

LAS FALLAS COMO SISTEMA CONDUCTO, BARRERA O CONDUCTO-BARRERA EN EL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE AGUASCALIENTES. MUNICIPIO DE AGUASCALIENTES

Lilia Guerrero Martínez¹
Martín Hernández Marín²
Juan Antonio Fuentes López³

Resumen

Una falla puede ser considerada hidráulicamente como un conducto, una barrera o una combinación de ambos. En un medio sedimentario si la falla actúa como barrera, se atribuye generalmente a una reducción en la permeabilidad, como resultado del plegado dúctil de material fino que puede rellenar la zona de falla y una deformación cataclástica que reduce la permeabilidad en la zona de daño y alrededor del núcleo, lo que ocasionará segmentación de los sistemas de flujo regionales, anomalías geotérmicas y variación de gradientes hidráulicos. Por otro lado, el comportamiento de las fallas en los sedimentos no consolidados también se describe a menudo como conductos o sistemas combinados que forman rutas preferenciales para los fluidos como el agua. Las fallas se conceptualizan como zonas con una permeabilidad fuertemente anisotrópica, de manera que el flujo se focaliza a lo largo del plano de falla mientras se mantiene una caída de carga hidráulica considerable a

1 Universidad Autónoma de Aguascalientes, 120505@edu.uaa.mx.

2 Universidad Autónoma de Aguascalientes, mhernandez@edu.uaa.mx.

3 Universidad Autónoma de Aguascalientes, geofisicaags@gmail.com

través de ella, y en caso de líquidos contaminantes, éstos tendrán una migración preferente a través de las fallas. Con base en lo anterior se vuelve de especial interés conocer la conducta hidráulica de la falla, su relación con el comportamiento hidrodinámico del acuífero y su rol en la dinámica ambiental. Es por ello que se plantea el análisis por correlación de algunos parámetros como la temperatura y niveles de agua subterránea sobre el sistema de fallas y grietas para determinar su comportamiento como un sistema de barrera, conducto o barrera-conducto. Esta información muestra el impacto de una zona de falla en patrones de flujo poco profundos (<200 m) en el municipio de Aguascalientes. La categorización del comportamiento de las fallas dentro de estos extremos es importante pues pueden tener significativas consecuencias para la determinación del comportamiento hidráulico del acuífero, la evaluación del flujo de contaminantes o la migración de hidrocarburos en sistemas acuíferos sedimentarios cortados por fallas.

Palabras clave: Comportamiento hidráulico de una falla, falla como barrera, falla como conducto, municipio de Aguascalientes, temperatura, nivel estático.

Abstract

A hydraulically failure can be considered as a conduit, a barrier or a combination of both. In a sedimentary environment if the fault acts as a barrier, is generally attributed to a reduction in the permeability, as a result of ductile folding fine material that you can fill in the fault zone and a cataclastic deformation that reduces the permeability in the damage zone and the fault core, which will cause segmentation of the regional flow systems, geothermal anomalies and variation of hydraulic gradients. On the other hand, the conduct of the fault in the unconsolidated sediments are also often described as conduits or combined systems that are preferential routes for the fluids like water. In the latter case faults are conceptualized as zones with a strongly anisotropic permeability so that the flow is focused along the fault plane while maintaining a considerable drop in hydraulic load through the failure and in the case of fluid contaminants, these will have a preferential migration through the faults. For those reasons is important to know the hydraulic behavior of the failure, its relationship with the hydrodynamic behavior of the aquifer and its role in the environmental dynamics. This paper outlines a framework for understanding, comparing, and correlating some parameters such as temperature

and groundwater levels on the system of faults to determine its behavior as a barrier system, conduct or conduct-barrier. This information shows the impact of a fault zone in flow patterns of shallow (<200 m) in the municipality of Aguascalientes. The categorization of the behavior of the failures within these extremes is important because it can have significant consequences for the determination of the hydraulic behavior of the aquifer, the assessment of the flow of pollutants or the migration of hydrocarbons in sedimentary aquifer systems cut by faults.

Keywords: Hydraulic behavior of a failure, Failure as a barrier, Failure as a conduit, Municipality of Aguascalientes, Temperature, Static level.

Introducción

A partir la fundación del estado como la Villa de las Aguas Calientes en 1575, los manantiales y las norias eran la fuente habitual de abastecimiento de agua. Esta situación se mantuvo casi inalterada hasta principios del año de 1940, cuando la demanda agrícola se incrementó, lo que dio inicio a la explotación del acuífero con los primeros 77 pozos profundos para los años de 1944 y 1950. A partir de esta situación y considerando las condiciones geográficas y climatológicas del estado de Aguascalientes, además del crecimiento de la población lo que implica mayor demanda del líquido, desde hace algunos años el acuífero del valle de Aguascalientes se encuentra en condición de sobreexplotación (CONAGUA, 2015). En la actualidad, esto ha generado una enorme presión sobre los recursos naturales de la entidad, siendo el agua uno de los más escasos, debido a la naturaleza del estado como una zona semiárida, y en donde los escasos cuerpos de agua son de uso agrícola, agudizando la situación y generando problemas directamente asociados a la sobreexplotación, dentro de los que se encuentran, el incremento de metales pesados en el agua debido a su extracción a profundidades cada vez mayores, y la deformación superficial observada como subsidencia y fracturamiento (Pacheco-Martínez *et al.*, 2013).

La problemática de subsidencia y fracturamiento no sólo es generada por el bombeo, el valle de Aguascalientes forma un graben tectónico, limitado a nivel regional por fallas normales, con orientación Norte-Sur de 80 km de longitud y 25 km de ancho aproximadamente, en donde las condiciones hidrológicas, hidrogeológicas y antropogénicas favorecen la deformación del terreno.

