

Factores geológicos e hidrogeológicos asociados a las fracturas en la cuenca del Valle de Toluca

Geological and hydrological features associated to fracturing in the Toluca Valley basin

Cecilia Rodríguez-Campero^{1,*}, Jaime Garfías¹, Richard Martel², Ignacio Navarro³

¹ Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México, Carretera Toluca-Ixtlahuaca, km 14.5, San Cayetano Morelos, 50120, Toluca, Edo. de México, México.

² Institut National de la Recherche Scientifique, Université du Québec, 490 rue de la Couronne, QC G1K 9A9, Québec, Canada.

³ Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Carretera a Cerro Prieto, km 8, Ejido Ex-Hacienda de Guadalupe, 67700, Linares, Nuevo León, México.

* Autor para correspondencia: (C. Rodríguez) cecilia.campero@outlook.com

Cómo citar este artículo:

Rodríguez-Campero, C., Garfías, J., Martel, R., Navarro, I., 2023, Factores geológicos e hidrogeológicos asociados a las fracturas en la cuenca del Valle de Toluca: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 75 (1), A251122. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2023v75n1a251122>

Manuscrito recibido: 13 de Enero de 2022.
Manuscrito corregido: 12 de Julio de 2022.
Manuscrito aceptado: 9 de Noviembre de 2022.

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

El bombeo excesivo de agua subterránea en el Valle de Toluca, México, ha derivado en subsidencia regional y manifestación de fracturas en los últimos 20 años. La exposición y crecimiento de tales discontinuidades provoca daños a la infraestructura y pérdidas económicas. En el presente estudio se analiza la configuración de la estructura geológica de la cuenca, los gradientes piezométricos desde 1975 y su posible influencia en la generación de fracturas. Se elaboró un modelo geológico tridimensional a partir de los registros de los pozos y secciones transversales existentes. Los datos estratigráficos fueron reinterpretados y clasificados para definir capas con características hidráulicas y mecánicas similares. Las cargas hidráulicas se simularon mediante un análisis geoestadístico para el periodo de 1975-2018. Los resultados de la piezometría reflejan los mayores gradientes negativos en zonas aledañas a las fracturas. El modelo geológico de 14 capas muestra un acuífero fracturado altamente irregular, principalmente en el área que subyace el centro de la ciudad de Toluca y la colonia San Pedro Totoltepec. La presencia de domos volcánicos, la existencia de materiales susceptibles a la consolidación, así como la ubicación de descensos piezométricos en zonas aledañas a las rupturas, se sugieren como los factores que controlan la localización y generación de fracturas. El modelo geológico obtenido en este estudio consistirá la base de futuros modelos de flujo subterráneo.

Palabras clave: Acuífero del Valle de Toluca, fracturas, flujo de agua subterránea, modelo geológico tridimensional.

ABSTRACT

Excessive groundwater pumping in the Toluca Valley, Mexico, has resulted in regional subsidence and manifestation of ground fissures in the last 20 years. Such discontinuities result in damage to infrastructure and economic losses. This study evaluates the geological structure of the basin, the distribution of piezometric gradients, and its influence on the generation of faults and fractures. A regional three-dimensional geological model was developed using driller's logs and published cross-sections. Stratigraphic data have been reinterpreted and classified to defined layers with similar hydraulic and mechanic characteristics. The hydraulic-head distributions were replicated through geostatistical analysis for the period 1975-2018. Piezometry results reflect the highest negative gradients in areas near fractures. The 14 layers geologic model show a highly irregular fractured aquifer specially under the Toluca city center and San Pedro Totoltepec location. The presence of volcanic domes, the existence of materials susceptible to consolidation, in addition to the location of piezometric descents in areas around the ruptures, are suggested as characteristic factors controlling the location and generation of faults and fractures. The geological model obtained in this study will be applied to support future groundwater flow modelling.

Keywords: Toluca aquifer, ground fissures, groundwater flow, tridimensional geologic model.

1. Introducción

El crecimiento demográfico acelerado del Valle de Toluca, evidente desde la década de los 60's, se ha atribuido a la cercanía con la Ciudad de México, así como al asentamiento de una de las zonas industriales más importantes del país (Sánchez y Orozco, 2015; GEM, 2019). Al margen de la expansión urbana y el aumento en la demanda hídrica, surgió la necesidad de explorar recursos hídricos subterráneos para suministrar agua a una población que anteriormente se abastecía de lagunas (Albores, 1995). Las necesidades de agua para fines domésticos, agrícolas e industriales del Valle de Toluca son cubiertas mediante 1,109 pozos de bombeo. Sumado a esto, se localizan 198 pozos pertenecientes al Sistema Lerma, cuyo fin es extraer agua para la Ciudad de México (Figura 1).

La rápida explotación de agua subterránea desde 1950 ha tenido efectos como la desecación de las lagunas Chignauapan, Tultepec y San

Bartolo (Esteller y Díaz, 2002; Esteller y Andreu, 2005; Rudolph *et al.*, 2006; Calderhead *et al.*, 2010a; Hancox *et al.*, 2010; Salas *et al.*, 2011), así como subsidencia regional con tasas de hasta 9 cm/año en zonas de depósitos aluviales y lacustres (Calderhead *et al.*, 2010a, 2010b, 2011, 2012; Castellazzi *et al.*, 2017). De manera complementaria, se han manifestado fracturas en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), afectando edificios, tuberías y vías de comunicación (Murillo, 2008; CICEM, 2008a; CICEM, 2008b; Castellazzi *et al.*, 2017). A fin de analizar tales discontinuidades, se han realizado estudios enfocados a la cartografía y medición por técnicas InSAR (Figueroa, 2004; Almazán, 2017; Castellazzi *et al.*, 2017; López, 2019). Por su parte, el gobierno del estado reporta las fracturas en los Atlas de Riesgos, y coloca carteles en las áreas afectadas a modo de prevención. No obstante, la profundización en el mecanismo que genera tales discontinuidades en el Valle de Toluca continúa siendo un área de investigación en desarrollo.

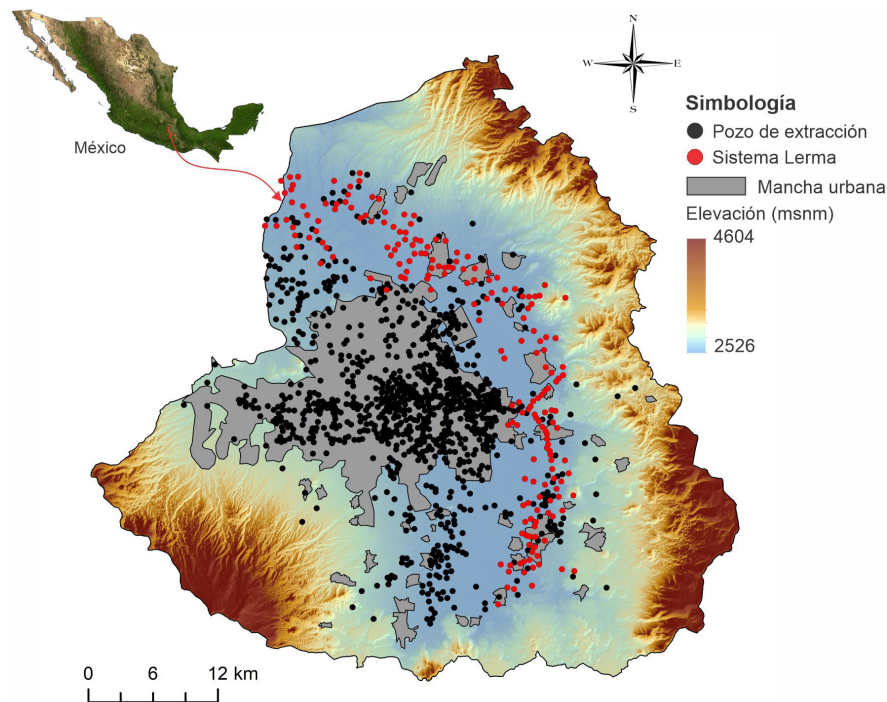


Figura 1 Mapa de localización geográfica de la cuenca del Valle de Toluca, pozos de extracción de agua para consumo del Valle de Toluca y pozos pertenecientes al Sistema Lerma.

