

Influencia potencial de las fallas en el flujo de agua subterránea
de un acuífero volcánico conformado por materiales porosos y
fracturados

Potential influence of faults on groundwater flow in a combined porous –
fractured volcanic aquifer

“Influencia de fallas en el flujo de un acuífero volcánico”

Marcia Barrera-de-Calderon

Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA), Universidad Autónoma del
Estado de México. Toluca, Edo. México. Mexico, C.P. 50130.

Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador. Final Avenida Mártires del 30 de
julio, Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador.

*marciadecalderon@gmail.com

Jaime Garfias

Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA), Universidad Autónoma del
Estado de México. Toluca, Edo. México. Mexico, C.P. 50130.

Richard Martel

Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-ETE), Québec, QC G1K 9A9, Canada.

Javier Salas-García

Facultad de ingeniería (FI-UAEM), Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Edo.
México. México, C.P. 50130.

Resumen

El conocimiento del flujo de agua subterránea es de suma importancia en la planificación sostenible de los recursos hídricos, especialmente en regiones con demandas crecientes de agua. La distribución de los materiales geológicos en un Modelo Hidroestratigráfico Tridimensional (THM) y la geología estructural han sido integradas para evaluar la influencia de las fallas en el flujo de agua subterránea del acuífero volcánico de San Salvador. La información geológica fue analizada, clasificada, reinterpretada y correlacionada a partir de informes de perforación de pozos y del mapa geológico nacional para definir zonas geológicamente homogéneas. Éstos se analizaron junto a las propiedades hidráulicas del acuífero para definir las Unidades Hidroestratigráficas (UHE) que conforman el acuífero urbano. En el dominio de las UHE, se evaluó la distribución de las fallas, conductividad hidráulica y rendimiento de los pozos existentes en el acuífero, dando lugar a la identificación de las fallas con mayor influencia en el sistema de flujo de agua subterránea. El modelo evidenció la existencia de seis unidades hidroestratigráficas (UHE) intercaladas y formadas por piroclasto y toba con la conductividad hidráulica más baja (K) de 10^{-2} a 1 m/día, lava basáltica y andesítica fracturada con valores de K entre 1 y 10^1 m/d, y escoria con K más alta de 10^1 hasta aproximadamente 10^3 m/día. El modelo también mostró la ubicación y desplazamiento de dos fallas asociadas al graben central en la Zona de Falla de El Salvador (ZFES), una localizada en el sector sur y otra al este de la zona de estudio. Los resultados indican que la UHE de baja producción de material piroclástico y toba se extiende en toda la zona de estudio, y es aprovechada por la mayoría de los pozos de producción de agua del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). Mientras que las UHE de lavas de Cuscatlán y San Salvador son menos extensas y localmente aprovechadas, sin embargo, son más productivas y se clasifican como buenos acuíferos, principalmente cerca de fallas geológicas. Por su parte, la Escoria del Plan de La Laguna es una UHE pequeña en extensión, pero la más productiva de la zona y se encuentra densamente

fracturada. Adicionalmente, hay cuatro fallas importantes que pueden ser consideradas como potenciales rutas de flujo preferencial de agua subterránea y una que se comporta como barrera de flujo. Las fallas reflejan mayor influencia cuando se da la presencia de flujos de lava basáltica o andesítica fracturados saturados, y no evidenciaron influencia en materiales porosos fracturados. Este estudio proporciona nuevos elementos al conocimiento de la distribución espacial y aprovechamiento de los materiales permeables en el acuífero de San Salvador y podría respaldar algunas decisiones para el manejo sostenible del agua subterránea, especialmente aquellas orientadas a las zonas de nuevos aprovechamientos. Esta metodología se podría aplicar en acuíferos con condiciones similares de datos escasos y múltiples fuentes de información.

Palabras clave: Acuífero de San Salvador, modelo hidroestratigráfico, acuífero volcánico fracturado, fallas en flujo de agua subterránea, ZFES.

Abstract

Groundwater flux knowledge is of supreme importance in sustainable water resources planning, mainly in highly rising water demand regions. Distribution of geologic material in a Tridimensional Hydrostratigraphic Model (THM) and structural geology have been incorporated in order to assess fault influence on groundwater flow of San Salvador volcanic aquifer. Geologic data have been analyzed, classified, reinterpreted and correlated from bore drilling reports and geology map of the zone to define homogeneous geologic layers. These layers were associated with their hydraulic properties for defining Hydrostratigraphic Units (UHE) in the aquifer. Faults distribution, hydraulic conductivity and water rate production in wells were spatially analyzed and correlated for identifying major influence faults in groundwater flux. The model showed the existence of six interspersed UHE formed by pyroclastic and tuff material with the lowest hydraulic conductivity (K) from $10^{-2} - 1$ m/día, fractured andesitic and basaltic lava with K values between $1 - 10^1$ m/día,

and scoria with the highest K from 10^1 to around 10^3 m/día. The model also showed the location and displacement of two faults associated to Graven Central in the Zone Fault of El Salvador (ZFES), one of them localized at the south and the other at the east of the study area. Results showed that the low production Cuscatlán pyroclastic and tuffs material UHE extends throughout the study area and it is exploited for most of water wells production in the Metropolitan Area of San Salvador (AMSS). While Cuscatlán and San Salvador lavas UHEs are less extensive, locally exploited, even though they are more productive and are classified as good aquifers, mainly near geologic faults. Meanwhile, Plan de La Laguna Escoria UHE is small and the most productive of the area and it is densely fractured. Furthermore, there are four important faults in the zone that can be considered as potential preferential flow paths and one fault that is a flux barrier. The influence of faults occurred when saturated fractured materials are present and it has no influence in porous material. This model gives new insights about the spatial distribution and exploitation of the permeable materials in San Salvador aquifer area and could support some decisions for sustainable groundwater management, mainly those focus on new water development zones. This methodology could be applied in aquifers with similar conditions of poor and multisource data.

Key words: San Salvador aquifer, tridimensional hydrostratigraphic model, fractured aquifer, faulting on groundwater flux, ZFES.

1. Introducción

El entendimiento de los sistemas de flujo es esencial para la gestión de los recursos de agua subterránea (Anderson y Woessner, 1992; Ochoa-González *et al.*, 2015). En Centroamérica, los depósitos volcánicos son predominantes (Williams y Meyer-Abich, 1955; Meyer-Abich, 1960; Weyl, 1961; Reynolds, 1980; Hernández, 2008) y conforman los acuíferos que suplen la demanda de agua de su población (Ballesteros *et al.*, 2007). Las principales ciudades de los países

centroamericanos se encuentran asentadas en valles originados por la actividad volcánica de la zona. Esto también ocurre en otras partes del planeta, por ejemplo, en Italia (Angelone *et al.*, 2009; Bellia *et al.*, 2015); México (Esteller and Andreu, 2005; Hancox *et al.*, 2010; Hernández-Antonio *et al.*, 2015); Etiopía (McKenzie *et al.*, 2001). De igual forma, los depósitos volcánicos que comprenden el acuífero de San Salvador, son de gran importancia para el abastecimiento de la población de la ciudad del mismo nombre (Barrera de Calderón, 2010). Este acuífero se localiza en una zona de fuerte actividad tectónica regional y local que causa rompimiento de la corteza en un complejo sistema de fallas y fracturas que podrían influenciar el flujo de agua subterránea del área.

La conceptualización del funcionamiento del sistema de flujo en un acuífero volcánico y fracturado requiere, por una parte, de un claro entendimiento de la distribución espacial de las unidades hidroestratigráficas (Ahmed, 2009). Por otra parte, el estudio detallado de las características hidráulicas asociadas a las zonas de falla, las cuales, según Bense *et al.* (2013) pueden realizarse a partir de estudios focalizados en la superficie (desde el punto de vista de los geólogos estructurales), o de estudios focalizados en la subsuperficie (realizados por hidrogeólogos). En regiones poco estudiadas desde el punto de vista hidrogeológico, estos estudios se vuelven retadores y complejos ya que involucran un fuerte trabajo de recolección, análisis y clasificación de información geológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica que se encuentra dispersa en distintas formas y cantidad (Fulton *et al.*, 2005; Sanz *et al.*, 2009; Di Salvo *et al.*, 2012).

Varios autores (Carle *et al.*, 1998; Weissmann *et al.*, 1999; He *et al.*, 2014) consideran que la distinción de las unidades hidroestratigráficas involucra dos limitantes: la primera, relacionada con la información, como la escasez, dispersión y multiplicidad de fuentes de información; y la segunda, relativa a la heterogeneidad del ambiente físico que se va a caracterizar. Esta heterogeneidad, generalmente está acompañada de anisotropía en sistemas fracturados (Berkowitz,

2002; Bense y Person, 2006; Bense *et al.*, 2013), situación que debe ser enfrentada para entender el comportamiento de los acuíferos volcánicos.

La información geológica en regiones donde el conocimiento de la subsuperficie aún se encuentra en etapa temprana, viene principalmente de fuentes como los informes de perforación de pozos con fines de abastecimiento de agua (Moya *et al.*, 2014; Høyer *et al.*, 2015; Pham y Tsai, 2017), estos documentos pueden proveer importante información respecto de la variabilidad vertical del material geológico, pero solamente limitada información de la variabilidad lateral (Weissmann *et al.*, 1999; Muldoon *et al.*, 2001; Ahmed, 2009). Además se debe enfrentar la variabilidad de la calidad de información (Ahmed, 2009; Høyer *et al.*, 2015), la cual demanda procesos de control de calidad que proporcionen datos confiables para elaborar los modelos (Ross *et al.*, 2005; Friedel, 2016; Pham y Tsai, 2017). Bense *et al.* (2013), considera que la información contenida en estos informes es de utilidad para evaluar fallas a escala regional.

De acuerdo a de Marsily *et al.* (2005), la heterogeneidad puede ser enfrentada a través de la definición de propiedades promedio homogéneas equivalentes. Algunos métodos que han sido utilizados para modelar la heterogeneidad y la conectividad espacial de la hidroestratigrafía incluyen: métodos estocásticos y geoestadísticos (Carle y Fogg, 1997; Sanz *et al.*, 2009; Ahmed, 2009; Travelletti y Malet, 2012), interpretaciones estratigráficas de los ciclos deposicionales (Muldoon *et al.*, 2001; Monreal *et al.*, 2011; Moya *et al.*, 2014; Taylor *et al.*, 2018); y aprendizaje automático (Friedel, 2016).