El bombeo intensivo de las aguas subterráneas ha provocado una disminución de los niveles de agua subterránea, especialmente debajo de la ciudad de Aguascalientes agravando la situación de la aparición de discontinuidades.

Es importante mencionar que a nivel general no existe un análisis de la interacción del sistema de fallas y grietas con el comportamiento hidrodinámico del acuífero, es por ello que surge la necesidad de analizar cómo es que están funcionando hidráulicamente estas discontinuidades y en su caso determinar la relación que tienen en la conducta general del agua subterránea. Tomando como caso particular el municipio de Aguascalientes, este trabajo muestra un análisis por comparación de dos parámetros que describen la conducta de una falla, esto es, a través de la comparación del sistema de fallas y grietas contra los niveles de agua subterránea y las variaciones de temperatura. Datos obtenidos de mediciones en 390 pozos dentro del municipio.

Dentro del objetivo general de la investigación, el plantear el comportamiento hidráulico de la falla, determinándola como una barrera, un conducto o un sistema combinado, a través del análisis de anomalías térmicas y caídas de carga hidráulica contra el sistema de fallas y grietas dentro del municipio de Aguascalientes. Los datos obtenidos corresponden a mediciones de temperatura y nivel estático de 390 pozos dentro del municipio de Aguascalientes.

Área de estudio

El área de estudio corresponde al municipio de Aguascalientes, situado en la región occidental de la Altiplanicie Mexicana, en las coordenadas 21° 53" de latitud norte, 102° 18" de latitud oeste a una altura de 1,870 metros sobre el nivel del mar, limita al norte con los municipios de Asientos y Pabellón Arteaga, al sur y oriente con el estado de Jalisco y al poniente con los municipios de Jesús María y Calvillo, (Figura 1). Cuenta con una superficie de 1,204.24 kilómetros cuadrados, representando el 21.2 por ciento del territorio del estado (INEGI, 2017). Tiene una configuración plana con suaves lomeríos dispersos en algunas áreas, y pendientes que crecen hacia las sierras; se encuentra localizado entre la Sierra de Tepezalá y la Sierra Fría. El municipio de Aguascalientes está comprendido dentro de tres grandes provincias que son: la Sierra Madre Occidental, la Mesa del Central y el Eje Neovolcánico, las rocas que predominan en la entidad son las rocas ígneas extrusiva como las riolitas, las que le siguen son las rocas sedimen-

tarias como las areniscas, conglomerados y calizas. El clima del municipio es semiárido, con una temperatura media anual de 17 °C, registrándose las más altas temperaturas en los meses de abril, mayo y junio, y las más bajas en los meses de septiembre, enero y febrero. La precipitación pluvial es de 526 milímetros, con lluvias abundantes en verano y poca intensidad el resto del año. Los vientos dominantes son alisos en dirección sureste-noreste durante el verano y parte del otoño (INEGI, 2017).

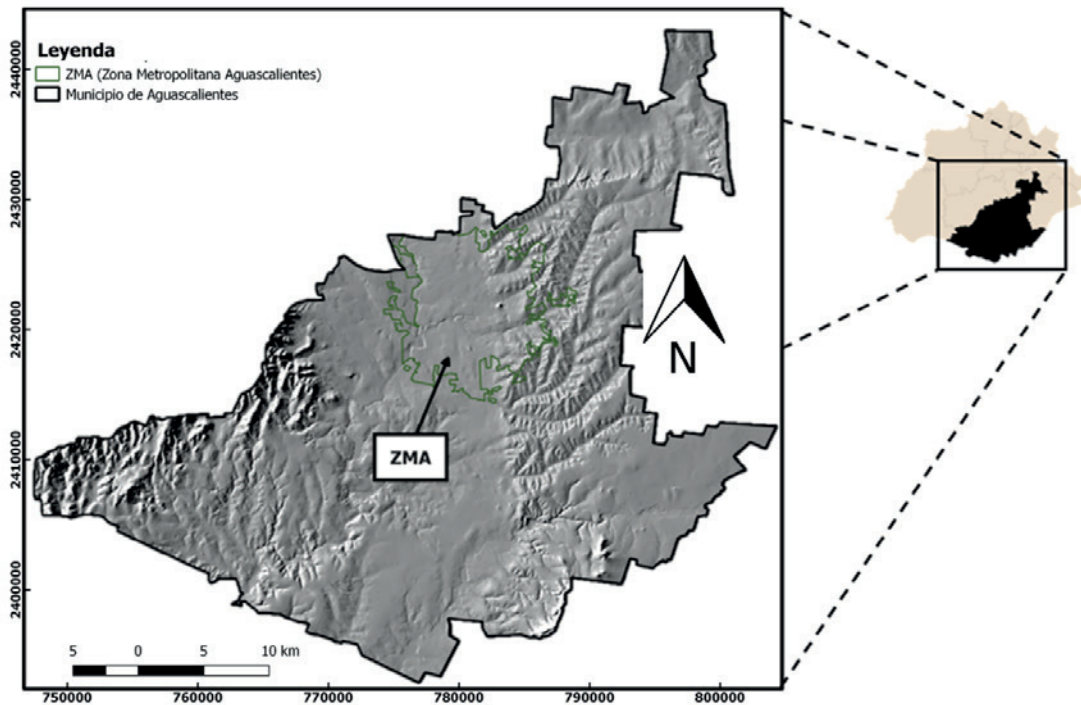


Figura 1. Localización del área de estudio. Se indican la Zona Metropolitana de Aguascalientes (ZMA) correspondiente al municipio con coordenada en WGS 84 / UTM Zona 13Q norte. Fuente: Elaboración propia.