Diversos estudios apuntan a la disminución de niveles piezométricos, generación de conos de abatimiento y presencia de estratos rígidos con montículos enterrados como promotores de la compactación diferencial, fracturas y reactivación de fallas (Pacheco *et al.*, 2006; Gambolati y Teatini, 2015; Ochoa *et al.*, 2015; Carreón *et al.*, 2016; Frigo *et al.*, 2019; Howard y Zhou, 2019; Schuck *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2022). A este respecto, las fallas son planos de rotura en macizos rocosos con movimiento relativo entre los bloques asociadas a procesos tectónicos (González *et al.*, 2002). En comparación, las fracturas consisten en grietas de tensión asociadas a una compactación diferencial que genera componentes en el plano vertical y horizontal (Burbey, 2002, Conway, 2016). De acuerdo con tales definiciones, resulta adecuado caracterizar a las discontinuidades del Valle de Toluca como fracturas.

Este estudio se propuso con el objetivo de evaluar la configuración geológica/geométrica de la cuenca del Valle de Toluca, la evolución piezométrica y su posible relación con la ubicación de fracturas de la ZMVT. En ese marco de investigación, se plantea una revisión y reinterpretación del modelo geológico vigente (Calderhead *et al.*, 2011) con base en nueva información de pozos. Se analizaron las configuraciones y gradientes piezométricos por métodos geoestadísticos durante el periodo de 1975 a 2018. Este estudio constituye el primer acercamiento en la modelación de desplazamientos tridimensionales en el acuífero del Valle de Toluca.

2. Contexto geológico e hidrogeológico

La cuenca del Valle de Toluca con una extensión aproximada de 2,100 km², se localiza al centro de México, en el marco de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). Está delimitada al este por la Sierra de las Cruces (3,000 msnm), y al oeste por el volcán Nevado de Toluca (4,560 msnm) (Figura 3). Los materiales geológicos se agrupan en tres clases: rocas ígneas, materiales piroclásti-

cos y depósitos sedimentarios (Figura 2). Las rocas ígneas se constituyen principalmente por andesitas y basaltos conformando el Nevado de Toluca, La Sierra de las Cruces, así como una serie de domos y conos cineríticos localizados en el oeste del valle. Le sobreyacen materiales piroclásticos representados por lahares, bloques, cenizas, flujos de pómez, tobas y brechas volcánicas que afloran al pie de las sierras, que corresponden a la formación Tarango (Macías *et al.*, 1997). Los depósitos aluviales y lacustres que rellenan la cuenca, se interdigitan con materiales volcánicos.

En el ámbito estructural la zona está afectada por sistemas de fallas regionales que atraviesan las estructuras volcánicas mayores. El sistema de fallas San Antonio (SFSA) se localiza entre los volcanes San Antonio y Nevado de Toluca con una orientación general NE-SW. Al sur, el sistema de fallas Tenango (SFT) exhibe una orientación E-W y se caracteriza por fallas curvas y discontinuas, ruptura y formación de zonas de transferencia (García *et al.*, 2000). En el margen este, el sistema de fallas de la Sierra las Cruces presenta tres orientaciones principales N-S, NE-SW y E-W (García *et al.*, 2008).

En la ZMVT se han registrado fracturas en zonas circundantes al cerro La Teresona y las colonias Santa María Totoltepec y San Pedro Totoltepec (Figueroa, 2004; Murillo, 2008; GEM, 2013; Arroyo, 2016; Almazán, 2017; Castellazzi *et al.*, 2017; GEM, 2019; López, 2019). Se distinguen las fracturas Miltepec (NE-SW), fracturas Coatepec (N-S), fracturas El Calvario (NE-SW y NW-SE). Se destaca la fractura Totoltepec con dirección NE-SW, que presenta un desplazamiento horizontal de 80 cm y vertical de hasta 1.40 m (Figura 3).

La organización hidrogeológica se asocia a un sistema multicapa complejo, constituido por dos acuíferos separados por un acuitardo. La unidad acuífera superior de tipo libre se caracteriza por ser un medio poroso compuesto por depósitos clásticos no consolidados e intercalados con flujos piroclásticos y horizontes de pómez. Esta unidad engloba a las formaciones Chalma, Tarango, así como los flujos andesíticos/basálticos y los depósitos aluviales (Figura 2b), alcanzando un espesor aproximado

de 200 m (CONAGUA, 2002; Cervantes y Armienta, 2004; Calderhead *et al.*, 2010a; 2010b). En el acuitardo intermedio se engloban tobas lacustres de baja permeabilidad y arcillas lacustres. El acuífero inferior corresponde a un medio fracturado de tipo semiconfinado, compuesto fundamentalmente por andesitas y basaltos.

La Sierra de las Cruces representa la principal área de recarga debido al alto grado de fracturamiento por enfriamiento de las rocas aflorantes de la cima (Birkle *et al.*, 1998). Asimismo, este flujo se integra con el proveniente del Nevado de Toluca para, a su vez, continuar con una dirección S-N similar al cauce del río Lerma hacia la cuenca de Ixtlahuaca/Atacomulco.

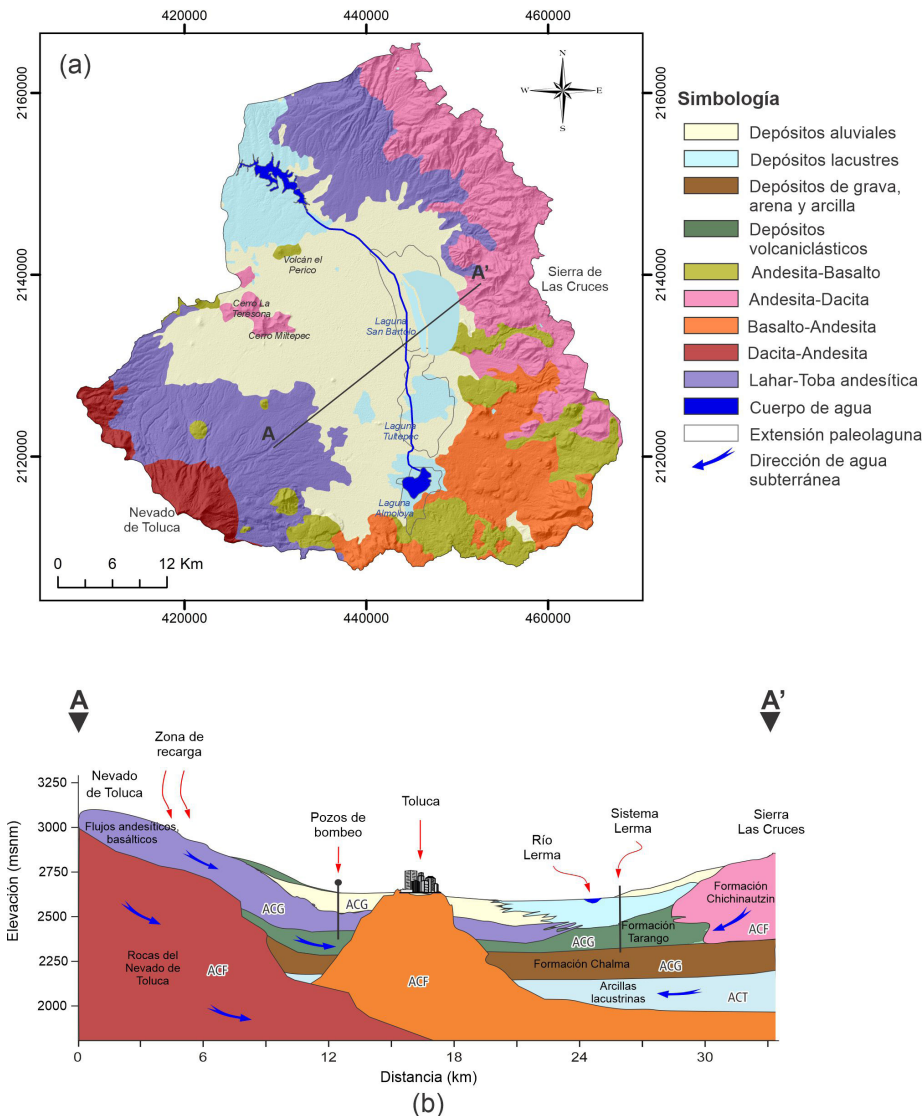


Figura 2 Geología regional, a) Tipos de roca/sedimento del sistema acuífero del Valle de Toluca, b) Esquema simplificado de las unidades geológicas correspondientes a la sección transversal A-A'. Se muestran las litologías pertenecientes al acuífero fracturado (ACF), acuífero granular (ACG) y acuitardo (ACT). Modificado de Calderhead *et al.*, 2011.



