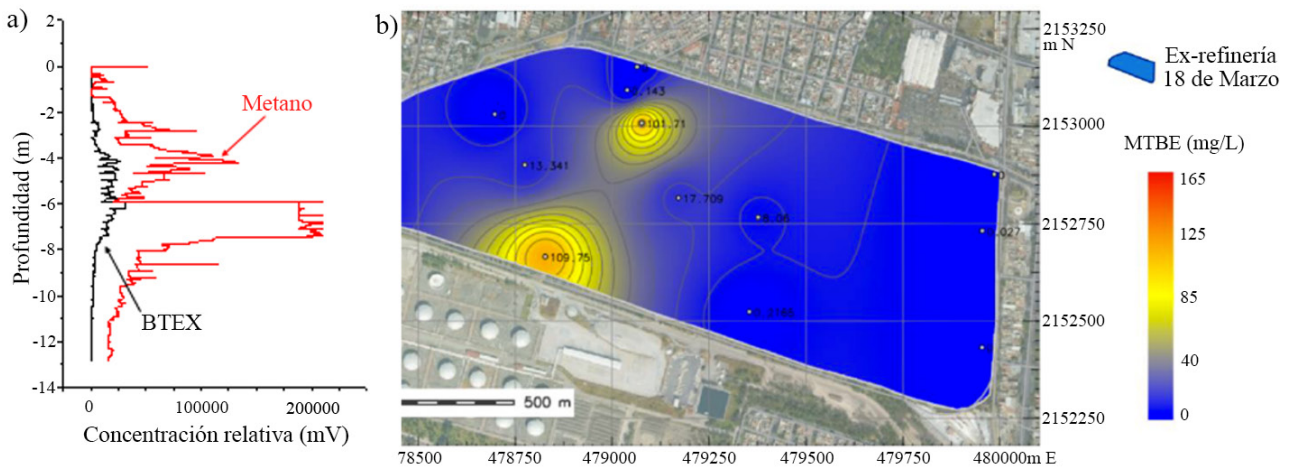


Figura 16 a) Perfil de la distribución de BTEX y Metano con el sistema Geoprobe® hasta una profundidad de 13 m. b) Distribución de MTBE en agua subterránea a 6 m de profundidad (Modificada de Delgado, 2017).

densidad y viscosidad son función de la temperatura— para condiciones naturales de flujo en esta cuenca se describen a continuación.

Se estudiaron los efectos acoplados de la topografía del flujo de agua subterránea y el transporte de calor en un medio geológico homogéneo y anisótropo simplificado a escala de la cuenca; las condiciones de frontera para flujo y transporte de calor se presentan en la Figura 5a, mientras que los detalles del modelo conceptual utilizado y consideraciones basadas en la literatura científica son discutidas por Ortega-Guerrero (2022).

Los análisis numéricos indican que el agua subterránea en la Cuenca de la Independencia está controlada por un sistema de flujo gravitatorio con transporte de calor por convección térmica libre impulsado por flotabilidad, que reproduce satisfactoriamente las condiciones hidrogeológicas previas a la deforestación, el desarrollo de kilómetros de conductos mineros en las montañas, el drenaje del lago y bombeo, como la posición del nivel freático, y evidencia de descarga del sistema de flujo que incluye anomalías de vegetación, suelos salinos y aguas termales (Figuras 5a y 17).

El flujo tridimensional del agua subterránea en la cuenca condicionado por la topografía distorsiona la distribución inicial de isotermas (campo convectivo) provocando que el gradiente geotérmico aumente a mayor profundidad en el área de recarga, pero disminuya a mayor profundidad en el área de descarga cerca del río La Laja. Zonas fluviales y de descarga representadas por los antiguos lagos.

Los resultados muestran la importancia de considerar la temperatura del agua subterránea, su respuesta transitoria en la evolución de la extracción de agua subterránea y la migración ascendente de un frente térmico a través del acuífero fracturado que ha aumentado los riesgos para la salud, el ambiente y la sustentabilidad. (Ortega-Guerrero, 2022).