Metodología

Con relación al sistema de fallas y grietas sabemos que las fallas se pueden comportar hidráulicamente como barreras, conductos o sistemas combinados para los fluidos, en donde éstos pueden ser agua subterránea, lluvia o fluidos contaminantes. Esta facilidad de flujo es controlada por el porcentaje de material y la escala de grano del mismo dentro del núcleo de falla y de las estructuras

de la zona de daño. Las conductas pueden ser verticales y horizontales y están en función de la permeabilidad del núcleo de la falla (Caine *et al.*, 1996). Si los elementos dentro del núcleo de falla en su mayoría son de material grueso, la permeabilidad de la falla se incrementará y se comportará como un conducto generando un camino preferencial para los fluidos. Ahora bien, si los elementos dentro del núcleo de la falla se componen en su mayoría de material fino, la permeabilidad de la falla disminuirá consideradamente y se comportará como una barrera, lo que provocará que a nivel general, exista una segmentación del flujo dentro del acuífero y, por lo tanto, hay una variación de gradiente hidráulico además de la presencia de anomalías geotérmicas, (Bense *et al.*, 2008; Bense y Van Balen, 2004), es decir que antes y después de la falla los niveles y la temperatura del agua subterránea no sean iguales.

Concretamente para el municipio de Aguascalientes, se analizaron dos de los parámetros que determinan el comportamiento de una falla, a través de la comparación del sistema de fallas y grietas contra los niveles de agua subterránea y las variaciones de temperatura dentro del municipio. Para ello se obtuvieron datos de 390 pozos de extracción (Figura 2) donde se midieron temperaturas y profundidades de agua subterránea. En la Figura 3 y 4, respectivamente, se muestran mapas de las mediciones obtenidas.

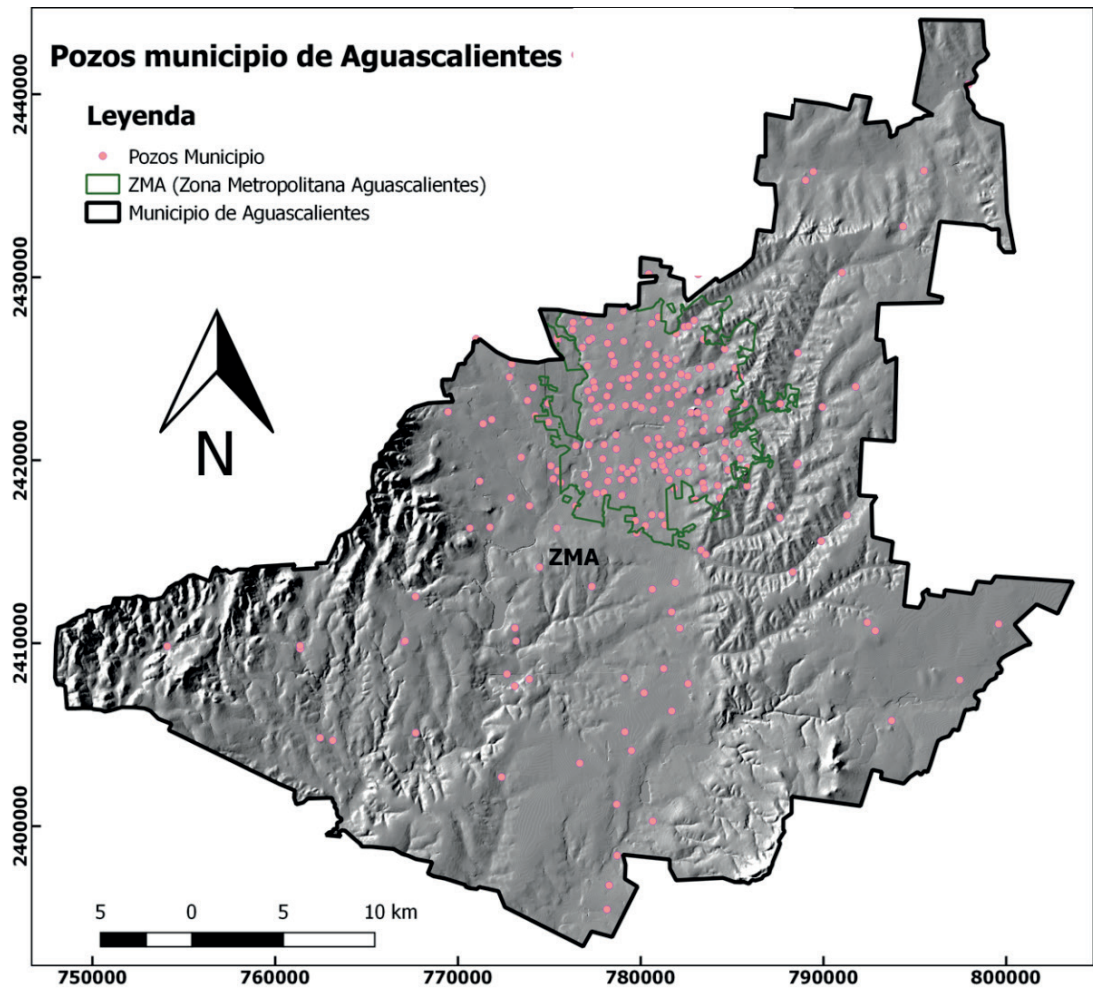


Figura 2. Localización de pozos dentro del municipio de Aguascalientes. Se indica la Zona Metropolitana de Aguascalientes (ZMA) correspondiente al municipio con coordenada en WGS 84 / UTM Zona 13Q norte. Fuente: Elaboración propia.