Figura 3 Distribución de fracturas observadas por Figueroa (2004), GEM (2013) y GEM (2019) en el área metropolitana de la ciudad de Toluca. Se muestran fotografías de evidencia de movimientos diferenciales: A) Desplazamiento vertical, B) Fractura de casa-habitación por desplazamiento vertical y horizontal, C) Zapatas de casa-habitación expuestas por subsidencia.

Tabla 1. Síntesis de las fuentes de información utilizadas en el análisis geológico-hidrogeológico.

Parámetro	Fuente	Observación
Elevación	Nasa	jaxa/meti a los palsar rtc 2007. accessed through asf daac 21 january 2021 jaxa/meti a los palsar rtc 2010. accessed through asf daac 21 january 2021
Geología	Servicio Geológico de México	Geología superficial de México, escala 1:250,000
Columnas litológicas	Unitecnia, 1996	43 multipiezómetros 104 pozos del sistema Lerma 47 pozos adicionales 13 sondeos de penetración estándar
Cargas hidráulicas	Unitecnia, 1996	Profundidad del nivel estático
Fracturas	Figuroa, 2004 García <i>et al.</i> , 2008 Almazán, 2017 Castellazzi <i>et al.</i> , 2017 GEM, 2019 López, 2019	

3. Materiales y métodos

3.1. INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA

Los datos utilizados en este trabajo comprenden un análisis de la geología superficial y modelos de elevación digital recopilados de fuentes gubernamentales de acceso libre. En tanto que, la estratigrafía y piezometría histórica se obtuvieron de estudios previamente realizados en el acuífero de Toluca (Tabla 1). De igual modo, se integra información reciente de niveles estáticos proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2018).

3.2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL MEDIO GEOLÓGICO MEDIANTE MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL

3.2.1. CLASIFICACIÓN DE MATERIALES GEOLÓGICOS

En el Valle de Toluca, las fracturas se han atribuido a la excesiva extracción de agua y a la variación en la compresibilidad del medio poroso entre macizos rocosos y materiales no consolidados

(CICEM, 2008a). Para su análisis, resulta necesaria una agrupación de materiales con características hidrogeológicas y propiedades de deformación del medio poroso similares. Los lineamientos utilizados para la agrupación de litologías son: (1) Procedencia del material: origen volcánico o sedimentario, (2) Tamaño de grano de materiales sedimentarios: granos gruesos y finos, y (3) Contenido de arcilla. Se evaluaron 260 columnas litológicas correspondientes a sondeos profundos, sondeos de penetración estándar y pozos a cielo abierto.

3.2.2. INTERPOLACIÓN DE HORIZONTES

En ausencia de fallas, pliegues u otras estructuras complejas en el Valle de Toluca, resultan útiles los métodos numéricos explícitos cuyo objetivo es establecer la elevación de contactos geológicos en una determinada ubicación (Wellmam y Caumon, 2018). A este respecto, se aplicó la interpolación por distancia inversa ponderada (Ecuación 1). En el método se establecen pesos de ponderación con base en la distancia entre el punto de valor cono-

cido y el punto de estimación, asumiendo que los puntos cercanos guardan mayor relación.

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f_i \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde n es el número de puntos usados, f_i es el valor de la variable en el punto analizado y w_i es

el peso ponderado asignado a cada punto. Para su aplicación se asignaron números de identificación de contacto litológico a cada columna con base en la elevación topográfica de cada unidad y la concordancia con estratos adyacentes. En las zonas carentes de perfiles litológicos se añadieron 8 “Dummy points”, los cuales consisten en pozos hipotéticos y cuyo fin es facilitar la interpolación

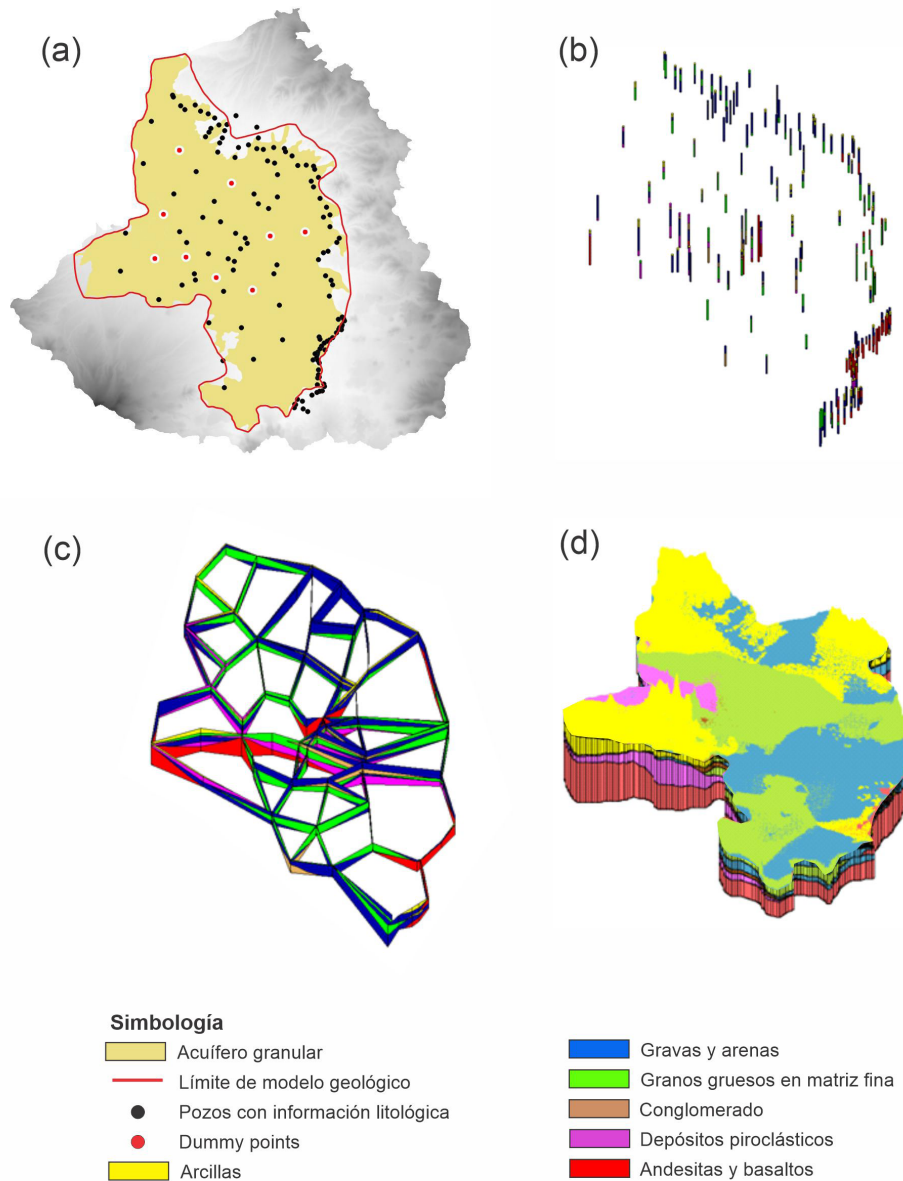


Figura 4 Secuencia en la elaboración del modelo litológico tridimensional. a) Delimitación espacial y pozos utilizados para la interpolación. b) Registros de pozos reclasificados. c) Secciones transversales. d) Modelo litológico compuesto por 6 tipos de material y 14 capas. Exageración vertical 15x.

de estratos (Pawłowsky *et al.*, 1993). La estratigrafía de los Dummy points se basa en la reportada en pozos cercanos. Se elaboraron 116 secciones transversales para establecer una condición inicial de geometría en la interpolación 3d.