Pese a que hoy en día existen softwares robustos como RockWorks, Geological Process Modelling (GPM), Georeka, entre otros, los resultados que se obtienen dependen fuertemente de la distribución de los datos de entrada y la densidad de los mismos en el dominio del modelo. Cuando el análisis incluye las fallas, el problema se complica, ya que se requiere mayor cantidad, tipo de n y densidad de información para que el modelo reproduzca esas discontinuidades. En muchos casos,

aunque se tenga una cantidad “suficiente” de datos de entrada, su distribución no es uniforme. Por lo tanto, quedan zonas con poca información, las cuales resultan menos confiables luego del proceso de interpolación (Moya *et al.*, 2014). En esos casos, se hace necesario un análisis adicional que ajuste los resultados del modelo mediante la evaluación de las condiciones de entrada y de zonas vecinas, que provea una aproximación simplificada pero confiable de la distribución espacial de las UHE y de las fallas en el dominio del modelo. Esta es la base para la interpretación del modelo de flujo de agua subterránea.

Las zonas de fallas pueden comportarse como zonas de flujo preferencial o actuar como barreras hidráulicas, deteniendo y cambiando el sentido del flujo (Caine *et al.*, 1996; Rawling *et al.*, 2001; Bense *et al.*, 2013; Moya *et al.*, 2014). Algunos casos de fallas que actúan como zonas de flujo preferencial son presentados por (Garven *et al.*, 1999; Lin *et al.*, 2014; Moya *et al.*, 2014). Además, se ha reportado fallas actuando como barreras por parte de Lin *et al.* (2014) en Table Mountain Group, Sur Africa; y Pham y Tsai (2017), en el sistema acuífero Baton Rouge, Lousiana, Estados Unidos. El gradiente hidráulico, la conductividad hidráulica y las tasas de flujo, además de la estructura de las fallas, son parámetros y características de las zonas de fallas que han sido utilizadas para identificar el comportamiento hidráulico conductivo de las fallas (Berkowitz, 2002; Bense *et al.*, 2013).

Este artículo tiene como objetivo la evaluación de la influencia de las fallas en el flujo de agua subterránea del acuífero de San Salvador, a partir de la integración de la distribución espacial de las unidades hidroestratigráficas en un modelo tridimensional, la geología estructural y los parámetros hidráulicos de dichas unidades. Con este trabajo se espera contribuir al mejor entendimiento del funcionamiento de este acuífero urbano y proveer información relevante para su manejo sustentable.

2. Contexto del área de estudio

2.1 Ubicación y descripción general

La zona de estudio está delimitada por la subcuenca media del río Acelhuate, la superficie se extiende en aproximadamente 362 km². Dentro de esta zona se encuentra el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), que incluye a San Salvador, la capital de El Salvador y ciudad más importante del país. La subcuenca se localiza en el centro del país y, a su vez, en el centro-sur de Centro América tal y como se muestra en la Figura 1. La topografía de la zona se caracteriza por fuertes pendientes al sur y suroeste con una elevación máxima de 1917 msnm en el volcán activo de San Salvador, mientras que al norte el terreno se vuelve cada vez más plano, descendiendo hasta una elevación de 359 msnm.

El clima de la zona es tropical, la precipitación media anual varía desde 1731 mm/año, en la parte baja, hasta 2141 mm/año en la parte alta. Las temperaturas medias anuales oscilan entre 16.3 °C y 23.4 °C. El área se encuentra bordeada por importantes accidentes geográficos (Schmidt-Thomé, 1975), entre los que sobresalen el volcán de San Salvador, caldera de Ilopango, conocida como lago de Ilopango (Figura 2), cono efusivo y domos extrusivos de San Jacinto, el cono de escoria de Antiguo Cuscatlán, y cordillera del Bálsamo (Schmidt-Thomé, 1975; Lexa *et al.*, 2012; Hernández y Jicha 2019).

Los principales usos del suelo que se distinguen en la región son zonas urbanas, comerciales e industriales, en donde se alberga alrededor de 1.6 millones de habitantes, equivalentes al 27.3% de la población de El Salvador; café, principalmente en las laderas del volcán de San Salvador y cordillera del Bálsamo; caña de azúcar y granos básicos, desarrollados en la zona baja, al norte y este de la región. El área urbana representa el 32.3 % de la zona de estudio (MARN y OPAMSS,

2012), y según ANDA (2016), su abastecimiento público de agua en el año 2016 dependía en un 41.7% del acuífero de San Salvador (no se contabilizan las extracciones privadas), lo cual representa un volumen de 71.76 Mm³. Esta condición genera un alto interés de distintos actores para conocer el comportamiento del acuífero que brinde alternativas de manejo orientadas a la seguridad hídrica de la zona.

2.2 Entorno geológico

2.2.1 Origen de los materiales que conforman el acuífero de San Salvador

Diversos autores (Williams y Meyer-Abich, 1955; Meyer-Abich, 1960; Weyl, 1961; Reynolds, 1980; Hernández, W., 2008), explican que los fenómenos que dieron forma a los materiales en los cuales se encuentra el acuífero de San Salvador fueron de carácter tectónico, volcánico y erosivo. Tres formaciones, en orden de antigüedad, se distinguen en la zona de estudio: Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador (Figura 2) (Williams y Meyer-Abich, 1955; Weber *et al.*, 1974; Reynolds, 1980; Pedrazzi *et al.*, 2019). Estas formaciones consisten en una secuencia de materiales volcánicos del Plioceno al Holoceno (Lexa *et al.* 2012; Canora *et al.* 2014; Hernández y Jicha 2019).

En el período posterior al Plioceno de la era Terciaria se produjeron actividades de índole tectónico, durante esta etapa los materiales volcánicos depositados en el Terciario fueron drásticamente dislocados por fallamientos verticales. Posteriormente, grandes bloques de la corteza que constituyen el basamento del acuífero sufrieron un ascenso y otros experimentaron asentamientos formándose montañas y valles (Meyer-Abich, 1960; Schmidt-Thomé, 1975; Williams y Meyer-Abich, 1955).

En el Cuaternario, a través de las zonas de debilidad dejadas por los movimientos tectónicos, se produjo una intensa actividad volcánica, dando origen a las estructuras volcánicas jóvenes del país, ahora conocidas como Arco Volcánico Centroamericano (CAVA) (Carr y Stoiber, 1977). Los materiales eyectados llenaron las cuencas tectónicas en la zona de estudio, los cuales tienen su origen en erupciones altamente explosivas consistentes en piroclasto y toba pumítica procedentes de la caldera de Ilopango (parteaguas noreste de la subcuenca), caldera de Coatepeque (aproximadamente 32 km al suroeste del volcán de San Salvador) y volcán de San Salvador (Lexa *et al.*, 2012), parcialmente dentro de la zona de estudio (Figura 1).

Estos materiales se encuentran interestratificados con extrusiones de lava basáltica y andesítica procedentes del volcán de San Salvador (Hernández y Jicha, 2019), El Jabalí, cerro de Nejapa y Guazapa, y otros volcanes monogenéticos. Recientemente, se sumaron materiales resultantes de procesos erosivos que rellenaron terrazas aluviales en la parte más plana de la subcuenca (CEL, 1984). El acuífero de San Salvador se encuentra conformado por esta mezcla de materiales porosos y fracturados con distintas permeabilidades que determinan el flujo de agua subterránea en la zona.

2.2.2 *Características estructurales en la subcuenca del río Acelhuate*

La zona de estudio se localiza sobre la plataforma conocida como graven central (GC), localizada en la Zona de Falla de El Salvador (ZFES) que se extiende discontinuamente de este a oeste por todo el país en aproximadamente 150 km de longitud y 20 km de ancho (Martínez-Díaz *et al.* 2004; Hernández y Jicha 2019). Dos fallas activas de la ZFES destacan en la región: al norte, la falla Guaycume, de unos 22 km de longitud, que coincide en algunos sectores con el parteaguas de la subcuenca (Martínez-Díaz, *et al.* 2017) y al sur, la falla Panchimalco (Canora *et al.* 2014) que se encuentra al sur del parteaguas en la cordillera del Bálsamo, fuera del área de estudio (Figura 2)

Ambas han identificadas como unas de las principales causantes de destructivos terremotos (Canora *et al.* 2014; Alonso-Henar *et al.* 2018).

De acuerdo a Schmidt-Thomé (1975), cuatro sistemas de fallas desarrollados en diferentes momentos se distinguen en la zona de estudio. El sistema más antiguo corresponde a las fallas alineadas este – oeste, localizada al sur, que corresponden con el escarpe norte de la cordillera del Bálsamo y puede asociarse al GC (Hernández y Jicha, 2019). El sistema norte-sur aparece solo localmente, mientras que los sistemas noroeste y subordinado noreste, derivados del primero, son considerablemente importantes dentro de la configuración tectónica del lugar (Figura 2).

Schmidt-Thomé (1975) destacó la presencia de los más recientes centros de erupción: el cráter La Laguna, el volcán Boquerón y la depresión de Ilopango, en la intersección entre fallas de orientación este con otras de orientación noroeste. Por su parte Hernández y Jicha (2019) notaron que en fallas paralelas a la dirección noroeste, se presenta el apareamiento de conos de escorias, cráteres de explosión y erupciones de flancos. El cráter de explosión La Laguna conforma una serie caótica de materiales que dificulta la identificación de la correlación litológica de los materiales registrados en columnas litológicas de pozos del sector, dando indicio de la presencia de varias fracturas o fallas en la zona (Figuras 1 y 2).

2.3 Entorno hidrogeológico

Diversos estudios hidrogeológicos con fines de extracción de agua se han desarrollado en la zona de estudio (Delgado, 1981; Acosta, 1991; Delgado, 2001; EYCO S.A. de C.V., 2005; Guevara Retana, 2013, entre otros). Sus alcances son específicos y limitados a la zona de interés y a la evaluación con fines de aprovechamiento. Otros estudios del comportamiento hidrogeológico de

la zona fueron realizados en el ámbito académico (Duarte Saldaña, 1988; Gil, 2007; Barrera de Calderón, 2010); en estas investigaciones, aunque se identificaron estratos permeables, aún no se clasifican las unidades hidroestratigráficas sobre la base de un modelo tridimensional.

Adicionalmente, se han desarrollado estudios con fines de planificación hídrica a nivel nacional, los cuales incluyen al acuífero de San Salvador. Según ANDA (2008), en los alrededores del volcán de San Salvador se encuentra un acuífero fracturado de gran extensión y posiblemente de alta producción, el cual está constituido principalmente por roca volcánica andesítica y basáltica intercalada con material piroclástico. La delimitación de las unidades acuíferas se basa en la geología superficial, en tanto que los límites entre la unidad fracturada y la unidad porosa coinciden con los límites de las rocas efusivas andesíticas y basálticas de San Salvador, así como con los piroclastos y epiclastos de las formaciones San Salvador y Cuscatlán (Figura 2).