Son numerosos factores adicionales que se consideraron en el análisis, relacionados y que controlan el flujo de agua subterránea, todos ellos consistentes con estudios en otras regiones en el mundo: 1) la configuración del nivel freático, 2) los efectos de la temperatura en la densidad y viscosidad del fluido en medios anisotrópicos heterogéneos, 3) el efecto de los contrastes de conductividad hidráulica y los límites de temperatura, 4) el campo de flujo tridimensional con las variaciones y la distribución del área del calor afectado por el relieve en el nivel freático y las variaciones de permeabilidad, 5) la transferencia de calor por advección, 6) distribuciones de temperatura para sistemas de paleo-flujo, 7) el modelado del calor como un indicador de agua subterránea y de la escala regional de flujo, y 8) la importancia de la asimetría de la cuenca y las evaluaciones geotérmicas, entre otros más.

El análisis del modelo demuestra claramente las principales características del sistema de flujo, el transporte de calor y las condiciones de frontera que deben tenerse en cuenta en cualquier modelo realista de la respuesta a largo plazo del acuífero al bombeo.

La convección térmica forzada y libre, en condiciones transitorias con la evolución del bombeo, considerando la influencia de las rocas fracturadas en el transporte de As, F y otros elementos se encuentra en proceso.

CONCLUSIONES

El flujo de agua subterránea, y el transporte de solutos y contaminantes, fue evaluado en diferentes medios geológicos fracturados a diferentes escalas, como parte de una serie de investigaciones desde los inicios del Centro de Geociencias. Estas investigaciones involucran diferentes aspectos, entre los que se encuentran los Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea y su interacción hidrogeoquímica con rocas por las que circula en espacio y tiempo.

Hubo enfoques particulares en la interacción del acuitardo lacustre que cubre el acuífero granular principal que abastece a la ZMCM, donde se realizaron diferentes investigaciones, con la instrumentación detallada por más de 200 piezómetros individuales y análisis numérico acoplado de parámetros de flujo y mecánicos variables en el tiempo, durante la consolidación del acuitardo asociada al bombeo en el acuífero. La generación de fracturas de grandes dimensiones en la superficie lacustre requirió del desarrollo y aplicación de ecuaciones acopladas de flujo y geomecánicas en el análisis de generación de fracturas en el acuitardo lacustre y que siguen aumentando.

Los medios fracturados permiten la circulación de agua subterránea y la interacción química con diferentes tipos de roca, dando lugar a la formación de minerales nuevos, como la erionita, que desafortunadamente es motivo de desarrollo de cáncer de pleura y pulmón en una comunidad rural. Los medios fracturados sustentan de manera importante los bosques del semiárido y tropicales secos de México. Evidencia que soporta el fracturamiento artificial de suelos para su conservación y favorecer la infiltración de agua de lluvia, y de esta manera reducir la extracción en acuíferos del centro y norte de México.

Los medios fracturados controlan, también, la migración de solutos naturales disueltos en el agua subterránea como los Elementos de Tierras Raras, consistente con los SGFAS; pero también de elementos nocivos a la salud y al ambiente como el arsénico y el fluoruro de origen geogénico pero inducidos hacia zonas de las cuencas donde se lleva a cabo un minado del agua subterránea, representando un riesgo a la salud y al ambiente; violando derechos humanos fundamentales y principios constitucionales.

Los acuitardos, que representaban originalmente una función de protección a los acuíferos, están sujetos a la inversión de gradientes hidráulicos y fracturamiento progresivo, dando lugar a la migración de elementos que se concentraron en tiempo geológico y que ahora