El dominio del modelo se estableció con base en la geología del Valle de Toluca, tomando como referencia el contacto entre el acuífero granular y el acuífero fracturado (Figura 4a). Lo anterior se basa en el hecho que la unidad granular es donde reside la mayor cantidad de pozos de extracción, asimismo, en la región montañosa no se cuentan con información suficiente de estratigrafía, piezometría y propiedades hidráulicas.

3.2.3. ASIGNACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

En la asignación de la conductividad hidráulica de arcillas y gravas, se retomaron valores obtenidos por métodos de tamaño de grano, pruebas de bombeo, pruebas de recuperación (slug test) y ensayos de permeabilidad Lefranc, cuya información fue sintetizada en diversos estudios desarrollados en el Valle de Toluca. Asimismo, se contemplaron valores propuestos en la literatura para suelos y depósitos volcánicos (Juárez y Rodríguez, 2005; Baumann *et al.*, 2019), así como los propuestos por Calderhead *et al.* (2011).

3.3. GEOESTADÍSTICA APLICADA A LA EVOLUCIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO

El nivel de agua subterránea es considerado una variable regionalizada, siendo los métodos geoestadísticos los más utilizados para su interpolación (Kitanidis, 1997; Chilès y Delfiner, 1999; Desbarats *et al.*, 2002; Peterson y Barnett, 2004; Lu *et al.*, 2009; Nikroo *et al.*, 2010). La ventaja de la implementación de tal enfoque, en general, es el análisis de la continuidad espacial de la variable utilizando funciones teóricas que parten del variograma (Ecuación 2).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(xi) - Z(xi + h)]^2 \tag{Ecuación 2}$$

donde: *n* es el número de pares experimentales separados por un vector *h*, $Z(xi)$ es el valor de la variable de interés en el punto *xi* con $i=1 \dots n$. Se utilizaron los niveles estáticos medidos en 42 multipiezómetros a una profundidad de sonda de 150 m durante el periodo de 1975 a 2018 (CONAGUA, 2018). Las técnicas de exploración de datos aplicadas comprenden histogramas de frecuencia y variogramas direccionales a 0°, 45°, 90° y 135°, cuyo fin es determinar tendencias de anisotropía.

Las elevaciones de nivel estático fueron simuladas aplicando varios variogramas teóricos, cuyos resultados se evaluaron por validación cruzada con el método Leave one out. En esta validación, se omite cada uno de los datos del set y su valor se estima por kriging ordinario puntual haciendo uso de la función teórica propuesta (Oliver y Webster, 2014). La selección del modelo teórico se basó en los resultados de los índices de ajuste (Ecuación 3) que, por lo general, evalúan qué tanto se subestima o sobreestiman los datos. Los índices utilizados son el error medio (*ME*), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RMSE*) y la tasa de desviación media cuadrada (*MSDR*), cuyos valores esperados son *ME*= 0, *RMSE*= 0, *MSDR*= 1.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n}$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right)^{1/2}$$

$$MSDR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{\sigma_k^2(P_i)}$$

(Ecuación 3)

donde, n es el número de datos, P_i es el valor simulado, O_i es el valor observado y σ^2 es la varianza de kriging. Una vez establecida la función matemática con los menores errores, se realizó la interpolación de nivel por kriging ordinario (Ecuación 4) a través del software Surfer v. 13 (Golden Software Inc., 2015).

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i),$$

(Ecuación 4)

donde \hat{z} es el valor estimado de la variable en el punto de interés x_0 , z es el valor observado en el punto medido x_i , λ_i es el peso correspondiente al punto x_i , y n es el número de datos usados para la interpolación.

3.4. INTERPRETACIÓN DE FRACTURAS EN EL CONTEXTO GEOLÓGICO Y PIEZOMÉTRICO

La construcción de secciones transversales en las zonas de principales fracturas permitió delimitar la geología subsuperficial y, por ende, evaluar la configuración de las rocas y los estratos sedimentarios. La integración del modelo geológico tridimensional, evolución piezométrica y ubicación de conos de abatimiento por extracción de agua permite formular una conceptualización del mecanismo que genera las fracturas.

4. Resultados y discusión

4.1. MODELO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL

Debido a que los macizos rocosos se encuentran mayormente a grandes profundidades, las variaciones piezométricas son pocas significativas. Se agruparon los basaltos, andesitas y riolitas en el grupo de rocas volcánicas. La clasificación de depósitos piroclásticos parte de su baja densidad y alta porosidad, que, a su vez, se caracteriza por lahares, bloques, cenizas, flujos de pómez, tobas blandas poco cementadas y brechas volcánicas. En el caso de los suelos, la categorización considera el tamaño de grano como punto de partida, distin-

guiéndose gravas, arenas, limos y arcillas. Las gravas y arenas se agruparon en una sola clase. Los estratos con contenido de finos, de acuerdo con la clasificación SUCS (Unified Soil Classification System) reportada en los perfiles estratigráficos se dividieron en granos gruesos embebidos en matriz fina y arcillas puras. De esta manera, es posible establecer una diferencia en el grado de consolidación de los estratos y potencial factor de subsidencia diferencial. Los 6 tipos de materiales aplicados a la reclasificación de todos los pozos son 1) Arcillas, 2) Gravas y arenas, 3) Granos gruesos en matriz fina, 4) Conglomerado, 5) Depósitos piroclásticos, 6) Sólidos volcánicos (Figura 4b).

La interpolación de estratos partió de las secciones transversales construidas (Figura 4c), obteniendo un modelo geológico (Figura 4d) conformado por 14 capas (Tabla 2). De manera general, se identifica un estrato de rocas volcánicas como basaltos y andesitas, sobreyacidos por depósitos piroclásticos. Sobre esta secuencia, se identifican conglomerados, gravas y arenas, conforme la distancia a la superficie es menor, la granulometría disminuye alcanzando lechos arcillosos. Se identifican dos domos volcánicos que subyacen al centro de la ciudad de Toluca y a la colonia de San Pedro Totoltepec respectivamente. Este último coincide con la zona estable ante subsidencia caracterizada por Arroyo (2016) y denominada Punto de Control en el estudio de subsidencia vertical realizado por Calderhead *et al.* (2010a).

4.2. EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA

4.2.1. AJUSTE DEL VARIOGRAMA TEÓRICO

Debido a los diferenciales topográficos de hasta 200 metros en la cuenca, en los histogramas de frecuencia se identificaron mediciones de 2,750 – 2,820 msnm que se alejan de la media (2,510 – 2,620 msnm) y, en consecuencia, aumentaban la desviación estándar del set. En tal sentido, los piezómetros de las serranías fueron descartados, y con las estaciones restantes, se elaboraron variogramas direccionales a 0°, 45°, 90° y 135° (siendo 0° la dirección horizontal y 90° la dirección vertical). Las mayores semivarianzas se presentaron

Tabla 2. Descripción de los materiales que conforman la estratigrafía del acuífero del Valle de Toluca en función de sus propiedades físicas e hidrodinámicas (Variación en profundidad). Valores tomados de la literatura (Juárez y Rodríguez, 2005; Guastaldi *et al.*, 2014; Baumann *et al.*, 2019).