El PNUD (1972) determinó que la transmisividad de los materiales fracturados podría variar entre 1000 m²/día en el suroeste a 15000 m²/día al sureste. Valores de 50 m²/día a 100 m²/día han sido registrados en materiales piroclásticos, mientras que en los materiales retrabajados se ha llegado a registrar valores hasta de 1000 m²/día (PNUD, 1972). Los materiales del Bálsamo son clasificados como roca no acuífera y, por lo tanto, hasta la fecha se considera que el flujo de agua subterránea no ocurre en ese material.

Hasta la fecha, las evaluaciones del flujo de agua subterránea más relevantes corresponden a la ANDA (2008); Barrera de Calderón (2010); MARN (2016). Todos coinciden en la existencia de dos flujos principales; el primero, radial, proveniente del volcán de San Salvador; el segundo, proveniente de la cordillera del Bálsamo (Figura 5). Sin embargo, existen diferencias en la interpretación del recorrido de dicho flujo, principalmente en los materiales fracturados. Estas

interpretaciones pueden tener impacto en la planificación del desarrollo de los recursos hídricos de la zona y, por supuesto, en la evolución de los niveles del agua subterránea y la productividad de los pozos de la zona.

3. Materiales y métodos

3.1 Análisis y clasificación de datos geológicos e hidrogeológicos

3.1.1 Adquisición de datos

La información sobre las características subsuperficiales de la zona de estudio fue recopilada a partir de estudios e investigaciones previas de la zona y la recolección de datos de campo, que incluyó la verificación de la ubicación de los pozos y manantiales, informes de perforación de pozos, descripción de columnas litológicas, registros eléctricos verticales, informes de aforos, medición de niveles en el acuífero, reportes de análisis de hidrogeoquímica de agua, así como el Mapa Geológico de la República de El Salvador a escala 1:100,000 (Bosse *et al.*, 1978). El dominio del modelo fue determinado en base a los datos disponibles (Moya *et al.*, 2014).

El análisis e interpretación de la información geológica e hidrogeológica permitió la identificación de los principales estratos acuíferos presentes en la zona que, en conjunto con la distribución de niveles piezométricos, proporcionaron información sobre las posibles zonas permeables que dominan el sistema de flujo.

3.1.2 Control de calidad y homogeneización de los datos

Un total de 361 pozos perforados, 58 manantiales y 12 pozos excavados, fueron identificados y sometidos a un proceso de depuración. Partiendo de los criterios de validación de calidad de

información de pozos propuesta por Ross *et al.* (2005) para datos geológicos se adicionó criterios de confiabilidad para información hidrogeológica y de la química del agua. La información fue clasificada en cinco niveles (Siendo el nivel G5 o H5 de confiabilidad alta, y el nivel G1 o H1 de confiabilidad mala). La información geológica e hidrogeológica con niveles 3 y 4 fueron seleccionados para el análisis.

3.1.3 Modelo litológico tridimensional

Un total de 89 columnas litológicas clasificados como G3 y G4 fueron procesadas para elaborar el modelo litológico (Figura 3). Para cada elemento se definió el material geológico representado y se reinterpreto cada informe con el fin de uniformizar los materiales geológicos en grupos representativos (Moya *et al.*, 2014), posteriormente se procedió a la construcción del modelo litológico. Adicionalmente, se incorporó la información correspondiente a los detalles constructivos y geométricos de los pozos (diámetro de perforación y entubamiento, distribución de la tubería lisa y ranurada); los datos del nivel piezométrico y fecha de su medición.

El modelo litológico fue construido utilizando el método de interpolación de la distancia inversa disponible en RockWorks 16 (Ecuación 1). La interpolación fue realizada permitiendo que las unidades se intercalaran entre sí, representando de esta forma la geología de zonas volcánicas recientes.

$$Z_{nodo} = \frac{\sum \left(\frac{Z_{punto}}{d^n} \right)}{\sum \left(\frac{1}{d^n} \right)}, \quad \text{(Ecuación 1)}$$

donde, el exponente n de peso 2, indica una influencia moderada de la distancia de los puntos cercanos a la distancia d , entre el nodo de análisis y los pozos cercanos. Z es valor del nodo en análisis o los nodos cercanos a interpolar, dicho valor representa un tipo de litología. En el proceso de interpolación, fueron utilizados un máximo de 8 puntos para calcular el valor del nodo Z .

3.1.4 Identificación de unidades hidroestratigráficas

Ross *et al.* (2005) consideran que es más fácil y natural para fines de análisis, una concepción estratégica en 2D. En concordancia con ellos, para enfrentar la heterogeneidad de las formaciones geológicas resultantes en el modelo tridimensional inicial, así como el fracturamiento de la zona, se elaboró perfiles litológicos trazados en zonas de especial interés para el entendimiento de la distribución de los materiales en el acuífero.

Estos perfiles fueron mejorados a partir de la interpretación de la litología depurada, el mapa geológico de la zona (Bosse *et al.*, 1978) así como con la investigación sobre la evolución geológica descrita en los apartados precedentes, cuya síntesis permitió la obtención de los perfiles litológicos de los materiales geológicos predominantes en la zona de estudio. (Figura 3).

3.2 Características hidráulicas de los materiales litológicos

La información de los parámetros hidráulicos del acuífero fue retomada de los informes de perforación de pozos y reportes cuyo nivel de confiabilidad hidrogeológica varió entre media y alta (H3-H5). Los datos de transmisividad, capacidad específica, porosidad eficaz, coeficiente de almacenamiento y conductividad hidráulica, fueron asociados a cada una de las categorías litológicas antes mencionadas, verificándose para cada caso los estratos aprovechados (Figura 3). A partir del análisis de la información constructiva de los pozos como profundidad y distribución

de la rejilla, así como asumiendo que los parámetros medidos para pozos que aprovechan un solo estrato, son representativos de las características hidráulicas de ese estrato, se asignaron valores a cada uno de los estratos previamente definidos en las secciones transversales.

3.3 Unidades hidroestratigráficas

Una vez asociados los parámetros hidráulicos del acuífero con los estratos aprovechados mediante el modelo estratigráfico bidimensional, se evaluó la distribución espacial de dichos parámetros, se verificó la consistencia de las asunciones del modelo bidimensional, se ajustó aquellas que fueran necesarias y se procedió a clasificar las categorías estratigráficas en unidades hidroestratigráficas (Figura 3). Cada unidad hidroestratigráfica fue definida como “única” y no se repite en profundidad. A su vez, se puso especial énfasis en distinguir los materiales porosos y los materiales fracturados como unidades hidroestratigráficas distintas.

3.4 Evaluación de la influencia de las fallas en las características hidráulicas del acuífero

La influencia de las fallas/fracturas en el flujo de agua subterránea fue determinada a partir del análisis de las propiedades hidráulicas del acuífero reportada para los pozos, así como de la distribución de pozos y sus caudales de producción, la ubicación de los manantiales de alta productividad y su cercanía a fallas. El valor de conductividad hidráulica y el estrato aprovechado fue evaluado en cada caso. Se consideró que existía influencia de la falla cuando en pozos adyacentes a éstas, la conductividad hidráulica superase por una orden de magnitud el valor promedio registrado para un estrato determinado.

Adicionalmente se construyó el mapa de isopiezas a partir de niveles piezométricos en 44 puntos dentro del acuífero: 18 corresponden a manantiales de alta producción que afloran en zonas de cambio de contacto geológico, el resto fue medido en este estudio durante el período 2016 – 2017.

La dirección del flujo de agua subterránea fue analizada en conjunto con las fallas más conductivas, los parámetros hidráulicos y los caudales de bombeo, definiéndose así, las zonas más probables de flujo preferencial o barrera influenciado por los sistemas de fracturas.

4. Resultados y discusión

4.1 Materiales de las formaciones acuíferas

El modelo hidroestratigráfico tridimensional fue elaborado para entender la distribución espacial de los principales materiales y características hidráulicas en los que se encuentra el acuífero de San Salvador. Un total de seis perfiles litológicos fueron construidos, de los cuales se eligieron cuatro perfiles (1-1', 2-2', A-A' y B-B') para destacar los aspectos más relevantes de los resultados (Figura 4). En este análisis destacan, los espesores de los estratos saturados, sus relaciones geométricas y el desplazamiento de estos materiales debido a la presencia de los sistemas de fallas.

Los resultados indican la existencia de una secuencia piroclástica saturada, de gran espesor en toda la zona de estudio en concordancia con Fairbrothers *et al.* (1978) y Hernández y Jicha (2019). En el sur y suroeste, desde el volcán de San Salvador y la cordillera del Bálsamo, estos materiales se intercalan con flujos de lavas fracturadas de distintos espesores y origen, teniendo como barrera de la colada de lavas, el cauce del río Acelhuate en el este y el río Tomayate (afluente del primero) en el norte (Figura 4). La sección 1-1' y A-A' indican que, en particular, en la cordillera del Bálsamo, las lavas andesítica y basálticas del Bálsamo pueden tener espesores hasta de 140 m, superior a lo reportado por Schmidt-Thomé (1975), reduciéndose su espesor a medida avanzan hacia el norte (Figura 4).

A su vez, la sección A-A' muestra la diversidad de materiales presentes en la UHE denominada Escorias Plan de La Laguna y nuevamente el hundimiento de las lavas del Bálsamo hacia el oeste en una profundidad que supera los 200 m, ya que no se ha intersectado por los pozos de la zona. En ese sector los materiales predominantes son porosos, con intercalaciones locales de lavas. Asimismo se distingue un parteaguas de flujo desplazado unos 3 km al este del parteaguas de la subcuenca en ese sector, la cual no fue identificada por ANDA (2008) ni MARN (2016) (Figura 5), pero que reafirma el planteamiento de Barrera de Calderón (2010) en un estudio de menor extensión que éste.

La extensión de lavas andesíticas y basálticas de San Salvador se ilustra las secciones 1-1', 2-2' y B-B'. El espesor de estas lavas es mayor en las cercanías del volcán de San Salvador, donde se encuentran completamente saturadas, mientras que a medida se alejan de éste, su espesor y saturación se reducen, encontrándose lavas parcialmente saturadas. Las lavas de Cuscatlán en el sector norte y este de la subcuenca se encuentran saturadas parcialmente (Sección B-B' en la Figura 4).