Temperatura

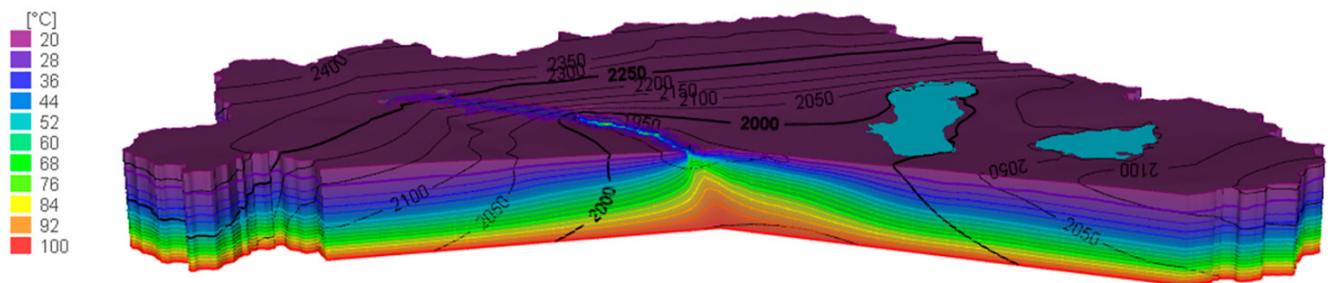


Figura 17. Distribución de cargas hidráulicas y temperatura en el caso de interacción del sistema gravitacional de flujo y la convección libre (densidad y viscosidad dependientes de la temperatura). (Modificado de Ortega-Guerrero, 2022).

migran hacia los acuíferos inmediatos; pero también a la migración de diferentes tipos de contaminantes que se disponen en su superficie y de otros por derrames accidentales de gran proporción, donde el espesor del acuitardo es menor al menos a 50 m.

El tema de transporte de calor en medios fracturados y su interacción con medios granulares, debe incorporarse al análisis de flujo y transporte, ya que la densidad y viscosidad del agua dependen de la temperatura, en especial para que la aplicación de modelos matemáticos sea más realista; la migración de agua termal rica en arsénico, fluoruro y otros elementos químicos que provienen de medios fracturados, está invadiendo zonas del acuífero granular sobreyacentes, poniendo en un mayor riesgo el abastecimiento de agua en cantidad y calidad, lo que puede ser irreversible a escala humana, además de los efectos a la salud, al ambiente, a la sustentabilidad y desarrollo regionales.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la colaboración de diferentes colegas, alumnos de licenciatura y posgrado en el desarrollo de los diferentes proyectos de investigación, algunos que aquí se presentan y que fueron plasmados en tesis y artículos científicos. El financiamiento de los proyectos fue en su mayoría a través de convenios de colaboración entre el CGEO-UNAM e instituciones de gobierno y privadas –donde el autor ha sido responsable científico en todos ellos–, solo dos con financiamiento de CONACYT y PAPITT-UNAM. Se extiende el agradecimiento a diversas asociaciones civiles y a ciudadanos que han sido parte fundamental de estas investigaciones. En particular, se aprecia a revisores anónimos y al Dr. Eric Morales Casique por sus comentarios y sugerencias que permitieron mejorar el manuscrito. A Josefina Vallejo Barba y Roberto A. Ortega G., por su apoyo y entusiasmo permanente.