Material	Clave	Descripción	Espesor promedio (m)	Rango de conductividad hidráulica K (m/s)
Capa 14	C 14	Arcillas	11.36	1.0E-11 - 1.0E-07
Capa 13	GS 13	Gravas y arenas	4.56	1.0E-04 - 1.0E-01
Capa 12	GF 12	Granos gruesos en matriz fina	8.96	1.0E-07 - 1.0E-04
Capa 11	FP 11	Flujos piroclásticos	5.68	1.0E-06 - 1.0E-02
Capa 10	AB 10	Andesitas y basaltos fracturados	0.90	8.0E-09 - 3.0E-04
Capa 9	C 9	Arcillas	0.92	1.0E-11 - 1.0E-07
Capa 8	GS 8	Gravas y arenas	33.04	1.0E-04 - 1.0E-01
Capa 7	CO 7	Conglomerado	11.61	1.0E-05 - 1.0E-03
Capa 6	GF 6	Granos gruesos en matriz fina	31.96	1.0E-07 - 1.0E-04
Capa 5	GS 5	Gravas y arenas	28.72	1.0E-04 - 1.0E-01
Capa 4	CO 4	Conglomerado	3.44	1.0E-05 - 1.0E-03
Capa 3	FP 3	Flujos piroclásticos	27.35	1.0E-06 - 1.0E-02
Capa 2	GS 2	Gravas y arenas	8.58	1.0E-04 - 1.0E-01
Capa 1	AB 1	Andesitas y basaltos fracturados	138.81	8.0E-09 - 3.0E-04

a 0° y 45°, mientras que, las configuraciones más estables se observaron a 90° y 135°, destacando la característica anisotrópica de la carga hidráulica, siendo los ejes principales de anisotropía determinados por la orientación del flujo de agua subterránea (Kitanidis, 1997). A este respecto, las funciones teóricas que se ajustaron mejor son las que incluyen un coeficiente de anisotropía comprendido entre 1.804 y 2 para un ángulo comprendido entre 118° y 135° (Tabla 3).

4.2.2. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EVOLUTIVO DEL NIVEL ESTÁTICO

Las superficies del nivel estático muestran un flujo del agua subterránea con dirección preferencial SE-NW, siendo las áreas de recarga la Sierra de la Cruces y el volcán Nevado de Toluca. De esta manera, las isopiezas de los años 1975 y 1984 indican un patrón regional del flujo subterráneo proveniente de las áreas de recarga hacia el cauce del río Lerma, que simula al enrutamiento de agua superficial (Figuras 5a y 5b). El análisis del año

1994 presenta un incipiente cono de abatimiento, así como la deformación de las líneas equipotenciales (Figura 5c). En las décadas posteriores, se observa una disminución de la distancia relativa entre isolíneas y, por lo general, un retroceso hacia las zonas altas, lo que sugiere un aumento del gradiente hidráulico en el centro de Toluca (Figura 5d, 5e y 5f). La existencia de un cono de abatimiento en el análisis del año 2015 denota una deformación local de las equipotenciales, comportamiento que incluso se mantiene en el año 2018.

Las estaciones con los residuales máximos y mínimos fueron analizadas para cada año de krigado. En general, de 1975 al 2004, las estimaciones más inexactas se localizan en las zonas altas cercanas al Nevado de Toluca y, por lo general, a la salida de la cuenca. En contraste, las mejores predicciones se obtuvieron en las áreas de planicie aledañas al cauce del río Lerma. En los últimos análisis, sin embargo, los mayores residuales se ubican en el corredor industrial (Figura 5e) y el centro de Toluca (Figura 5f). Esta configuración de

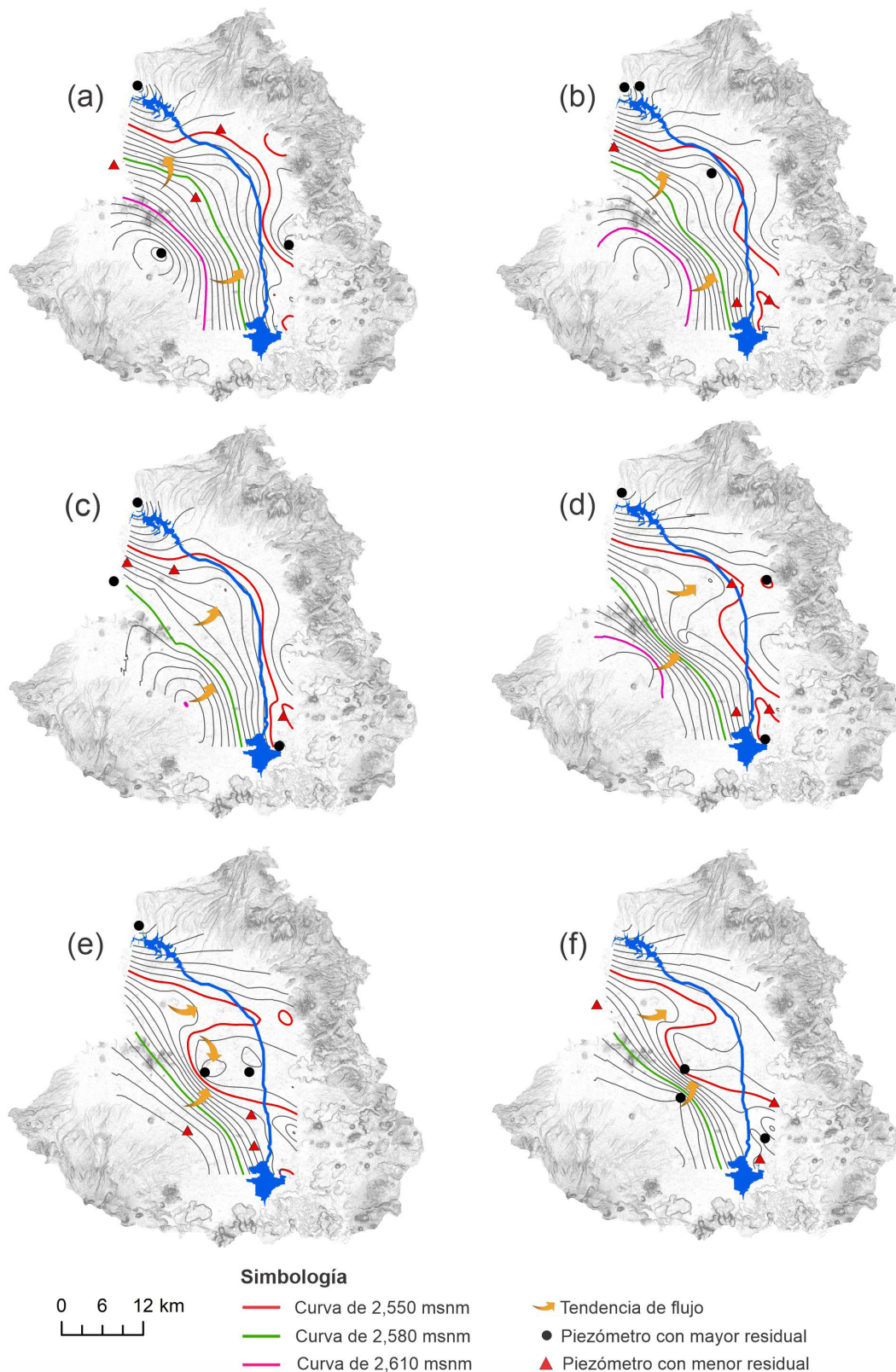


Figura 5 Líneas de elevación del nivel estático obtenidas por kriging ordinario para los años: a) 1975, b) 1984, c) 1994, d) 2004, e) 2015 y f) 2018.

Tabla 3. Resumen de parámetros del variograma teórico e índices de ajuste obtenidos en el análisis de kriging ordinario.