En el sector norte y noreste, el acuífero es predominantemente poroso, corresponde a la secuencia piroclástica de Cuscatlán y su espesor puede llegar a superar los 300 m (Figura 4). A excepción del sector sur donde afloran los materiales del Bálsamo, el basamento del acuífero ha sido asociado con los aglomerados del Bálsamo, identificados únicamente en el bloque que corresponde a la cordillera del Bálsamo. En el resto de la zona estudiada, las perforaciones de pozos no han logrado alcanzarla, expertos en la geología del país consideran que puede estar a unos 800 m de profundidad (Hernández, 2019, a través de comunicación verbal).

4.2 Unidades hidroestratigráficas

Los valores de conductividad hidráulica en el acuífero varían desde 10^{-1} hasta cerca de 10^3 m/día (Figura 6 y Tabla 1). La asociación de los materiales definidos en el modelo litológico bidimensional (Figura 4) y la conductividad hidráulica permitió la definición de las unidades hidroestratigráficas. Los rangos de conductividad hidráulica en las distintas UHE muestran la heterogeneidad del acuífero (Tabla 1). Por una parte, los materiales piroclásticos presentan valores entre 10^{-2} y 1 m/día, típico en materiales volcánicos (Davis y DeWiest, 1991) y son considerados acuíferos pobres (Custodio y Llamas, 1996). Por otra parte, las lavas, presentan valores de conductividad hidráulica mayores que van del orden de 1 a 10^1 m/día, lo cual se asocia con el fracturamiento del material (Gellasch *et al.*, 2013). Valores cercanos a 10^3 m/día, se registran en la zona donde se presenta la secuencia caótica de materiales escoriáceos, intercalados con lavas y piroclastos, que han sido definidos como Plan de la Laguna y son considerados como acuíferos excelentes (Custodio y Llamas, 1996). En esa zona se asientan importantes industrias y comercios del país.

4.2.1 Tendencia del flujo de agua subterránea

Debido a la limitante de datos por la escasez de puntos con acceso a medición de niveles estáticos en el acuífero, ya que en su mayoría los pozos se utilizan para producción, se dificultó la determinación de los gradientes hidráulicos entre pozos alineados con fallas geológicas. Por lo tanto, se elaboró el mapa de isopiezas sin considerar la influencia de tales estructuras y posteriormente se analizó la influencia del flujo tomando en consideración las características hidráulicas de las zonas de fallas. La Figura 5 ilustra el mapa de isopiezas para los años 2008 (Figura 5a), año 2016 (Figura 5b) y este estudio (Figura 5c). Los primeros dos fueron elaborados

en base a registros de niveles de períodos de más de 15 años, mientras que el último corresponde al período 2016-2017.

La tendencia de los niveles potenciométricos indica la presencia de dos flujos principales de agua subterránea (Figura 5c): el primero que circula desde el volcán de San Salvador y corre rumbo al norte de la subcuenca, descargando en manantiales importantes que dan lugar al inicio del río El Ángel y abastecen a importantes industrias del país. Este flujo se mueve principalmente a través de las UHE de roca basáltica y andesítica de San Salvador, roca basáltica y andesítica de Cuscatlán y piroclasto del Cuscatlán. Una clara divisoria de flujo se presenta en el parteaguas suroeste de la subcuenca (Figura 5c). Un flujo más localizado al noroeste, proveniente de la ladera norte del volcán de San Salvador descarga en el río San Antonio (ver Figuras 5c y 6).

El otro flujo proviene de la cordillera del Bálsamo y cerro de San Jacinto y se encuentra con el flujo proveniente del sector sur del volcán de San Salvador, fluye hacia el este y luego hacia el norte. Importantes descargas de este flujo se presentan en la zona donde se encuentra el cambio de permeabilidad de los materiales jóvenes de San Salvador (UHE de rocas basáltica y andesítica de San Salvador) e inician los materiales predominantemente porosos correspondientes a la UHE de Piroclasto del Cuscatlán. En esa zona, manantiales con caudales que oscilan alrededor de 150 L/s son aprovechados por la ANDA para el abastecimiento de la ciudad (Figuras 5 y 6).

La tendencia de los niveles también indica que la clasificación de los domos intrusivos y conos de San Jacinto como una zona no acuífera, posiblemente requiera un abordaje posterior más profundo ya que, pese a que se tienen varios pozos perforados en la zona de ladera de este cerro, no se distingue una clara predominancia de la dirección del flujo radial desde estas estructuras, esto podría estar indicando el flujo a través de los piroclastos de Cuscatlán subyacentes (Lexa *et al.*,

2012) y materiales fracturados conductivos en esa zona. Esto es consistente con los resultados del modelo hidroestratigráfico bidimensional y la definición de las UHE, donde se ha evidenciado la capacidad conductiva de la roca basáltica y andesítica de Cuscatlán (Figura 4 y Tabla 1).

4.2.2 Influencia de las fallas en la productividad del acuífero y el flujo de agua subterránea

Cinco fallas parecen influenciar la productividad del acuífero y por consiguiente su flujo (Figuras 5 y 6). Las dos más significativas probablemente sean la falla Boquerón y Antiguo Cuscatlán. La primera cruza el cráter del volcán Boquerón de noroeste a sureste, mientras que la segunda, paralela a la primera, parece estar relacionada con el hundimiento de los materiales del Bálsamo (graven) y, por lo tanto, al encontrar materiales menos permeables al otro lado de la falla, podría favorecerse el flujo en ese alineamiento (Anderson y Bakker, 2008; Lin *et al.*, 2014; Moya *et al.*, 2014). Probablemente el cráter del Boquerón se encuentre conectado hidráulicamente con los pozos alineados a la falla del mismo nombre (Figura 5), y sea una zona de flujo preferencial que aporta recarga directa, sin embargo, se requiere un análisis más detallado de esta posible conexión hidráulica para evaluarla.

A una distancia máxima de 500 m desde el alineamiento de estas fallas, la conductividad hidráulica varía entre 10^2 y 10^3 m/día, en esta área los pozos tienen sus rejillas aprovechando lavas en espesores que pueden llegar a superar los 100 m o encontrarse intercaladas con materiales porosos (Figuras 4 y 5). El efecto de aumento de la conductividad hidráulica en las fallas Boquerón y Antiguo Cuscatlán es evidente, varios de los pozos productivos y activos desde hace más de 30 años en la zona, se encuentran prácticamente alineados con las fallas (Figura 6). Desafortunadamente la falta de un registro ordenado de pozos y sus informes de perforación, no permiten respaldar con más datos de características hidráulicas el planteamiento anterior.m/d

Otra falla importante es la que se ha denominado, Miralvalle-San Marcos (Figura 6), en esta estructura con alineamiento noroeste - sureste, los pozos aprovechan los estratos total o parcialmente saturados de la lava de San Salvador, en las cercanías de dicho volcán, mientras que, en la zona del cerro de San Jacinto, los materiales aprovechados corresponden a las lavas del Bálsamo, ambos sobreyacen a los piroclastos de Cuscatlán. En este estudio, se ha considerado a estos materiales del Bálsamo como materiales no acuíferos. Sin embargo, se ha evidenciado que, en zonas fracturadas, la conductividad hidráulica reportada para los pozos contiguos a esta falla se encuentra en el orden de 10^2 m/día (Figura 6).

Asociado a las lavas de San Salvador, los pozos influenciados por esta falla pueden superar los 60 L/s, mientras que los materiales fracturados del Bálsamo (al sureste), al ser más antiguos, probablemente tengan fracturas rellenas con materiales más consolidados, produciendo caudales de entre 20 y 30 L/s (Figura 6), valor que se considera bueno para pozos de producción en la zona. Adicionalmente en este sector se presenta la falla circular correspondiente al apareamiento del domo de San Jacinto (Figura 2), que podría aumentar la conductividad hidráulica de la zona de influencia, quedando limitada la producción de los pozos por su profundidad, el espesor de los estratos aprovechados (Freeze y Cherry, 1979; Davis y DeWiest, 1991) y la densidad e interconexión de las fracturas (Lin *et al.*, 2014).

Con alineamiento suroeste – noreste, destacan las fallas denominadas UES y Acelhuate. La falla UES cruza material de lava andesítica y basáltica de San Salvador que sobreyace a los piroclastos de Cuscatlán. En este alineamiento los pozos son muy antiguos, lo cual limita la cantidad y calidad de información disponible acerca de sus características constructivas e hidráulicas. Sus profundidades generalmente no superan los 120 m, lo cual reduce el espesor aprovechado y, por lo

tanto su productividad, principalmente porque que las lavas en ese sector ya poseen menos espesor y se encuentran parcialmente saturadas.

En cuanto a la falla Acelhuate, parece tener una alta relevancia, en el afloramiento de manantiales de alta productividad, que son aprovechados por la ANDA (Figura 5 y 6). Los datos indican que esta falla puede constituir una barrera parcial de flujo debido al cambio de permeabilidad en los materiales al otro lado de la falla, que pasan de ser una combinación de lava fracturada y flujo piroclástico a material únicamente piroclástico, tal y como lo exponen Bense *et al.* (2003) en el análisis del Sistema Roer Balley Rift.

Además, se caracteriza por interceptar a otras fallas hidráulicamente importantes de alineamiento noroeste – sureste, que fueron comentadas anteriormente, tales como la falla Antiguo Cuscatlán, Miralvalle-San Marcos y la falla circular del domo de San Jacinto. La falla Acelhuate tiene la particularidad de que los pozos alineados con ella son poco productivos, presentando caudales incluso inferiores a 5 L/s, lo cual ha sido asociado a la falta de materiales fracturados que tienen flujo preferencial en parte de su extensión, particularmente al suroeste de la zona de manantiales del Acelhuate. En el alineamiento de dicha falla, el flujo de lavas de San Salvador, de acuerdo a los datos analizados, tiene una extensión de contacto limitada, predominando por tanto los materiales porosos en ambos lados de la falla (Figuras 4, 5 y 6).

Por último, tanto los valores de conductividad hidráulica como los de caudales de producción (Figura 5 y 6) indican que en los materiales porosos no hay influencia significativa de las fallas en el flujo de agua subterránea. En el norte y noreste del acuífero, donde la presencia de coladas piroclásticas saturadas es predominante, la conductividad hidráulica de los pozos varía entre 10^{-2} y 1 m/día, indistintamente si los pozos se encuentran cercanos a fallas o no. Esta variación de

conductividades hidráulicas podría estar asociada con la heterogeneidad de los materiales. La reducción de la conductividad hidráulica de los Piroclastos de Cuscatlán se evidencia con el apareamiento de manantiales en las zonas donde finalizan las Lavas de San Salvador y/o Cuscatlán, en las zonas de manantiales localizadas al norte de la zona de estudio que dan lugar al nacimiento de los ríos San Antonio y El Ángel (Figura 6), con caudales superiores a 50 L/s, y en algunos casos, mayores a 100 L/s.