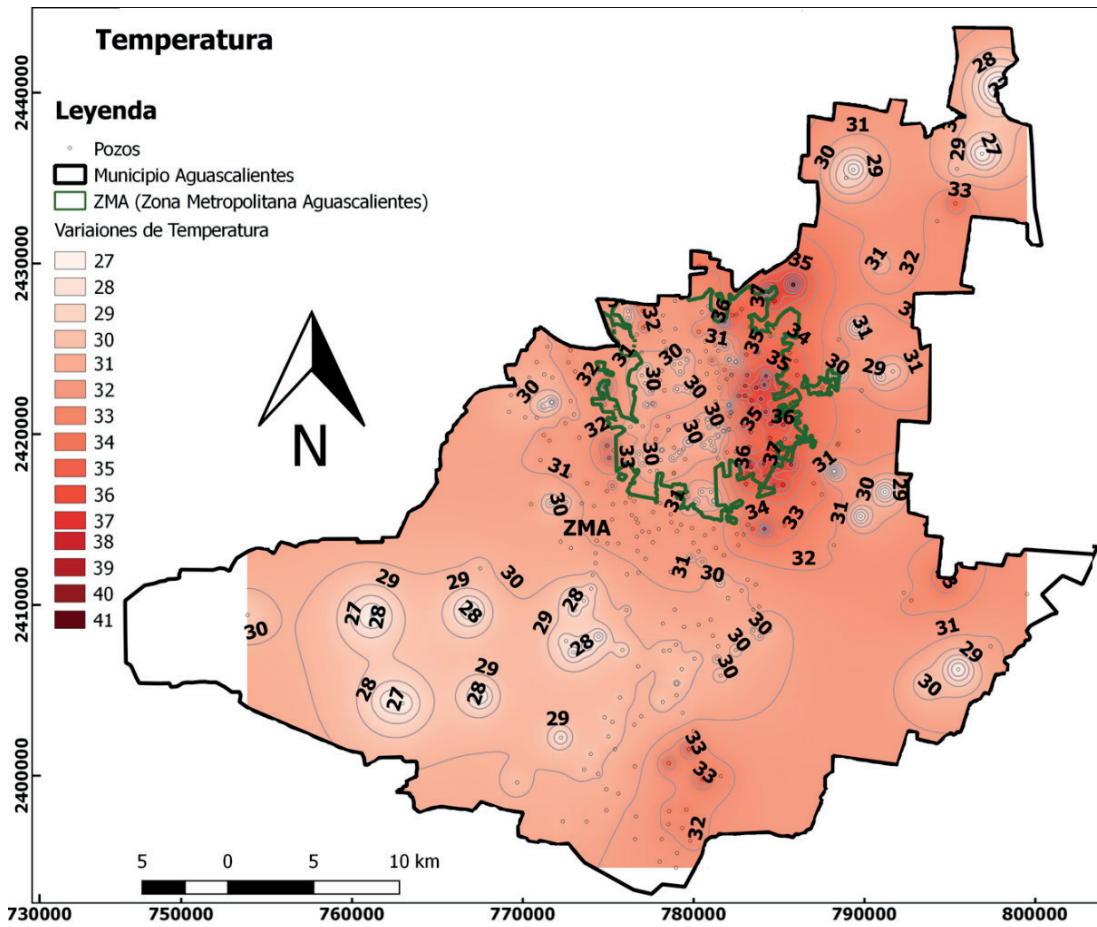


Figura 3. Variación de temperaturas en pozos dentro del municipio de Aguascalientes. Se indica la Zona Metropolitana de Aguascalientes (ZMA) correspondiente al municipio con coordenada en WGS 84 / UTM Zona 13Q norte. Fuente: Elaboración propia.