Parámetro	1975	1984	1994	2004	2015	2018
Datos	32	30	28	30	28	27
Función de variograma	Lineal	Lineal	Exp	Lineal	Lineal	Lineal
Pendiente	0.03	0.035	NA	0.03	0.025	0.03
Meseta	NA	NA	925.2	NA	NA	NA
Rango	NA	NA	16000	NA	NA	NA
Factor de anisotropía	1.804	2	2	1.804	1.804	1.804
Ángulo de anisotropía	135	135	120.4	135	135	135
ME (m)	-0.6930	-0.6344	0.1425	-0.3599	-0.1944	-0.1676
RMSE (m)	8.8030	9.3824	8.5307	8.3495	9.0941	8.7082
MSDR	0.9748	0.9711	0.9646	0.9685	0.9647	0.9633

residuales indicaría que la tendencia del flujo subterráneo ha sido influenciada por perturbaciones locales, particularmente la extracción de agua subterránea. Por consiguiente, la aplicación de variogramas teóricos regionales para el periodo entre 2015 y el 2018 es poco recomendada. Los mayores descensos piezométricos acumulados se ubican en las zonas cercanas a las fracturas, reafirmando la relación existente con el bombeo de agua subterránea (Figura 6). Particularmente, en la fractura Totoltepec, el foco de extracción localizado al sur de esta coincide con los estratos de sedimentos no consolidados y el bloque que se compacta.

4.3. INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA

Con base en las secciones transversales derivadas del modelo geológico 3d, el volcán andesítico que subyace al centro de Toluca funciona como una zona mecánicamente estable en comparación con los sedimentos de grano fino que se depo-

sitan en sus alrededores (Figura 7a). Lo anterior explicaría la ausencia de fracturas en el centro de la ciudad, así como la existencia de éstas con múltiples orientaciones en el área circundante. Curiosamente, la fractura Totoltepec se manifiesta en zonas cercanas a un segundo domo de rocas volcánicas. De acuerdo con los registros litológicos de pozos cercanos, se registra una secuencia de basalto andesítico en el pozo 15W, la cual, queda cubierta por un estrato de gravas y arenas (Figura 7b). En este contexto, la fractura Totoltepec, ubicada al sur de dicha estructura, coincide con una secuencia de depósitos piroclásticos, conglomerados, granos en matriz arcillosa y depósitos de grano grueso (en orden de localización del depósito). De tal columna se destacan los estratos con alto contenido arcilloso por su susceptibilidad a procesos de consolidación (Gambolati y Teatini, 2015). La zona de transición roca-sedimento podría suponer un área de esfuerzos cortantes en la cresta de los macizos rocosos generando subsidencia diferencial y fracturas (Figura 8).

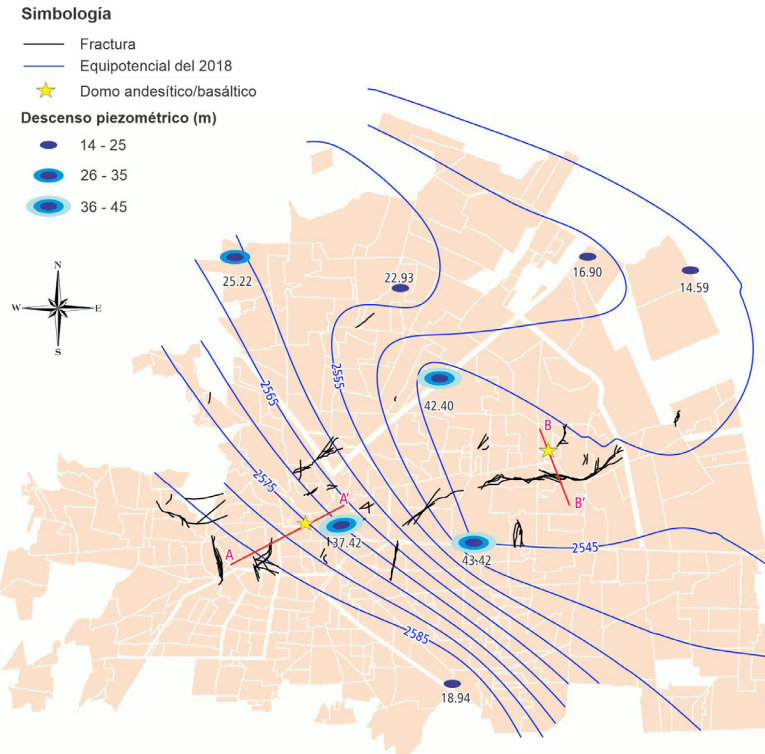


Figura 6 Descensos piezométricos acumulados durante el periodo de 1975 a 2018 en relación con la geología obtenida en el modelo litológico y la ubicación de fracturas.

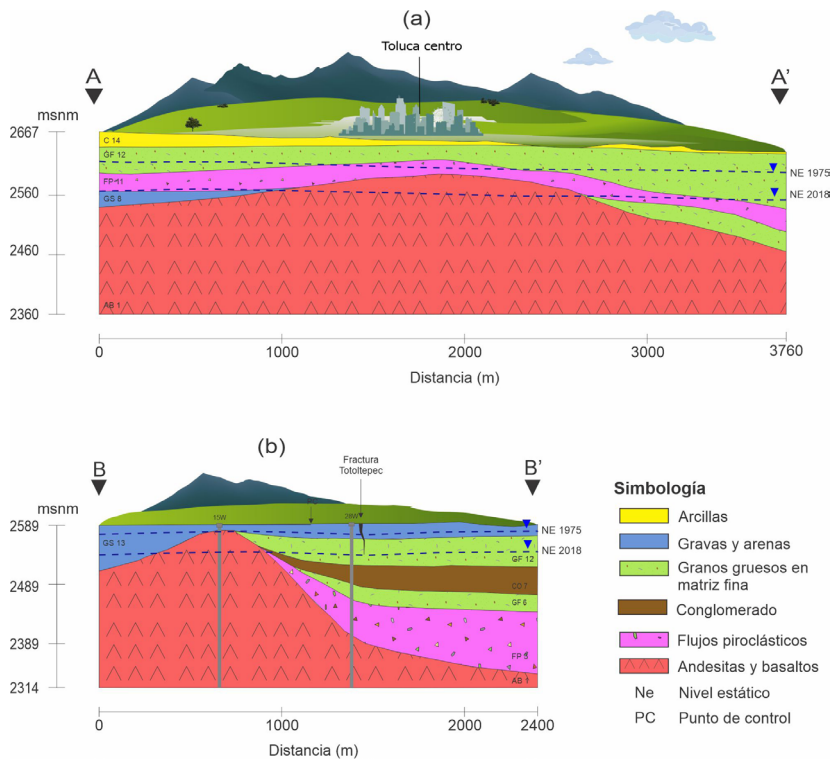


Figura 7 Secciones del modelo geológico tridimensional. a) Corte A-A' intersecando el centro de la ciudad de Toluca, b) Corte B-B' ubicado en la colonia San Pedro Totoltepec. El punto de control corresponde a la zona de baja subsidencia reportada en el estudio de Calderhead *et al.* 2010a. Exageración vertical 5x. Las claves de materiales corresponden a las expuestas en la Tabla 2.