5. Conclusiones

El acuífero volcánico de San Salvador está conformado por seis principales unidades hidroestratigráficas: tres fracturadas de roca basáltica y andesítica, dos porosas de piroclasto, toba y piroclasto retrabajado intercalado, y una muy focalizada de escoria, lava y material piroclástico caóticamente distribuido en profundidad. La UHE más extensa corresponde a la que se ha denominado Piroclasto del Cuscatlán, la cual prácticamente está presente en toda la zona de estudio, a excepción de zonas muy puntuales en la cordillera del Bálsamo. Su conductividad hidráulica varía de 10^{-2} a 1 m/día y corresponde con la clasificación de un acuífero pobre, sin embargo, es de suma importancia para el abastecimiento de la ciudad, sobre todo para núcleos poblacionales que cuentan con un sistema individual y para algunas industrias importantes del país.

Las UHE de material fracturado se extienden más allá de los límites previamente definidos por ANDA (2008) y Barrera de Calderón (2010). En este sector el flujo se encuentra fuertemente influenciado por la geología estructural. Cinco fallas de mayor influencia en el flujo de agua subterránea fueron identificadas, tres de alineamiento noroeste – sureste: Boquerón, Antiguo Cuscatlán y Miralvalle – San Marcos, donde existe la mayor densidad de pozos productivos de la zona; así como dos de alineamiento suroeste-noreste: Universidad y Acelhuate. De las cinco fallas,

la Falla Acelhuate constituye una barrera de flujo, mientras que el resto ha dado indicios de funcionar como zona de flujo preferencial.

Es probable que la falla Boquerón, alineada entre el volcán Boquerón y el antiguo volcán de San Salvador de noroeste a sureste, sea un conducto que adicione una recarga del cráter del Boquerón (una cuenca endorréica de aproximadamente 1,500 m de diámetro) a la zona de pozos localizado en las Escorias Plan de La Laguna, lo cual podría representar un aporte de 1.32 Hm³/año. Esta conexión amerita un estudio posterior más focalizado.

La UHE Roca basáltica y andesítica de San Salvador, se extiende en las faldas del volcán de San Salvador, donde presenta una saturación completa, conforma una unidad de producción buena, cuya conductividad hidráulica varía entre 1 y 10¹ m/día. Sin embargo, debido a que a su espesor se reduce al alejarse del volcán, tiende a reducir su espesor saturado o incluso quedar seca. Esta condición amerita atención en el manejo del acuífero, ya que se ha identificado una fuerte influencia de las fallas en la productividad de los pozos de la zona y si el descenso de los niveles piezométricos se reduce, también se reduce el espesor saturado y por consiguiente los caudales de producción de los pozos podrían caer drásticamente y presentarse reducción en los caudales de los manantiales de alta producción asociados a estas lavas.

La UHE de Roca basáltica y andesítica de Cuscatlán es considerada un acuífero pobre por su baja conductividad hidráulica de aproximadamente 1 m/día, se encuentra localizado únicamente en la cordillera del Bálsamo, cerro de San Jacinto y faldas del volcán de San Salvador y su productividad obedece principalmente a la porosidad secundaria producto del fracturamiento de la roca. La pequeña UHE que se denominó Escorias Plan de La Laguna, únicamente se identifica en la zona del mismo nombre y los pozos tienen valores que van de 10² m/día hasta cerca de 10³ m/día,

clasificándose como acuíferos excelentes. En ese sector se asienta una importante cantidad de industrias del país, pozos para el abastecimiento del AMSS y algunos de los más grandes comercios de la zona.

La planificación del desarrollo de los recursos hídricos subterráneos es de suma importancia para el manejo sostenible del acuífero. Este estudio proporciona señales de alerta sobre una densificación de pozos en las zonas más productivas de la ciudad, que puede ocasionar descensos significativos en los niveles del acuífero y en su rendimiento. Además, deja aportes para un desarrollo de otras zonas que podrían ser productivas y que aún no se han desarrollado fuertemente, entre ellas puede considerarse las zonas aledañas a la Falla Miralvalle – San Marcos y la Falla UES. Además, en el sector noreste, los resultados indican que el acuífero puede rendir caudales para abastecimiento de pequeñas poblaciones, debiendo considerarse un aumento en la profundidad de los pozos.

La influencia de las fallas en el flujo de agua subterránea se ha presentado como un análisis inicial de dicho fenómeno en el acuífero de San Salvador. El estudio ha dejado indicios de flujos preferenciales que ameritan un análisis más detallado, entre ellos el flujo de la falla de Boquerón y la falla Acelhuate. Otro aspecto relevante aportado con este estudio es un posible flujo a través de los piroclastos de Cuscatlán en la zona del Cerro de San Jacinto, que podría estar aportando a la recarga del campo de pozos de Guluchapa localizado en las orillas del lago de Ilopango.

Es de importancia, poner atención a estos potenciales flujos preferenciales, sobre todo en la planificación territorial de la zona, ya que favorecen la productividad del acuífero, y a la vez pueden ser conductos para facilitar la movilidad de contaminantes a través de él, agregando mayor vulnerabilidad a la contaminación del acuífero. Esta situación amerita acciones de gestión

orientadas a un monitoreo constante tanto de las actividades que se realizan en las zonas circundantes a las fallas, aguas arriba, como en los alrededores de los pozos de producción.

Agradecimientos

Este proyecto se llevó a cabo con el apoyo de la Organización de Estados Americanos (OEA), a través de las gestiones realizadas por el Ministerio de Relaciones Exteriores de El Salvador, quienes otorgaron la beca a la autora principal para realizar sus estudios de Doctorado. Muchas gracias a la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) y el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, así como a la Universidad Autónoma del Estado de México, CONACYT y COMECYT de México y el Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE) de Canadá por todo el apoyo proporcionado en el desarrollo de este estudio.

Referencias

- Acosta, J., 1991, Estudio Hidrogeológico del Área Metropolitana de San Salvador, San Salvador, El Salvador, Reporte Técnico, 17 p.
- Ahmed, A.A., 2009, Using lithologic modeling techniques for aquifer characterization and groundwater flow modeling of the Sohag area, Egypt: *Hydrogeology Journal*, 17, 1189–1201.
- Alonso-Henar, J., Benito, B., Staller, A., Álvarez-Gómez, J.A., Martínez-Díaz, J.J., Canora, C., 2018, Large-magnitude crustal seismic sources in El Salvador and deterministic hazard scenarios: *Engineering Geology*, 243, 70–83.
- Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), 2016, Memoria de Labores 2015: San Salvador, El Salvador, Memoria anual, 68 p.
- Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), 2008, Mapa Hidrogeológico de la República de El Salvador, 1:100000
- Anderson, E.I., Bakker, M., 2008, Groundwater flow through anisotropic fault zones in multiaquifer systems: Flow through faults: *Water Resources Research*. 44, 381 p.

- Anderson, M.P., Woessner, W.W., 1992, Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport: Academic Press, San Diego.
- Angelone, M., Cremisini, C., Piscopo, V., Proposito, M., Spaziani, F., 2009, Influence of hydrostratigraphy and structural setting on the arsenic occurrence in groundwater of the Cimino-Vico volcanic area (central Italy): *Hydrogeology Journal*, 17, 901–914.
- Ballestero, M., Reyes, V., Astorga, Y., 2007, Groundwater in Central America: Its Importance, Development and Use, with Particular Reference to Its Role in Irrigated Agriculture, in: Giordano, M., Villholth, K.G. (Eds.), *The Agricultural Groundwater Revolution: Opportunities and Threats to Development, Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture Series*: CABI, Wallingford, UK ; Cambridge, MA, pp. 100–128.
- Barrera de Calderón, M., 2010, Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de áreas de recarga en el acuífero de San Salvador: El Salvador, Universidad de El Salvador, Tesis de Maestría, 165 p.
- Bellia, C., Gallardo, A., Yasuhara, M., Kazahaya, K., 2015, Geochemical Characterization of Groundwater in a Volcanic System: *Resources* 4, 358–377.
- Bense, V.F., Gleeson, T., Loveless, S.E., Bour, O., Scibek, J., 2013, Fault zone hydrogeology: *Earth-Science Reviews*, 127, 171–192.
- Bense, V.F., Person, M.A., 2006, Faults as conduit-barrier systems to fluid flow in siliciclastic sedimentary aquifers: *Faults as Conduit-Barrier Systems. Water Resources Research*, 42.
- Bense, V.F., Van Balen, R.T., De Vries, J.J., 2003, The impact of faults on the hydrogeological conditions in the Roer Valley Rift System: an overview: *Netherlands Journal of Geosciences* 82, 41–54.
- Berkowitz, B., 2002, Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review: *Advances in Water Resources* 25, 861–884.
- Bosse, H.R., Lorenz, W., Merino, A., Mihm, A., Rode, K., Schmidt-Thomé, M., Wiesmann, G., Weber, H.S., 1978, Geologische Karte der Republik El Salvador, Mittelamerika.
- Caine, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B., 1996, Fault zone architecture and permeability structure: *Geology* 24, 1025.
- Canora, C., Martínez-Díaz, J.J., Villamor, P., Staller, A., Berryman, K., Álvarez-Gómez, J.A., Capote, R., Diaz, M., 2014, Structural evolution of the El Salvador Fault Zone: an evolving fault system within a volcanic arc: *Journal of Iberian Geology*, 40.
- Carle, S.F., Fogg, G.E., 1997, Modelling Spatial Variability with One and Multidimensional Continuous-Lag Markov Chains: *Mathematical Geosciences* 9, 891–918.