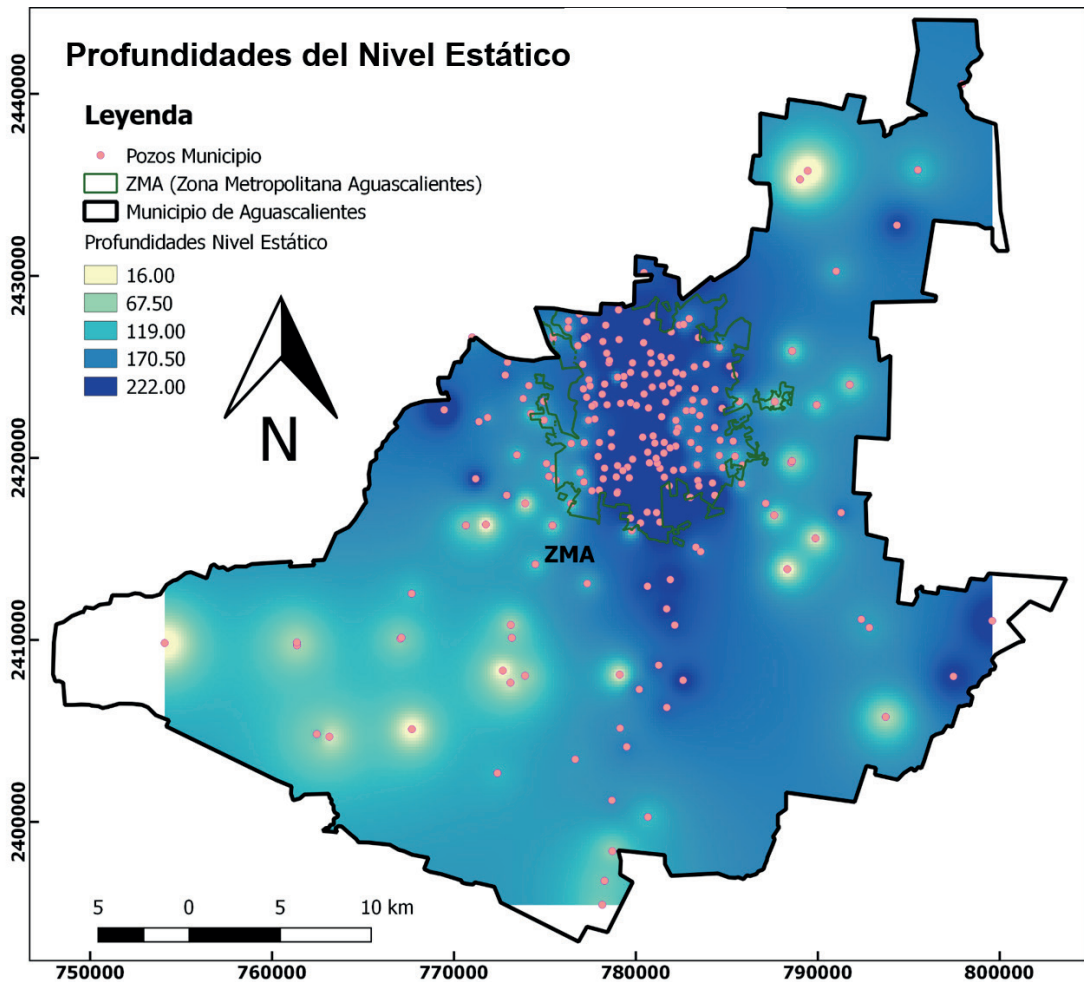


Figura 4. Variación de profundidades del nivel estático dentro del municipio de Aguascalientes. Se indica la Zona Metropolitana de Aguascalientes (ZMA) correspondiente al municipio con coordenada en WGS 84 / UTM Zona 13Q norte. Fuente: Elaboración propia.

A partir de determinar la temperatura y la profundidad de los niveles estáticos dentro del estado, se realizó un análisis por comparación de esta información, donde primeramente se ubicó el sistema de fallas y grietas (Figura 5) y posteriormente se localizaron sobre éste los mapas de variaciones de temperatura y de profundidad del nivel estático. Para el análisis particular del municipio se hizo un especial énfasis en la falla oriente, debido a que en este lugar se presentan anomalías tanto térmicas como de caída de carga hidráulica, con características más evidentes. En la Figura 6 se representa la localización del sistema de fallas y grietas y variaciones de temperatura; como se puede observar, las diferencias más

evidentes se presentan al oriente del municipio y corresponden a la ubicación de la falla oriente. Al igual que la temperatura, las variaciones más evidentes en la Figura 7 corresponden al oriente del municipio donde se aprecia que dentro de la zona metropolitana de Aguascalientes (ZMA) se tienen los niveles más bajos de niveles de agua subterránea con respecto al lado izquierdo de la falla oriente.

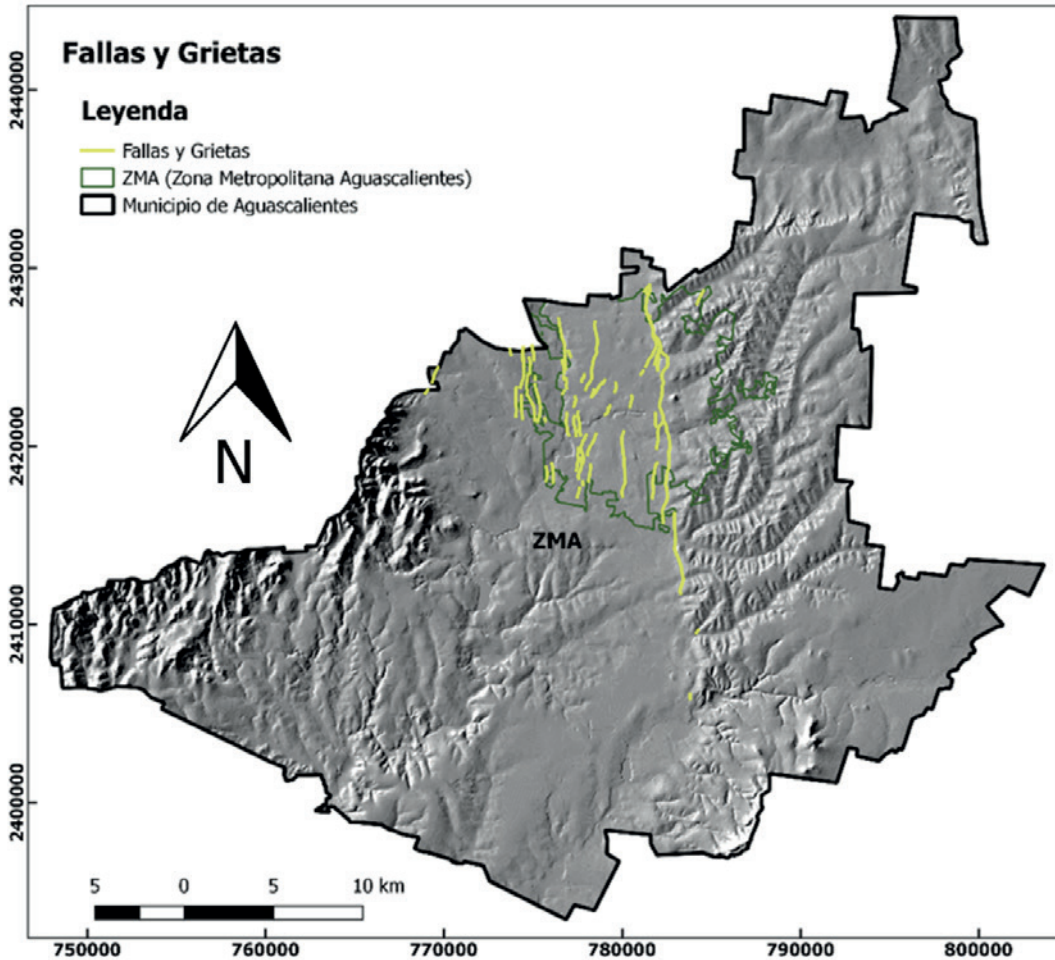


Figura 5. Sistema de fallas y grietas dentro del municipio de Aguascalientes, modificadas de SIFAGG (2010). Se indican la Zona Metropolitana de Aguascalientes (ZMA) correspondiente al municipio con coordenada en WGS 84 / UTM Zona 13Q norte. Fuente: Elaboración propia.