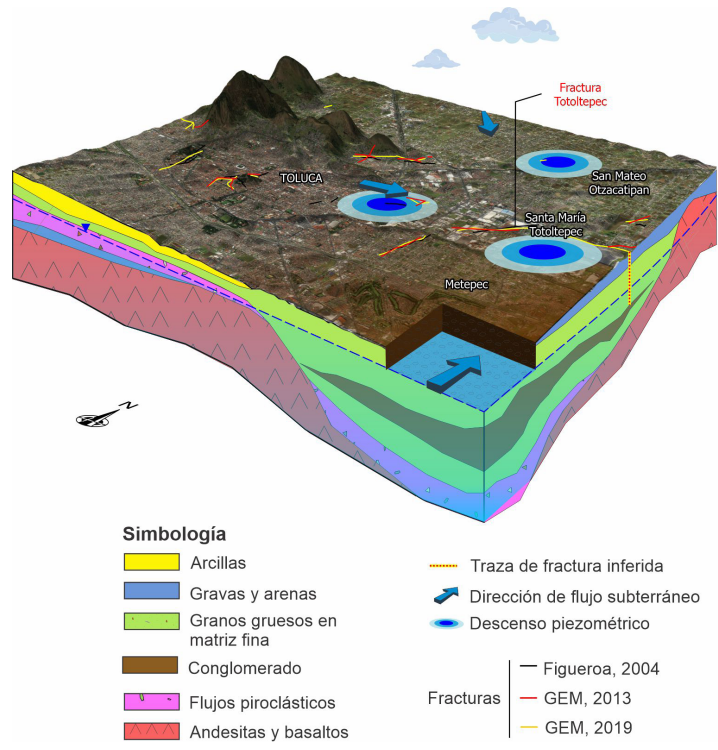


Figura 8 Sumario de potenciales elementos geológicos e hidrogeológicos en el Valle de Toluca que condicionan la generación y ubicación de fracturas.

5. Conclusiones

Este estudio se propuso con el objetivo de evaluar la configuración geológica/geométrica de la cuenca del Valle de Toluca, la evolución piezométrica y su posible relación con la ubicación de fracturas de la ZMVT. La reinterpretación e interpolación de los registros estratigráficos denota una geometría de estratos altamente irregular. La ubicación de fracturas muestra correlación con la presencia de domos volcánicos y descensos piezométricos. Las discontinuidades en los alrededores del centro de Toluca concuerdan con el domo andesítico subyacente reportado en estudios anteriores (Calderhead *et al.*, 2010a). Por otro lado, el bloque que baja en la fractura Totoltepec coincide con una secuencia de materiales piroclásticos y sedimentarios, donde destacan estratos de granos gruesos en matriz fina de hasta 70 m de espesor. Con base en las clasificaciones derivadas de Sondeos de Penetración Estándar, así como la estratigrafía reportada en

los multipiezómetros y pozos del Sistema Lerma, las matrices finas son conformadas mayormente por arcillas que por limos. Lo cual indicaría que el paquete de granos gruesos en matriz fina presentaría un grado de consolidación ante diferenciales piezométricos.

Los resultados de la evolución piezométrica muestran la disminución en los niveles estáticos de manera general en la cuenca, así como un cambio en las direcciones de flujo a partir del análisis del año 1994. Del análisis geoestadístico aplicado a los niveles estáticos históricos, las principales inexactitudes obtenidas en el krigeado se ubican en las zonas de mayor abatimiento. Lo anterior tiene sentido ya que tales perturbaciones locales son difícilmente modeladas por variogramas regionales. A fin de contemplar el escarpado relieve de la cuenca, como una alternativa se sugiere la aplicación de co-kriging con una deriva topográfica.

Tomando juntos estos resultados, la zona de transición roca-sedimento no consolidado, la

presencia de materiales susceptibles a consolidación, además de los descensos piezométricos por extracción de agua, concuerdan con la ubicación de las fracturas reportadas. El conocimiento de los factores que intervienen en el fracturamiento, sin duda, constituye uno de los primeros pasos en la delimitación de zonas de riesgo.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, análisis de datos y redacción del manuscrito original: CRC. Adquisición de datos, desarrollo técnico, revisión del borrador original: JG. Revisión del borrador original: RM. Revisión del borrador original e interpretación: IN.

Financiamiento

Este estudio fue realizado con fondos de CONACYT a través del otorgamiento de beca doctoral.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de México por el soporte brindado para esta investigación. A la Comisión Nacional del Agua por proporcionar los datos de piezometría histórica. Al M.C. Manuel Ligonio por su asesoría en la reclasificación litológica. Al Ing. Javier Moreno, responsable del Laboratorio de Materiales de la UAEMex por la disposición de datos de suelos del Valle de Toluca. A los revisores anónimos de este artículo por sus constructivos comentarios.

Conflictos de interés

Los autores declaran la inexistencia de conflictos de interés.

Referencias

- Albores, B., 1995, Tules y sirenas: El impacto ecológico y cultural de la industrialización en el Alto Lerma: Toluca, México, El Colegio Mexiquense, A.C., Secretaría de Ecología, Gobierno del Estado de México, 463 p.
- Almazán, A., 2017, Peligros geológicos por fallas y grietas en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca con base en un estudio morfoestructural: Toluca, México, Universidad Autónoma del Estado de México, Tesis de licenciatura, 110 p.
- Arroyo, N., 2016, Distribución espacial y evaluación temporal del proceso de consolidación del terreno por la sobreexplotación del agua subterránea: Toluca, México, Universidad Autónoma del Estado de México, Tesis doctoral, 206 p.
- Baumann, V., Bonadonna, C., Cuomo, S., Moscarillo, M., Biass, Sebastien., Pistolesi, M., Gattuso, A., 2019, Mapping the susceptibility of syn-eruptive rain-triggered lahars at Vulcano island (Italy) combining field characterization and numerical modelling: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19 (11), 2421-2449. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-19-2421-2019>
- Birkle, P., Torres, V., González E., 1998, The water balance for the Basin of the Valley of Mexico and implications for future water consumption: *Hydrogeology Journal*, 6, 500-517. <http://dx.doi.org/10.1007/s100400050171>
- Burbey, T, 2002, The influence of faults in basin-fill deposits on land subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA: *Hydrogeology Journal*, 10 (5), 525-538. [10.1007/s10040-002-0215-7](http://dx.doi.org/10.1007/s10040-002-0215-7)
- Calderhead, A., Martel, R., Garfias, J., Rivera, A., Therrien, R., 2010a, Pumping effects on land subsidence in the Toluca Valley, Mexico: *IAHS Proceedings and Reports*, 339, 461-466.
- Calderhead, A., Martel, R., Alasset, P., Rivera, A.,

- Garfias, J., 2010b, Land subsidence induced by groundwater pumping, monitored by D-InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico: *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36 (1), 9-23. <http://dx.doi.org/10.5589/m10-024>
- Calderhead, A., Therrien, R., Rivera, A., Martel, R., Garfias, J., 2011, Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico: *Advances in Water Resources*, 34, 83-97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.09.017>
- Calderhead, A., Martel, R., Garfias, J., Rivera, A., Therrien, R., 2012, Sustainable management for minimizing land subsidence of an over-pumped volcanic aquifer system: Tools for policy design: *Water Resources Management*, 26, 1847-1864. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-012-9990-7>
- Carreón, D., Cerca, M., Ochoa, G., Teatini, P., Zúñiga, F., 2016, Shearing along faults and stratigraphic joints controlled by land subsidence in the Valley of Queretaro, Mexico: *Hydrogeology Journal*, 24, 657-674. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-016-1384-0>
- Castellazzi, P., Garfias, J., Martel, R., Brouard, C., Rivera, A., 2017, InSAR to support sustainable urbanization over compacting aquifers: The case of Toluca Valley, Mexico: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 63, 33-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2017.06.011>
- Cervantes, A., Armienta, M., 2004, Influence of faulting on groundwater quality in Valle del Mezquital, Mexico: *Geofísica Internacional*, 43 (3), 477-493. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2004.43.3.960>
- Chilés, J., Delfiner, P., 1999, *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty*: New York, Wiley, 734 p.
- CICEM, Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de México, 2008a, El agrietamiento del suelo de la zona metropolitana de la ciudad de Toluca. Manual informativo para ingeniería civil: Estado de México, CICEM.
- CICEM, Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de México, 2008b, Actualización del estudio del subsuelo de la ciudad de Toluca. Manual informativo para ingeniería civil: Estado de México, CICEM.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua, 2002, Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de Toluca: Estado de México, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica, 37 p.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua, 2018, Estaciones piezométricas de Toluca y alto Lerma 2013-2018, Organismo de Cuencas del Valle de México: Estado de México, Subgerencia de Hidrología e Ingeniería de Ríos, 89 p.
- Conway, B., 2016, Land subsidence and earth fissures in south-central and southern Arizona, USA: *Hydrogeology Journal*, 24, 649-655. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-015-1329-z>
- Desbarats, A., Logan, C., Hinton, M., Sharpe, D., 2002, On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model: *Journal of Hydrology*, 255, 25-38. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00504-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00504-2)
- Esteller, M., Díaz, C., 2002, Environmental Effects of Aquifer Overexploitation: A Case Study in the Highlands of Mexico: *Environmental Management*, 29 (2), 266-278. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-001-0024-0>
- Esteller, M., Andreu, J., 2005, Anthropogenic effects on hydrochemical characteristics of the Valle de Toluca aquifer (central Mexico): *Hydrogeology Journal*, 13, 378-390. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-004-0395-4>
- Figuroa Vega, G.E., 2004, El agrietamiento de la ciudad de Toluca: Estado de México, Gobierno del Estado de México, 27 p.
- Frigo, M., Ferronato, M., Yu, J., Ye, S., Galloway, D., Carreón, D., Teatini, P., 2019, A