- Carle, S.F., Labolle, E.M., Weissmann, G.S., Brocklin, D.V., Fogg, G.E., 1998, Conditional Simulation of Hydrofacies Architecture: A Transition Probability/Markov Approach, in: Fraser, G.S., Davis, J.M. (Eds.), *Hydrogeologic Models of Sedimentary Aquifers*: SEPM Society for Sedimentary Geology, Tulsa, Oklahoma, U.S.A, 147–170.
- Carr, M.J., Stoiber, R.E., 1977, Geologic setting of some destructive earthquakes in Central America: *Geological Society of America Bulletin*, 88, 151.
- Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL), 1984, *Léxico Estratigráfico de El Salvador*, Reporte Técnico, 108 p.
- Custodio, E., Llamas, M.R., 1996, *Hidrología subterránea* (2 Tomos), 2. ed. corr. ed. Ed. Omega, Barcelona, 2350 p.
- Davis, S.N., DeWiest, R.J., 1991, *Hydrogeology*: Krieger, Malabar, Florida, 463 p.
- de Marsily, Gh., Delay, F., Gonçalves, J., Renard, Ph., Teles, V., Violette, S., 2005, Dealing with spatial heterogeneity: *Hydrogeology Journal*, 13, 161–183.
- Delgado, J., 2001, Informe de Evaluación Pozo Asevilla No. 2. Puerta La Laguna, Departamento de La Libertad. Antiguo Cuscatlán, La Libertad, Reporte Técnico, 26 p.
- Delgado, J., 1981, Recomendación sobre profundidad de perforación del pozo No. 3 El Socorro en San Salvador, departamento de San Salvador, ANDA, San Salvador, Reporte Técnico, 52 p.
- Di Salvo, C., Di Luzio, E., Mancini, M., Moscatelli, M., Capelli, G., Cavinato, G.P., Mazza, R., 2012, GIS-based hydrostratigraphic modeling of the city of Rome (Italy): analysis of the geometric relationships between a buried aquifer in the Tiber Valley and the confining hydrostratigraphic complexes: *Hydrogeology Journal*, 20, 1549–1567.
- Duarte Saldaña, J.R., 1988, Estudio Hidrogeológico del acuífero de Guluchapa, San Salvador, El Salvador. Universidad de Costa Rica, Costa Rica, Tesis de Maestría, 131 p.
- Esteller, M.V., Andreu, J.M., 2005, Anthropogenic effects on hydrochemical characteristics of the Valle de Toluca aquifer (central Mexico): *Hydrogeology Journal*, 13, 378–390.
- EYCO S.A. de C.V., 2005, La Nueva Apopa. Estudio Hidrogeológico de la Zona: Apopa, San Salvador. Reporte Técnico, 41 p.
- Fairbrothers, G.E., Carr, M.J., Mayfield, D.G., 1978, Temporal Magmatic Variation at Boqueron Volcano, El Salvador: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 67, 1–9.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J, 604 p.
- Friedel, M.J., 2016, Estimation and scaling of hydrostratigraphic units: application of unsupervised machine learning and multivariate statistical techniques to hydrogeophysical data: *Hydrogeology Journal*, 24, 2103–2122.

- Fulton, J.W., Koerkle, E.H., McAuley, S.D., Hoffman, S.A., Zarr, L.F., 2005, Hydrogeologic setting and conceptual hydrologic model of the Spring Creek Basin, Centre County, Pennsylvania (Investigation Report No. 2005–5091): U.S. Geological Survey Scientific. USGS, Pennsylvania, 83 p.
- Garven, G., Appold, M.S., Toptygina, V.I., Hazlett, T.J., 1999, Hydrogeologic modeling of the genesis of carbonate-hosted lead-zinc ores: *Hydrogeology Journal*, 7, 108–126.
- Gellasch, C.A., Bradbury, K.R., Hart, D.J., Bahr, J.M., 2013, Characterization of fracture connectivity in a siliciclastic bedrock aquifer near a public supply well (Wisconsin, USA): *Hydrogeology Journal*, 21, 383–399.
- Gil, L.B., 2007, Evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad intrínseca del sistema acuífero del municipio de Nejapa: San Salvador, El Salvador, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, Tesis de Maestría, 94 p
- Guevara Retana, J.M., 2013, Estudio Hidrogeológico Área del Ingenio Azucarero El Angel, Jurisdicción de Apopa, departamento de San Salvador: San Salvador, Reporte Técnico, 72 p.
- 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 Science*. 59, 1643–1660.
- He, X., Koch, J., Sonnenborg, T.O., Jørgensen, F., Schamper, C., Christian Refsgaard, J., 2014, Transition probability-based stochastic geological modeling using airborne geophysical data and borehole data: *Water Resources Research*, 50, 3147–3169.
- Hernández, W., 2008, Aspectos geológicos que influyen en las aguas subterráneas y en la respuesta sísmica del Área Metropolitana de San Salvador: *Revista de la Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos (ASIA)*, 162, 29–41.
- Hernández, W., Jicha, B., 2019, Múltiple colapso sectorial del volcán de San Salvador, El Salvador, América Central. *Revista de la Universidad Tecnológica de El Salvador*, 74 p.
- Hernández-Antonio, A., Mahlkecht, J., Tamez-Meléndez, C., Ramos-Leal, J., Ramírez-Orozco, A., Parra, R., Ornelas-Soto, N., Eastoe, C.J., 2015, Groundwater flow processes and mixing in active volcanic systems: the case of Guadalajara (Mexico): *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 3937–3950.
- Høyer, A.-S., Jørgensen, F., Sandersen, P.B.E., Viezzoli, A., Møller, I., 2015, 3D geological modelling of a complex buried-valley network delineated from borehole and AEM data: *Journal of Applied Geophysics*. 122, 94–102.
- Lexa, J., Šebesta, J., Chavez, J.A., Hernández, W., Pécskay, Z., 2012, Geology and volcanic evolution in the southern part of the San Salvador Metropolitan Area: *Journal of Geosciences*, 106–140.

- Lin, L., Lin, H., Xu, Y., 2014, Characterisation of fracture network and groundwater preferential flow path in the Table Mountain Group (TMG) sandstones, South Africa: *Water South Africa*, 40, 263.
- Martínez-Díaz, J.J., Álvarez-Gómez, J.A., Benito, B., Hernández, D., 2004, Triggering of destructive earthquakes in El Salvador: *Geology*, 32, 65.
- Martínez-Díaz, J.J., Plaza, M., Canora, C., Alonso-Henar, J., Álvarez Gómez, J.A., Herrero Barbero, P., Insua Arévalo, M., Staller, A., Villamor, P., 2017, Evidencias de actividad reciente de la Falla de Guaycume, posible fuente generadora del terremoto destructivo de 1917. Presentado en el XIII Congreso Geológico de América Central, San Salvador, El Salvador.
- McKenzie, J.M., Siegel, D.I., Patterson, W., McKenzie, D.J., 2001, A geochemical survey of spring water from the main Ethiopian rift valley, southern Ethiopia: implications for well-head protection: *Hydrogeology Journal*, 9, 265–272.
- Meyer-Abich, H., 1960, El Salvador, mit eine Karte und einem Profil. In: HOFFSTETTER R (ed) *Lexique Stratigraphique International 5 Amérique Latine, fas 2a Amérique Centrale*. Paris, 99-128.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), 2016, Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico de El Salvador, con énfasis en Zonas Prioritarias, San Salvador, El Salvador, 258 p.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), 2012, Mapa de Uso de Suelos de la Subregión Metropolitana de San Salvador, 1:40,000.
- Monreal, R., Rangel-Medina, M., Grijalva-Montolla, A., Minjarez-Sosa, I., Morales-Montaña, M., 2011, Metodología para la definición de unidades hiroestratigráficas: caso del acuífero del valle del río Yaqui. Sonora. México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63, 119–135.
- Moya, C.E., Raiber, M., Cox, M.E., 2014, Three-dimensional geological modelling of the Galilee and central Eromanga basins, Australia: New insights into aquifer/aquitard geometry and potential influence of faults on inter-connectivity: *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2, 119–139.
- Muldoon, M., Simo, J. (Toni), Bradbury, K., 2001, Correlation of hydraulic conductivity with stratigraphy in a fractured-dolomite aquifer, northeastern Wisconsin, USA: *Hydrogeology Journal*, 9, 570–583.
- Ochoa-González, G.H., Carreón-Freyre, D., Cerca, M., López-Martínez, M., 2015, Assessment of groundwater flow in volcanic faulted areas. A study case in Queretaro, Mexico: *Geofísica Internacional*, 54, 199–220.

- Pedrazzi, D., Sunye-Puchol, I., Aguirre-Díaz, G., Costa, A., Smith, V.C., Poret, M., Dávila-Harris, P., Miggins, D.P., Hernández, W., Gutiérrez, E., 2019, The Ilopango Tierra Blanca Joven (TBJ) eruption, El Salvador: Volcano-stratigraphy and physical characterization of the major Holocene event of Central America: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 377, 81–102.
- Pham, H.V., Tsai, F.T.-C., 2017, Modeling complex aquifer systems: a case study in Baton Rouge, Louisiana (USA): *Hydrogeology Journal*, 25, 601–615.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 1972, Estudio sobre las aguas subterráneas en la zona metropolitana de San Salvador: San Salvador, Reporte Técnico, 85 p.
- Rawling, G.C., Goodwin, L.B., Wilson, J.L., 2001, Internal architecture, permeability structure, and hydrologic significance of contrasting fault-zone types: *Geology*, 29, 43–46.
- Reynolds, J.H., 1980, Late Tertiary Volcanic Stratigraphy of Northern Central America: *Bulletin of Volcanology*, 43, 601–607.
- Ross, M., Parent, M., Lefebvre, R., 2005, 3D geologic framework models for regional hydrogeology and land-use management: a case study from a Quaternary basin of southwestern Quebec, Canada: *Hydrogeology Journal*, 13, 690–707.
- Sanz, D., Gómez-Alday, J.J., Castaño, S., Moratalla, A., De las Heras, J., Martínez-Alfaro, P.E., 2009, Hydrostratigraphic framework and hydrogeological behaviour of the Mancha Oriental System (SE Spain): *Hydrogeology Journal*, 17, 1375–1391.
- Schmidt-Thomé, M., 1975, The geology in the San Salvador area (El Salvador, Central America), a basis for city development and planning: *Geology Jb*, 13, 207–228.
- Taylor, A.R., Harrington, G.A., Clohessy, S., Dawes, W.R., Crosbie, R.C., Doble, R.C., Wohling, D.L., Batle-Aguilar, J., Davis, P.J., Thomas, M., Suckow, A., 2018, Hydrogeological assessment of the Grant Group and Poole Sandstone – Fitzroy catchment, Western Australia: Australia, A Technical Report to the Australian Government, 197 p.
- Travelletti, J., Malet, J.-P., 2012, Characterization of the 3D geometry of flow-like landslides: A methodology based on the integration of heterogeneous multi-source data: *Engineering Geology*, 128, 30–48.
- Weber, H.S., Wisemann, G., Wittekindt, H., 1974, Geologische Übersichtskarte der Republik El Salvador. 1:100000
- Weissmann, G.S., Carle, S.F., Fogg, G.E., 1999, Three-dimensional hydrofacies modeling based on soil surveys and transition probability geostatistics: *Water Resources Research*, 35, 1761–1770.
- Weyl, R., 1961, Die Geologie Mittelamerikas, Gebrüder Bornträger: Berlin, 226 p.