REFERENCIAS

- Aguilar-García, R., Ortega-Guerrero, M.A., 2017, Análisis de la dinámica del agua en la zona no saturada en un suelo sujeto a prácticas de conservación: implicaciones en la gestión de acuíferos y adaptación al cambio climático: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34(2), 91-104.
- Aguilar-Pérez, P.L.A., Ortega-Guerrero, M.A., Lugo-Hubp, L.J., Ortiz-Zamora D.C., 2006, Análisis numérico acoplado de los desplazamientos verticales y generación de fracturas por extracción de agua subterránea en las proximidades de la Ciudad de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(3), 247-261.
- Aguilar-Muñoz A.U., Valdés-Perezgasga, F., García-Vargas, G.G., 2013, Seasonal effects in arsenic levels in drinking water in the Lagunera region: *Journal of Physics: Conference Series* 421 (2013) 012017, doi:10.1088/1742-6596/421/1/012017.
- Aranda-Gómez, J.J., McDowell, F.W., 1998, Paleogene extension in the southern Basin and Range Province of Mexico: Syn-depositional tilting of the Eocene red beds and Oligocene volcanic rocks in the Guanajuato mining district: *International Geology Review*, 40, 116-134.
- Berkowitz, B., 2002, Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review, *Advances in Water Resources*, 25(8-12), 861-884. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0309170802000428>.
- Berre, I., Doster, F., Keilegavlen, E., 2019, Flow in Fractured Porous Media: A Review of Conceptual Models and Discretization Approaches, *Transport in Porous Media*, 130, 215-236, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11242-018-1171-6>.
- Cervantes, M.M.A., 1996, Trito como indicador de los mecanismos de transporte al NE del acuitardo lacustre de Chalco, Méx.: Ciudad de México, México, Programa de Maestría en el Postgrado en Ingeniería Ambiental, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPFI), Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de maestría, 64 pp.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2018, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Principal-Región Lagunera (0523), Estado de Coahuila: Diario Oficial de la Federación, 4 de enero de 2018, 43 pp.
- Cook, P.G., 2003, A guide to regional groundwater flow in fractured rock aquifers: CSIRO Land and Water, Australia, 115 pp. <https://webarchive.nla.gov.au/awa/20091111233131/http://pandora.nla.gov.au/pan/103522/20091110-1348/lwa.gov.au/files/products/river-landscapes/px020312/px020312.pdf>.
- De la Fuente-Hernández, J., Aguilar-Díaz, F.C., Cintra-Viveiro, C.A., 2016, Fluorosis Dental y Factores Asociados en Estudiantes Residentes de Comunidades del Estado de Guanajuato: *Entreciencias, diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, vol. 4, disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=457647810005> (consultado en febrero 3, 2022).
- Delgado A.D., 2017, Concentración y distribución de MTBE en suelo y agua subterránea en un sitio contaminado de la Ciudad de México: Juriquilla, Qro. México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 102 pp.
- Domenico P.A., Schwartz F.W., 1998, *Physical and Chemical Hydrogeology*, 2nd edition: New York, John Wiley and Sons, Inc., 554 pp.
- Edmunds, W.M., Carrillo-Rivera, J. J., Cardona, A., 2002, Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City: *Journal of Hydrology*, 258(1-4), 1-24.
- Fariás, P., Estevez-García, J.A., Onofre-Pardo, E.N., Pérez-Humara, M.L., Rojas-Lima, E., Álamo-Hernández, U., Rocha-Amador, D.O., 2021, Fluoride Exposure through Different Drinking Water Sources in a Contaminated Basin in Guanajuato, Mexico: A Deterministic Human Health Risk Assessment: *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18, 11490, DOI:10.3390/ijerph182111490.
- Fitts, CR, 2013, *Groundwater Science*, 2nd edition: London, UK, Elsevier Academic Press, 698 pp.
- Freeze, A., Cherry, J.A., 1979, *Groundwater: USA*, Prentice-Hall, 604 pp.
- Graf, T., Therrien R., 2005, Variable-density groundwater flow and solute transport in porous media containing nonuniform discrete fractures: *Advances in Water Resources*, 28(12), 1351-1367.
- Johannesson, K.H., Stetzenbach, K.J., Hodge V.F., 1997, Rare Earth Elements as Geochemical Tracers of Regional Groundwater Mixing: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(17), 3605-3618.
- Koike, K., Kubo, T., Liub, C., Masoud, A., Amano, K., Kurihara, A., Matsuoka, T., Lanyong, L., 2015, 3D geostatistical modeling of fracture system in a granitic massif to characterize hydraulic properties and fracture distribution: *Tectonophysics* 660, 1-16, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2015.06.008> 0040-1951.
- Leal-Bautista, R.M., 1997, Migración de compuestos orgánicos en un sitio de canal de aguas residuales hacia el acuífero subyacente, Chalco, Méx.: Programa de Maestría en el Postgrado en Ingeniería Ambiental, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPFI), Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 104 pp.
- Loáiciga, H.A., Yeh, W.G., Ortega-Guerrero, M.A., 2006, Probability Density Functions in the Analysis of Hydraulic Conductivity Data: *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(5), 442-450, DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:5(442).
- Mackay, D.M., Cherry, J.A., 1989, Groundwater contamination: Limitations of pump-and-treat remediation: *Environment Science Technology*, 23, 630-636.
- Morales-Casique, E., Escolero, O.A., Arce, J.L., 2014, Resultados del pozo San Lorenzo Tezonco y sus implicaciones en el entendimiento de la hidrogeología regional de la cuenca de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31(1), 64-75, <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmcg/v31n1/v31n1a5.pdf>.
- Morales-Casique, E., Guinzberg-Belmont, J., Ortega-Guerrero, A., 2016, Regional groundwater flow and geochemical evolution in the Amacuzac River Basin, Mexico: *Hydrogeology Journal*, 24, 1873-1890, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-016-1423-x>.
- Neuman, S.P., 2005, Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks: *Hydrogeology Journal*, 13, 124-147. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-004-0397-2>.
- Nieto-Samaniego, A.F., Macías-Romo, C., Alaníz-Álvarez, S.A., 1996, Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte