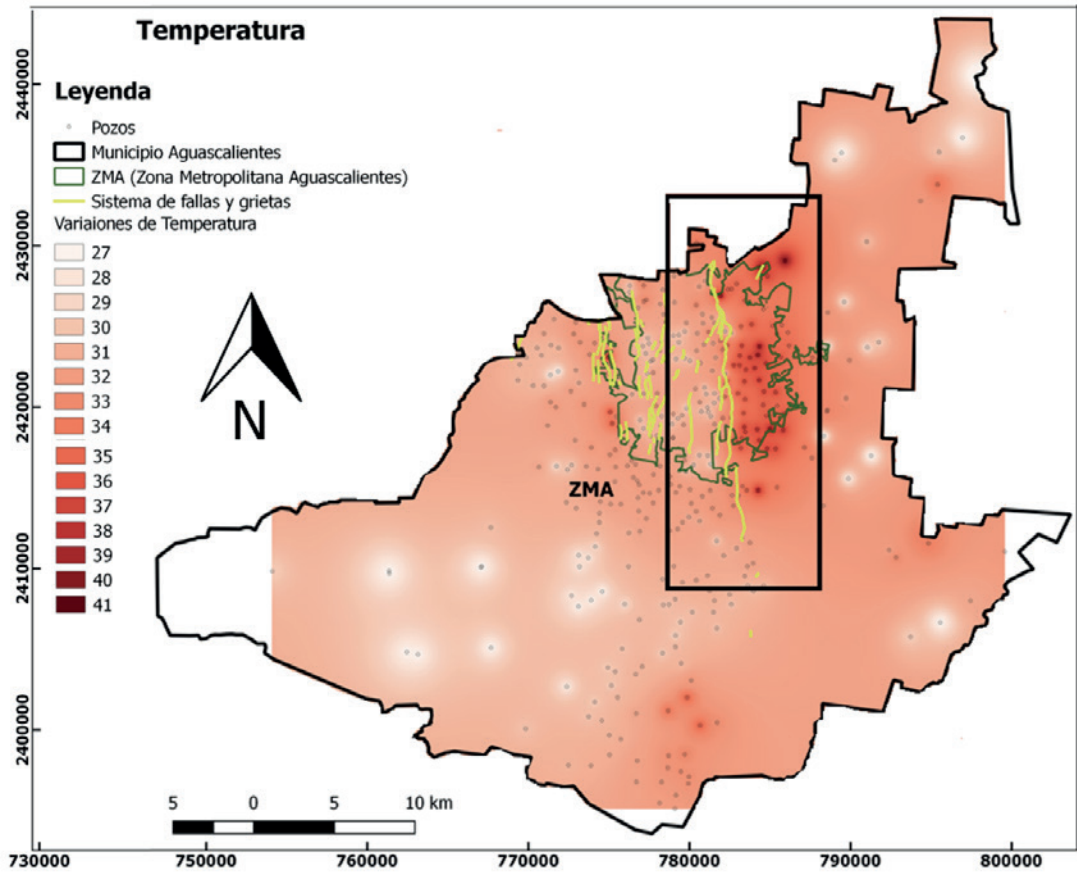


Figura 6. Comparación del sistema de fallas y grietas y las variaciones de temperatura dentro del municipio de Aguascalientes. Se indica la Zona Metropolitana de Aguascalientes (ZMA) correspondiente al municipio con coordenada en wgs 84 / UTM Zona 13Q norte.
Fuente: Elaboración propia.