Williams, H., Meyer-Abich, H., 1955, Volcanism in the southern part of El Salvador with particular reference to the collapse basins of Coatepeque and Ilopango: University of California publications in geological sciences, 32, 1–64.

Tabla 1 Conductividad hidráulica de las unidades hidroestratigráficas del acuífero de San Salvador

Unidad hidroestratigráfica	K (m/día)	Región donde se presenta
Piroclastos de San Salvador	0.3 – 1.1	Zona central y cercanías del lago de Ilopango
Roca basáltica y andesítica de San Salvador	3.3 – 29.3	Suroeste y sector central este – oeste, en el centro de la ciudad
Roca basáltica y andesítica de Cuscatlán	1.3 – 2.3	Cordillera del Bálsamo y cerro de San Jacinto
Piroclastos de Cuscatlán	0.04 – 1.2	Toda la zona de estudio
Roca basáltica y andesítica de Bálsamo	2.0	Cordillera del Bálsamo, sector este.
Aglomerados del Bálsamo	Sin datos	Toda la zona de estudio (Basamento)?

Barrera de Calderón, M. L.

Pie de Figuras

Figura 1 Ubicación de la zona de estudio en la región central de El Salvador y Centroamérica, mostrando accidentes geográficos que dan forma a la subcuenca del río Acelhuate.

Figura 2 Mapa geológico simplificado de la zona de estudio a partir de Bosse *et al.* (1978). La secuencia estratigráfica de los materiales se muestra arriba a la derecha (Schmidt-Thomé (1975). El alineamiento de las secciones litológicas se muestra con líneas blancas. El mapa también presenta la distribución espacial de las principales fallas de la zona de estudio.

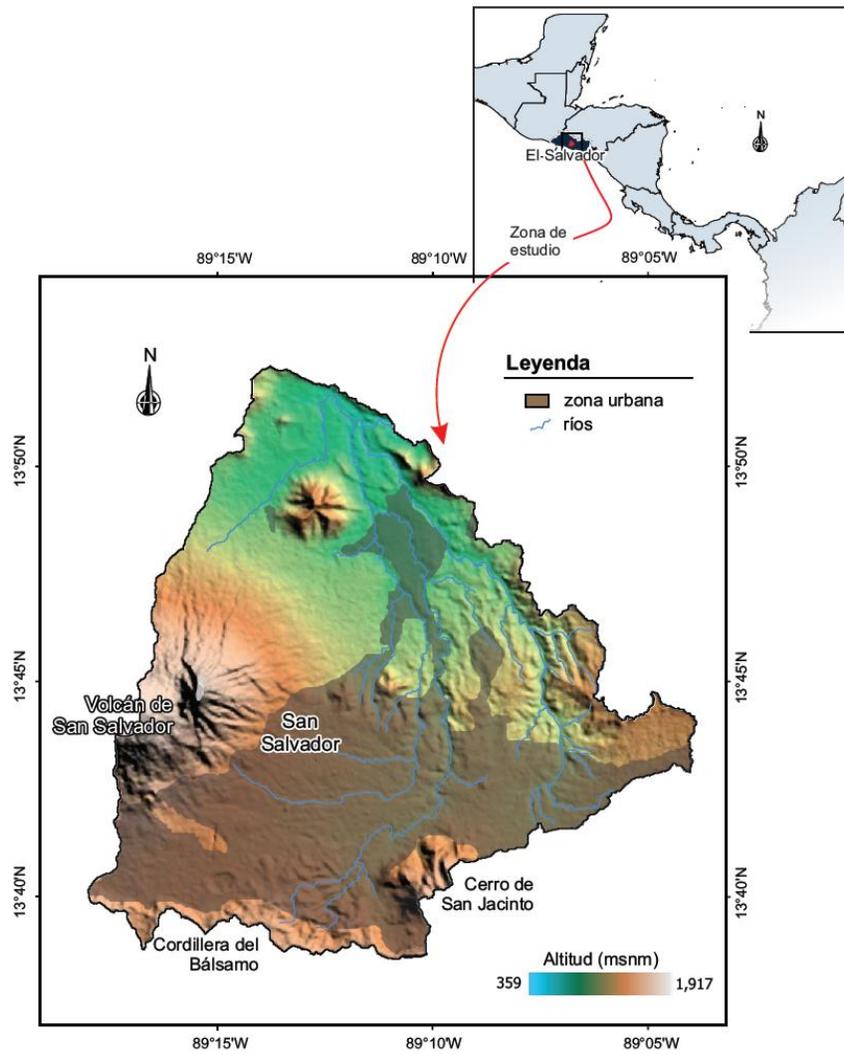
Figura 3 Secuencia metodológica para la definición de las Unidades Hidroestratigráficas (UHE) del acuífero de San Salvador

Figura 4 Secciones seleccionadas del modelo hidroestratigráfico tridimensional (THM) mostrando la distribución de las UHE, el nivel del agua subterránea y las principales fallas. **a)** Sección 1-1' (SO – NE) **b)** Sección 2-2' (SO – NE) **c)** Sección A-A' (O – E) **d)** Sección B-B' (NO –SE) (exageración vertical 10x)

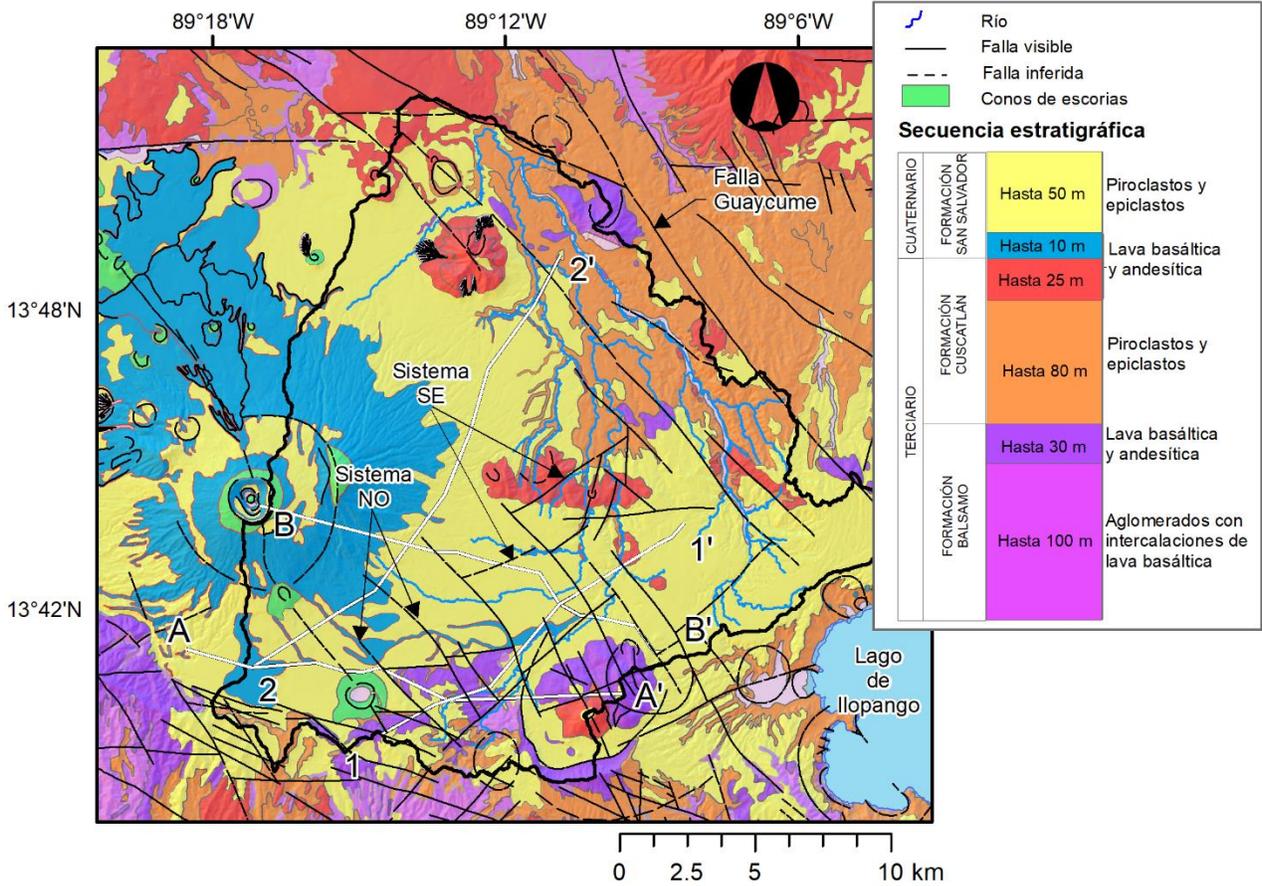
Figura 5 Tendencia del flujo de agua subterránea en el acuífero de San Salvador propuesto por distintos autores: a) ANDA (2008); b) MARN (2016); c) Este estudio indicando además el flujo potencialmente influenciado por fallas geológicas. Las líneas equipotenciales se muestran en blanco. Los círculos y rombos representan pozos de producción utilizado en la construcción del THM, el tamaño es relativo al valor de la conductividad hidráulica y su color se asocia a una UHE. Las flechas en naranja y amarillo indican el tipo de influencia que tienen las fallas en el flujo de agua subterránea de esa zona.

Figura 6 Distribución de caudales de producción en pozos y manantiales en el acuífero de San Salvador. El tamaño del círculo es proporcional al valor de caudal en los rangos indicados. Las líneas equipotenciales se muestran en blanco. Se indica, asimismo, la localización de las principales fallas que influyen el flujo de agua subterránea.