- meridional de la Mesa Central, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13(1), 117-122.
- Orozco-Uribe, L.C., Ortega-Guerrero, M.A., Cantoral-Uriza, E.A., Domínguez-Cortázar, M.Á., Rodríguez Gutiérrez, E., 2021, Cambio de las manifestaciones de agua subterránea y características de los ecosistemas asociados en el semiárido mexicano: *Hidrobiológica*, 31(1), 1-15.
- Orozco-Uribe, L.C., Ortega-Guerrero, M.A., Mass, M., Paz, H., 2023, Dinámica hidrológica ecosistémica en un bosque tropical seco asociado a un medio fracturado: *Revista Bosque*, Aceptado para publicación.
- Ortega-Guerrero, A., Cherry, J.A., Aravena R., 1997, Origin of pore water and salinity in the lacustrine aquitard overlying the regional aquifer of Mexico City: *Journal of Hydrology*, 197, 47-69.
- Ortega-Guerrero M.A., 1993, Origin and migration of pore water and salinity in the consolidating Chalco aquitard, near Mexico City: Ontario Canada, University of Waterloo, PhD thesis, 294 pp.
- Ortega-Guerrero, A., 2003, Origin and geochemical evolution of groundwater in a closed-basin clayey aquitard, Northern Mexico: *Journal of Hydrology* 284(2003), 26-44.
- Ortega-Guerrero, M.A., 2004, Groundwater Flow system, subsidence, and solute transport controls in the lacustrine aquitard of Mexico City, en Carrillo, J., Ortega, A. (ed.), *Groundwater Flow Understanding, from local to regional scale: Selected Papers of Hydrogeology 12*, International Association of Hydrogeologists, 9-24.
- Ortega-Guerrero, M.A., 2009, Origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(1), 143-161.
- Ortega-Guerrero, M.A., 2011a, Situación del Agua Subterránea en México: Una Experiencia Científico-Legislativa y sus Implicaciones: *Revista Punto de Acuerdo*, Fundación Humanismo Político, 30-40.
- Ortega-Guerrero, M.A., 2011b, Evaluación del funcionamiento del agua subterránea y su relación con el ciclo hidrológico en la Cuenca del Arroyo Chamela y su salida al Océano Pacífico: Querétaro, Qro, México, Universidad Nacional autónoma de México, Informe Interno del Centro de Geociencias, 155 pp.
- Ortega-Guerrero M.A., 2017, Evaporative concentration of arsenic in groundwater: health and environmental implications, La Laguna Region, Mexico: *Environmental Geochemistry and Health*, 39(5), 987-1003, doi: 10.1007/s10653-016-9866-5, Epub 2016 Aug 18.
- Ortega-Guerrero, M.A., 2021, Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea: un paradigma: Ciudad de México, México, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología; Ciencias y Humanidades, 1, 13-16, disponible en <https://conacyt.mx/evento/presentacion-de-la-revista-ciencias-y-humanidades/>.
- Ortega Guerrero, M.A., 2022, Numerical Analysis of the Groundwater Flow System and Heat Transport for Sustainable Water Management in a Regional Semi-Arid Basin in Central Mexico: *Water*, 14, 1377, <https://doi.org/10.3390/w14091377>.
- Ortega-Guerrero M.A., Carrasco-Núñez G., 2014, Environmental occurrence, origin, physical and geochemical properties, and carcinogenic potential of erionite near San Miguel de Allende, Mexico: *Environmental Geochemistry and Health*, 36, 517-529, DOI 10.1007/s10653-013-9578-z.
- Ortega, A., Farvolden, R.N., 1989, Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the Basin of Mexico: *Journal of Hydrology*, 110, 271-294.
- Ortega-Guerrero, M.A., Cherry, J.A., Rudolph, D.L., 1993, Large-scale aquitard consolidation near Mexico City: *Ground Water*, 31(5), 708-718.
- Ortega-Guerrero, M.A., Rudolph, D.L., Cherry, J.A., 1999, Analysis of long term land subsidence near Mexico City: Field investigations and predictive modeling: *Water Resources Research*, 35, 3327-3341.
- Ortega-Guerrero, M.A., Castellanos, J.Z., Aguilar, G.R., Vázquez-Alarcón, A., Alanís, R.E., Vargas, C.C., Urrutia, E.F., 2002, A conceptual model for increases of sodium, sar, alkalinity and pH at the Independence aquifer in Guanajuato, Mexico: *Terra*, 20(2), 199-207.