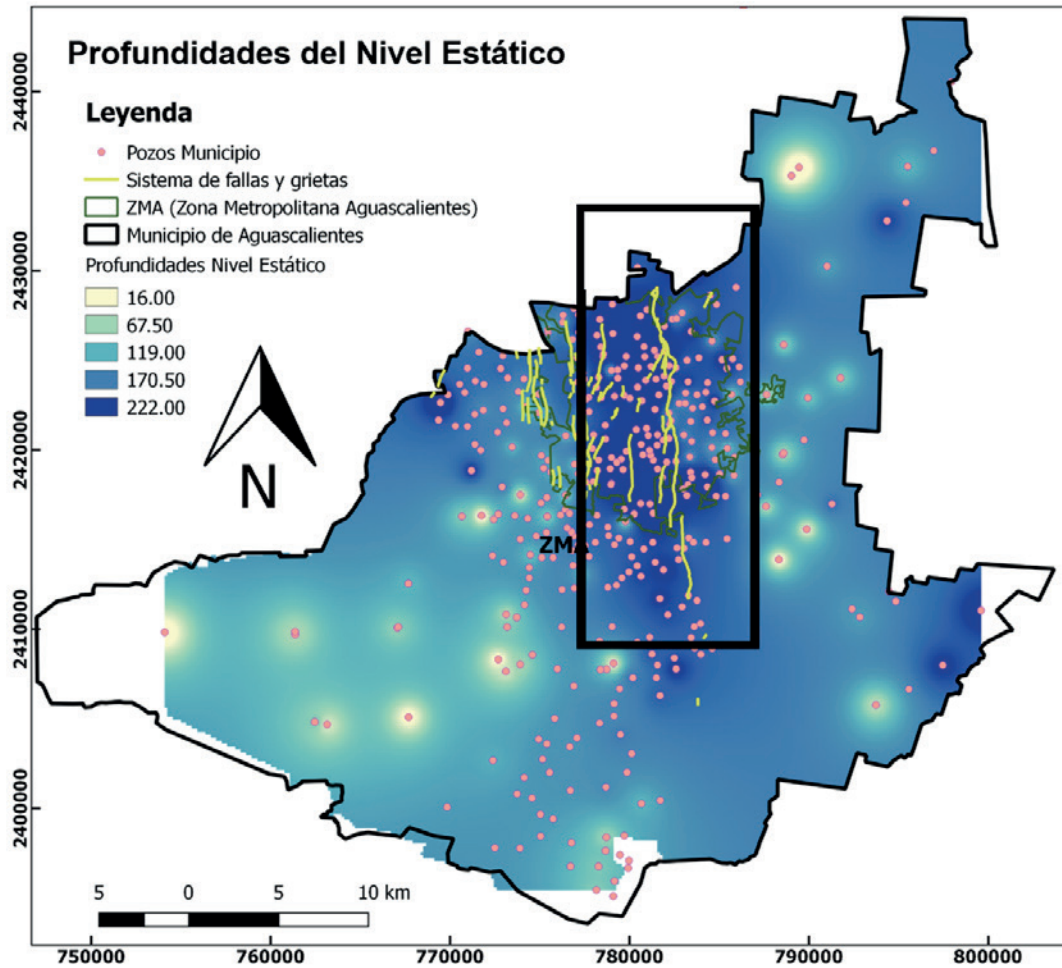


Figura 7. Comparación del sistema de fallas y grietas y las variaciones de profundidad del nivel estático dentro del municipio de Aguascalientes. Se indica la Zona Metropolitana de Aguascalientes (ZMA) correspondiente al municipio con coordenada en WGS 84 / UTM Zona 13Q norte. Fuente: Elaboración propia.

Resultados

A partir del análisis realizado, se observa que sobre la falla oriente se presentan anomalías tanto geotérmicas como de caída de carga hidráulica. En particular en el caso de las variaciones de temperatura se observa que a la derecha de la falla se tiene una temperatura mayor con respecto al lado izquierdo de la misma. Esta variación podría indicar que en este tramo de la falla oriente, el comportamiento hidráulico tiene características de barrera; si se

analiza detalladamente, se puede observar que, no a todo el largo de la falla dentro del municipio, existe la misma variación. En la Figura 8 se resalta la falla oriente y la diferencia de temperatura a cada lado, las variaciones de temperatura presentadas varían de los 5° a los 2°, según Bense *et al.* (2008) una variación alta de temperatura se encuentra alrededor de los 8°, entonces podríamos decir que 5° presenta un buen parámetro de referencia.

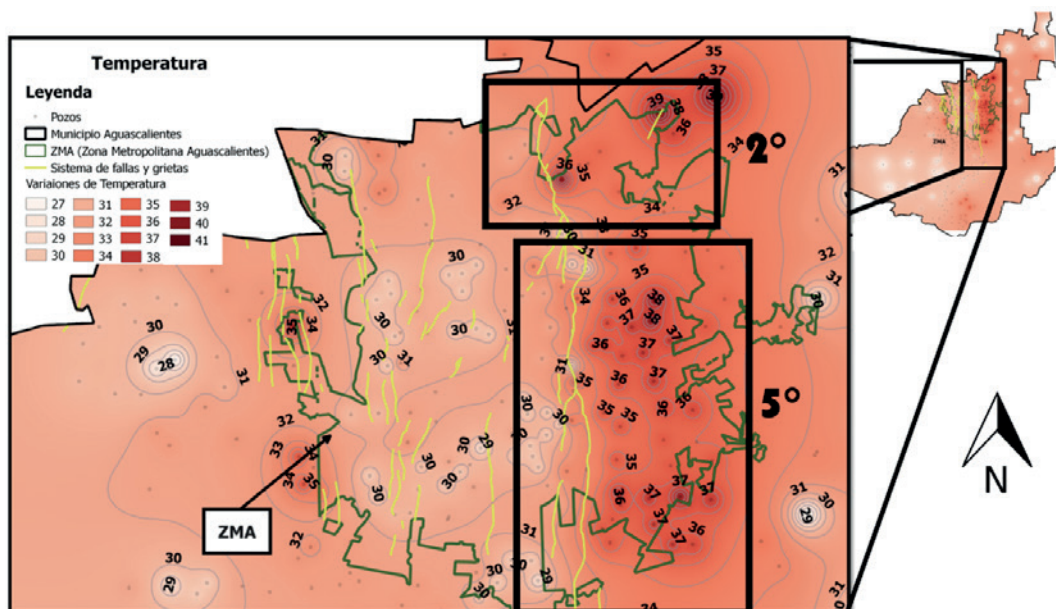


Figura 8. Comparación de anomalías geotérmicas y la falla oriente. Se indica la Zona Metropolitana de Aguascalientes (ZMA) correspondiente al municipio con coordenada en WGS 84 / UTM Zona 13Q norte. Fuente: Elaboración propia.

Ahora, si se compara la misma zona pero con las variaciones de profundidad mostradas en la Figura 9, se observa que presenta algunas similitudes. En términos generales se sabe que los altos gradientes hidráulicos, inducidos por bombeo, sobre un sistema de fallas y grietas sugieren que éstas forman barreras efectivas para el flujo lateral del agua subterránea. (Bense *et al.* 2008), lo que debe ser corroborado con el análisis de otros parámetros, como los perfiles longitudinales y transversales del área de estudio y pruebas de permeabilidad de la falla.