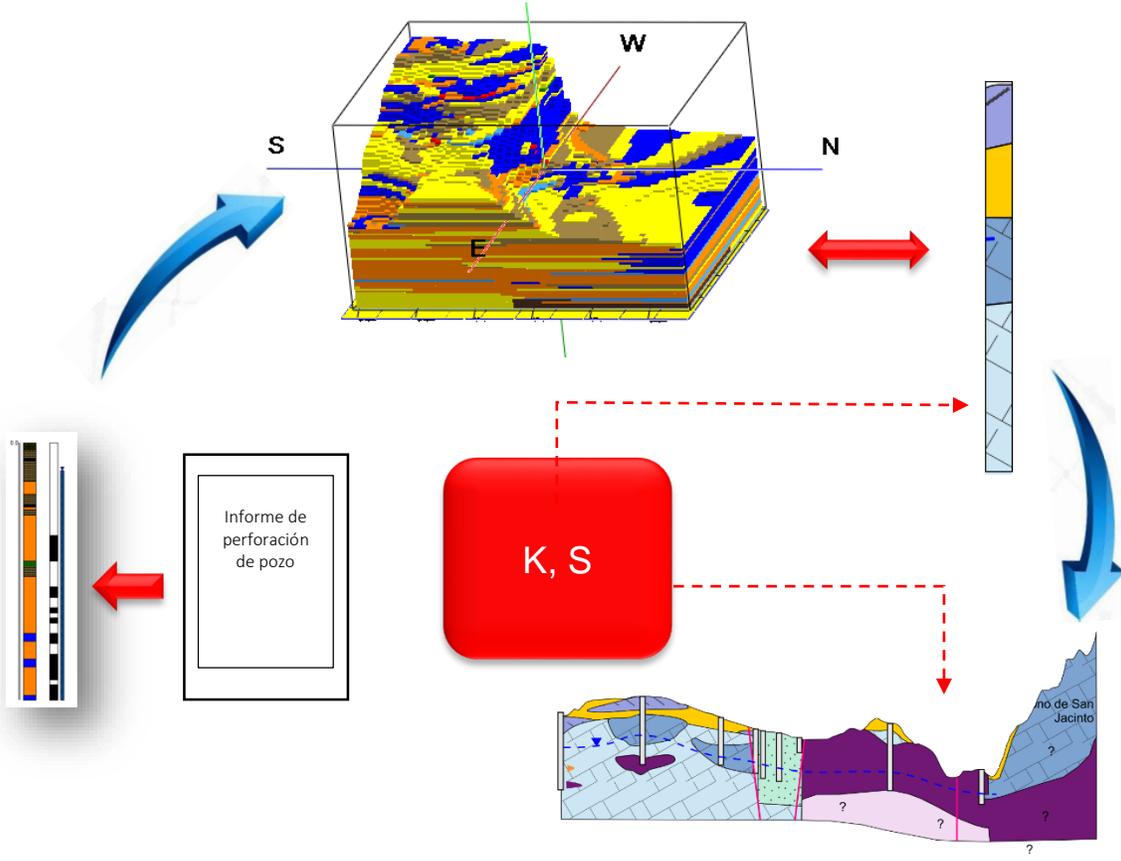
Barrera de Calderón, M.L.- Figura 1



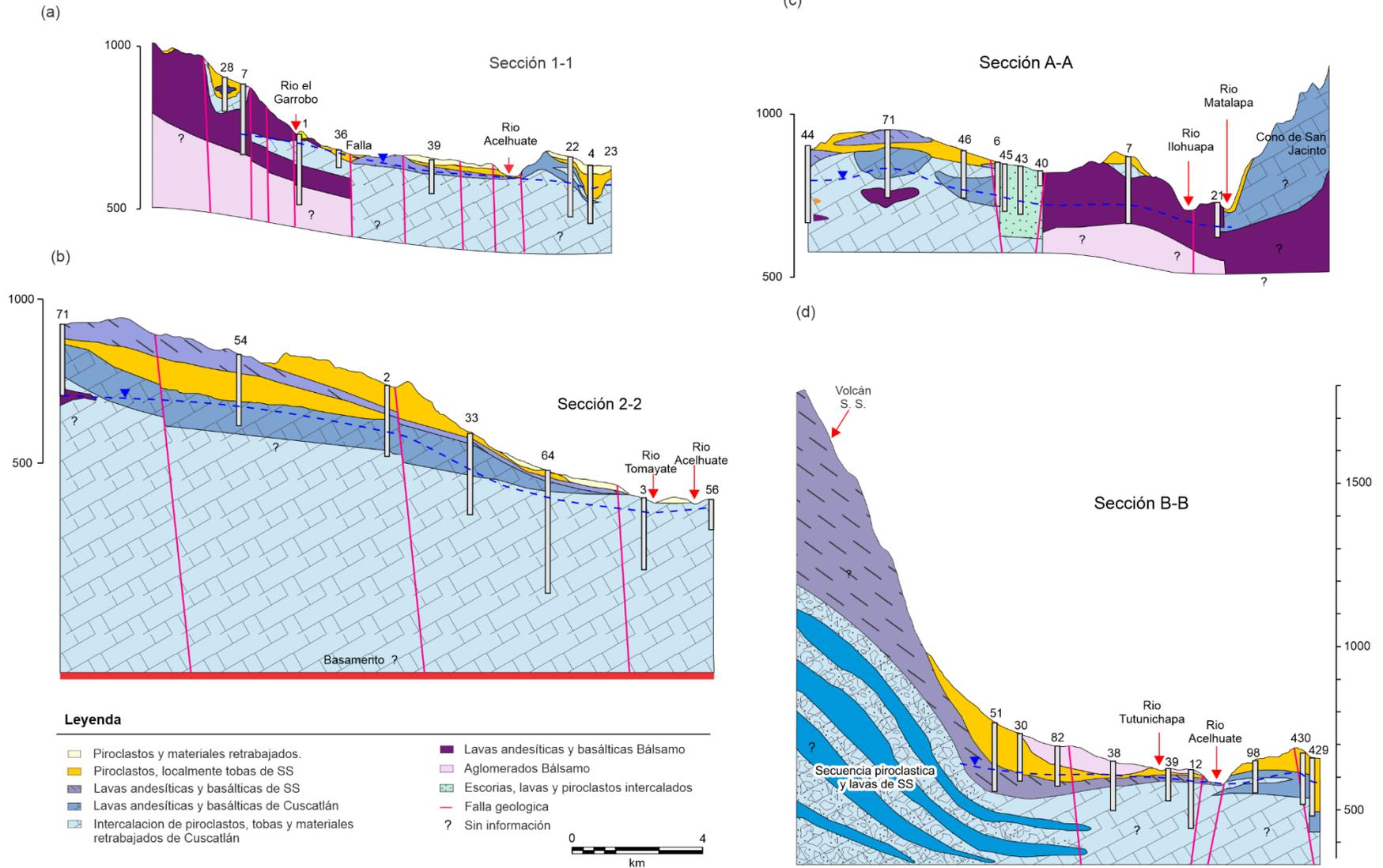
Barrera de Calderón, M.L.- Figura 2



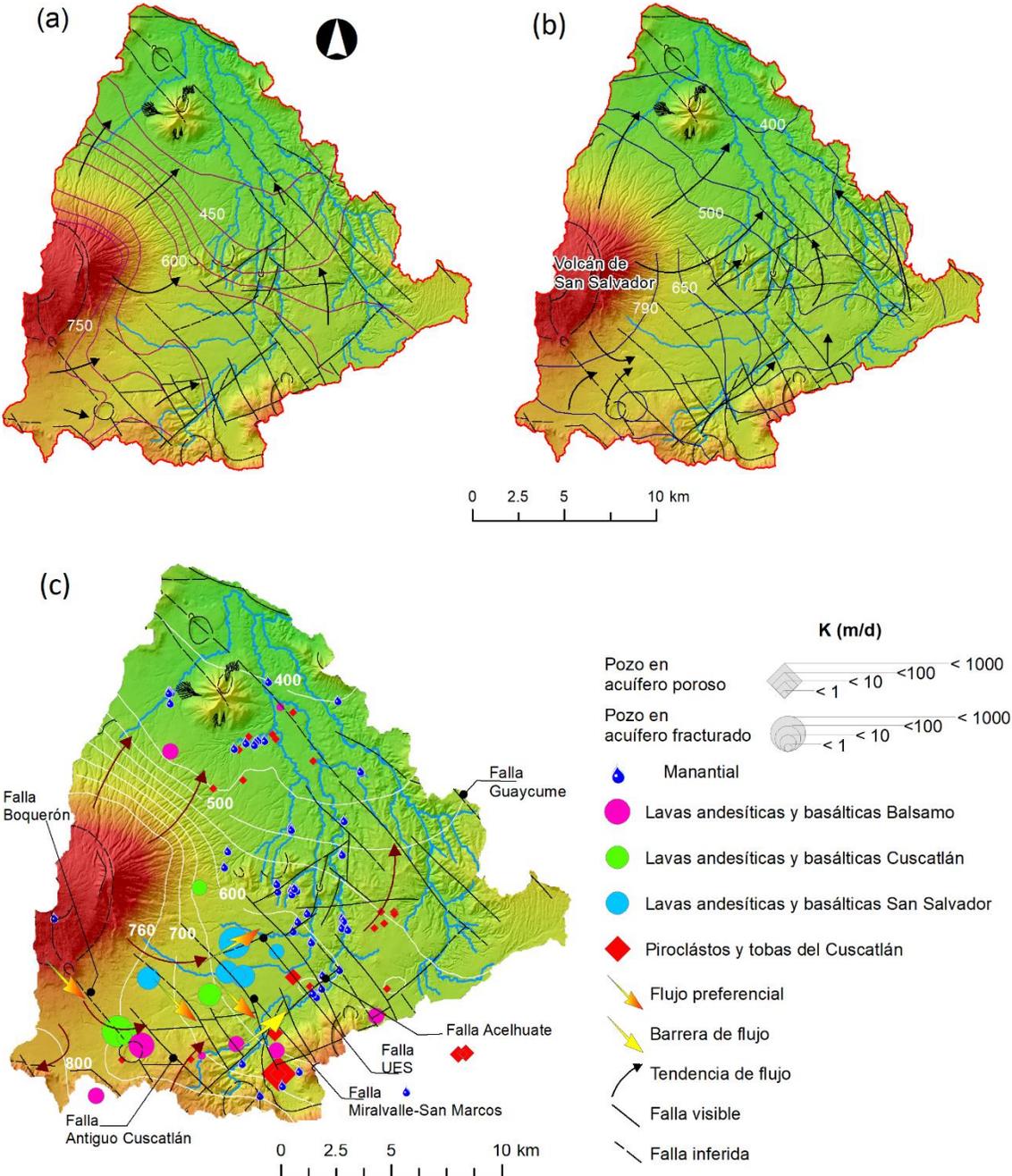
Barrera de Calderón, M.L. - Figura 3



Barrera de Calderón, M.L.- Figura 4



Barrera de Calderón, M.L.- Figura 5



Barrera de Calderón, M.L.- Figura 6