- parametric numerical analysis of factors controlling ground fissures caused by groundwater pumping: *Water Resources Research*, 55(11), 9500-9518. <http://dx.doi.org/10.1029/2019WR025034>
- Gambolati, G., Teatini, P., 2015, Geomechanics and subsurface water withdrawal and injection: *Water Resources Research*, 51, 3922-3955. <http://dx.doi.org/10.1002/2014WR016841>
- García, A., Macías, J., Garduño, V., 2000, Miocene to recent structural evolution of the Nevado de Toluca volcano region, Central Mexico: *Tectonophysics*, 318, 281-302. [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00316-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00316-9)
- García, A., Zamorano, J., López, C., Galván, A., Carlos, V., Ortega, R., Macías, J., 2008, El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(1), 158-178.
- GEM, Gobierno del Estado de México, 2013, Atlas de Riesgos municipio de Toluca: Estado de México, Gaceta Municipal Semanal, 38 p.
- GEM, Gobierno del Estado de México, 2019, Atlas de Riesgos municipio de Toluca 2019-2021: Estado de México, Gaceta Municipal Semanal, 36 p.
- Golden Software Inc, 2015, Surfer V. 13 Powerful contouring, gridding & surface mapping system. Full User's Guide: Colorado, Golden.
- González, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C., 2002, *Ingeniería Geológica* (1a ed.). Madrid: Pearson Educación, 744 p.
- Guastaldi, E., Carloni, A., Pappalardo, G., Nevini, J., 2014, Geostatistical methods for lithological aquifer characterization and groundwater flow modeling of the catania plain quaternary aquifer (Italy): *Journal of Water Resource and Protection*, 6, 272-296. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2014.64032>
- Hancox, J., Gárfias, J., Aravena, R., Rudolph, D., 2010, Assessing the vulnerability of over-exploited volcanic aquifer systems using multi-parameter analysis, Toluca Basin, Mexico: *Environmental Earth Sciences*, 59, 1643-1660. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-009-0147-9>
- Howard, K., Zhou, W., 2019, Overview of ground fissure research in China : *Environmental Earth Sciences*, 78, 97. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8114-6>
- Juárez, E., Rodríguez, A., 2005, *Mecánica de suelos. Tomo I Fundamentos de la mecánica de suelos*: México, Limusa, 644 p.
- Kitanidis, P., 1997, *Introduction to geostatistics: Applications to hydrogeology*: Cambridge, Cambridge University Press, 272 p.
- Li, Y., Teatini, P., Yu, J., Franceschini, A., Frigo, M., 2021, Aseismic multi-fissure modelling in unfaulted heavily pumped basins: mechanics and applications: *Water Resources Research*, 57(10), e2021WR030127. <http://dx.doi.org/10.1029/2021WR030127>
- Li, Y., Friedman, N., Teatini, P., Benczur, A., Ye, S., Zhu, L., Zoccarato, C., 2022, Sensitivity analysis of factors controlling earth fissures due to excessive groundwater pumping: *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36, 3911–3928. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02237-8>
- López, M., 2019, *Cartografía geológico-ambiental de los volcanes de la zona centro de Toluca con énfasis en controles estructurales y su influencia en las características hidrogeológicas del área*: Toluca, México. Universidad Autónoma del Estado de México, Tesis de licenciatura, 140p.
- Lu, C., Shu, L., Chen, X., Tao, Y., Zhang, Y., 2009, Kriging method for estimation of groundwater resources in a basin with scarce monitoring data, in *Proceedings of Symposium New Approaches to Hydrological Prediction in Data-sparse Regions*, Hyderabad, 333, 136-144.
- Macías, J., Arce, J., García, P., Siebe, C., Espindola, J., Komorowski, J., Scott, K., 1997, Late Pleistocene– Holocene cataclysmic eruptions at Nevado de Toluca and Jocotitlan volcanoes, Central Mexico, en Link, K.P., Kowallis, B.J. (Eds.), *Proterozoic to Recent Stratigraphy, Tectonics, and Volcanology*, Utah, Nevada, southern Idaho and Central Mexico: USA,

- Brigham Young University, *Geology Studies*, 42, 493–528.
- Murillo, H., 2008, Análisis de los agrietamientos y subsidencia en el Valle de Toluca y su interrelación con la sobreexplotación del agua subterránea: Toluca, México. Universidad Autónoma del Estado de México, Tesis de licenciatura.
- Nikroo, L., Kompani-Zare, M., Sepaskhah, A., Shamsi, S., 2010, Groundwater depth and elevation interpolation by kriging methods in Mohr Basin of Fars province in Iran: *Environmental Monitoring*, 166, 387-407. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-009-1010-x>
- Ochoa, G., Carreón, D., Cerca, M., López, M., 2015, Assessment of groundwater flow in volcanic faulted areas. A study case in Querétaro, México: *Geofísica Internacional*, Ed. Instituto de Geofísica, 54(3), 199-220. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gi.2015.04.016>
- Oliver, M., Webster, R., 2014, A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging: *Catena*, 113, 56-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>
- Pacheco, J., Arzate, J., Rojas, E., Arroyo, M., Yutis, V., Ochoa, G., 2006, Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Querétaro valley, México: *Engineering Geology*, 84, 143-160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.12.003>
- Pawłowsky, V., Olea, R., Davis, J., 1993, Boundary Assessment Under Uncertainty: A Case Study: *Mathematical Geology*, 25 (2), 125-144. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00893269>
- Peterson, T., Barnett, B., 2004, Kriging the water table with predicted water levels and its uncertainty, in 1st National Salinity Engineering Conference, Perth, Australia, 6 p.
- Rudolph, D., Sultan, R., Garfias, J., McLaren, R., 2006, Significance of enhanced infiltration due to groundwater extraction on the disappearance of a headwater lagoon system: Toluca Basin, Mexico: *Hydrogeology Journal*, 14, 115-130. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-005-0463-4>
- Salas, J., Garfias, J., Llanos, H., Martel, R., 2011, Modelo numérico 1D de la dinámica de infiltración en la zona no saturada, acuífero del valle de Toluca: *Revista Mexicana de Ciencia Geológicas*, 28 (1), 147-160.
- Sánchez, N., Orozco, M., 2015, Configuración terciaria de la zona metropolitana de Toluca: *Bitácora*, 25 (1), 9-18. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v1n25.40184>
- Schuck, B., Desbois, G., Urai, J., 2020, Grain-scale deformation mechanisms and evolution of porosity in experimentally deformed Boom Clay: *Journal of Structural Geology*, 130, 103894. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2019.103894>
- UNITECNIA, 1996, Estudio de Diseño de redes de monitoreo en los acuíferos del Valle de Toluca: Estado de México, CNA, 80p.
- Wellmann, F., Caumon, G., 2018, 3-D Structural geological models: Concepts, methods, and uncertainties: *Advances in Geophysics*, 59, 1-121. <http://dx.doi.org/10.1016/bs.agph.2018.09.001>