- Ortega-Guerrero, M.A., Carrasco-Núñez, G., Barragán-Campos, H., Ortega, M.R., 2015, High incidence of lung and pleural cancer linked to erionite fiber exposure in a rural community near San Miguel de Allende, Mexico: *Epidemiological and environmental evidence, Occupational and Environmental Medicine*, 72, 216-218.
- Ortiz-Zamora, Z.D.C., Ortega-Guerrero, M.A., 2007, Origen y evolución de un nuevo lago en la planicie de Chalco: implicaciones de peligro por subsidencia e inundación de áreas urbanas en Valle de Chalco (Estado de México) y Tláhuac (Distrito Federal): *Investigaciones Geográficas*, 64, 26-42.
- Ortiz-Zamora, D.C., Ortega-Guerrero, M.A., 2010, Evolution of long-term land subsidence near Mexico City: Review, field investigations and predictive simulations: *Water Resources Research*, 46, W01513, DOI: 10.1029/2008WR007398.
- Ortiz-Zamora, D., 1996, Migración de contaminantes inorgánicos derivados de un canal de desechos urbanos e industriales hacia el acuífero subyacente, Chalco, Méx.: Ciudad de México, México. Programa de Maestría en el Postgrado en Ingeniería Ambiental, DEPEI, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 97 pp.
- Palmer, C.D., Cherry, J.A., 1984, Geochemical evolution of groundwater in sequences of sedimentary rocks: *Journal of Hydrology*, 75(1-4), 27-65.
- Pankow, J.F., Cherry, J.A., 1996, *Dense Chlorinated Solvents and Other DNAPLs in Groundwater: History, Behavior, and Remediation*: Ontario, Waterloo Press, 522 pp.
- Prol-Ledesma, R.M., Morán-Centeno, D., 2019, Heat flow and geothermal provinces in Mexico: *Geothermics*, 78, 183-200.
- Ramírez, E.G.W., 1995, Variación horaria de la carga hidráulica en el acuitardo lacustre de Chalco: Ciudad de México, México, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de licenciatura 60 pp.
- Salinas-Reyes, T., Ortega-Guerrero, M.A., 2019, Elementos de tierras raras disueltos en agua subterránea y su relación con los sistemas de flujo en rocas marinas y volcánicas en el Bajío de Guanajuato, Centro de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 36(1), 125-145.
- Singhal, B.B.S., Gupta, R.P., 2010, *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*, Second Edition: Dordrecht, Holanda, Springer, 415 pp., DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9208-6>.
- Tóth, J., 2009, *Gravitational systems of groundwater flow: theory, evaluation and utilization*: EE.UU., Cambridge University Press, 310 pp.
- Tóth J., 2016, The Evolutionary Concepts and Practical Utilization of the Tóthian Theory of Regional Groundwater Flow: *International Journal of Earth Environmental Sciences*, 1, 111, <http://dx.doi.org/10.15344/ijees/2016/111>.
- Vargas, C., Ortega-Guerrero, M.A., 2004, Fracture hydraulic conductivity in the Mexico City clayey aquitard: Field piezometer rising head tests: *Hydrogeology Journal*, 12(3), 336-344.
- López-Uriostegui, Z., 2007, Determinación de arsénico en aguas subterráneas de la Comarca Lagunera: Mazatlán, Sinaloa, México, Instituto Tecnológico de Mazatlán, tesis de licenciatura, 122 pp.
- Warren, C.J., Rudolph, D.L., 1997, Clay mineral in basin of Mexico lacustrine sediments and their influence on ion mobility in groundwater: *Journal of Contaminant Hydrology*, 27(3-4), 177-198, [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(96\)00100-3](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(96)00100-3).
- Zawadsky, A. 1997, Hydrogeologic investigation in a large-scale fracture in the Chalco Basin: Ontario, Canada, University of Waterloo, tesis de maestría, 206 pp.

Manuscrito recibido: agosto 19, 2023

Manuscrito corregido recibido: noviembre 30, 2023

Manuscrito aceptado: diciembre 1, 2023