De igual manera, sobre la falla oriente se observa un patrón de referencia con respecto a variación de los niveles antes y después de la falla, es decir, en donde existe una diferencia de 5° en la temperatura, también se observa una caída de gradiente hidráulico.

co con una variación entre los 25 a 65 metros de profundidad, y en donde existe una diferencia de 2° en temperatura, la variación en nivel no se ve tan segmentada, esto probablemente indique que en esta zona la falla oriente muestra un comportamiento hidráulico como un sistema de conducto.

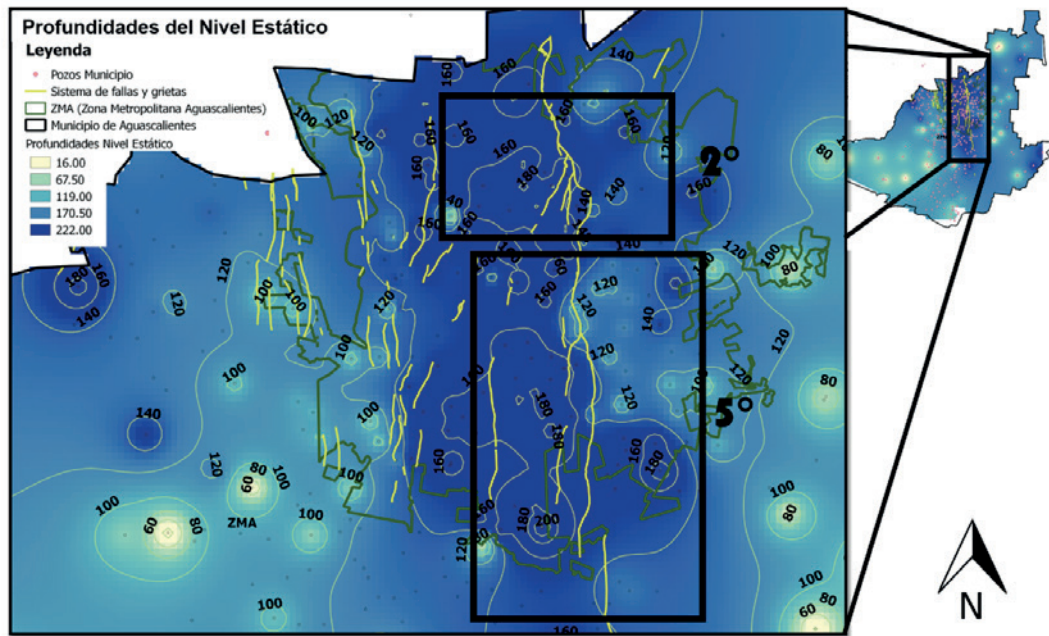


Figura 9. Comparación de caídas de carga hidráulica y la falla oriente. Se indica la Zona Metropolitana de Aguascalientes (ZMA) correspondiente al municipio con coordenada en WGS 84 / UTM Zona 13Q norte. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Se concluye que el comportamiento hidráulico de las fallas se ilustra mediante ejemplos dentro del municipio de Aguascalientes haciendo énfasis en la falla oriente. En ésta se observan anomalías de carga hidráulica que se encuentran en el rango de los 25 a los 65 metros de profundidad asimismo, las anomalías térmicas presentan variaciones de hasta 5° en distancias cortas y representadas en las mismas áreas donde se observa la caída de carga, esto nos marca un primer indicio de que, la falla oriente en esta zona puede estar comportándose como sistema de barrera.

Asimismo, no toda la trayectoria de la falla dentro del municipio muestra las mismas características, al norte, presenta com-

portamiento de conducto, dado que la variación de la temperatura y de la profundidad del nivel estático es mucho menor, mostrando una variación de temperatura de 2° y con caídas hidráulicas menores a 20, por lo tanto se puede concluir que la falla oriente de manera general dentro del municipio de Aguascalientes, presenta características hidráulicas de un sistema de Conducto-Barrera.

Es importante mencionar que es necesario realizar un análisis a mayor profundidad en donde se realicen perfiles transversales y longitudinales de la falla, además de pruebas de permeabilidad y de muestras de material con la finalidad de corroborar esta teoría.

La determinación del comportamiento no sólo es importante a nivel hidráulico, sino también ambiental ya que al conocer la conducta hidráulica de las fallas se determinan zonas vulnerables a posibles infiltraciones de contaminantes.

Referencias

- Bense, V. F. y Van Balen, R. T. (2004). *The Effect of Fault Relay and Clay Smearing on Groundwater Flow Patterns in the Lower Rhine Embayment' Basin Research*, vol 16, pp. 397-399, 410, pp. 397-411. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2004.00238.x
- Bense, V.F., Pearson, M.A., Chaudhary, K., You, Y., Cremer, N. y Simon, S., (2008). Thermal Anomalies Indicate Preferential Flow Faults in Unconsolidated Sedimentary Aquifers. *Geophysical Research Letters*, 35, pp. 1-6, pp. 1-6. L24406, DOI:10.1029/2008gl036017.
- Caine, J.S., Evans, J. P., Forster, C. B., (1996). *Fault Zone Architecture and Permeability Structure Geology*, pp. 1025, 1025-1028.
- Comision Nacional del Agua (CONAGUA), 2015, *Estadísticas del agua en México edición 2014*, Anexo B, pp. 190
- INEGI, (2017). *Portal de Gobierno del Estado de Aguascalientes*, s.l.: s.n.
- Secretaría de Obras Públicas del Gobierno del Estado de Aguascalientes (2010), *Sistema de Información de Fallas Geológicas y Grietas - SIFAGG* [Online] <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1XSh-qhhWHKsMsdJUhAa9My8xDwA&hl=es&ll=21.93248851121791%2C-101.00014519726562&z=8> [6 de octubre 2017].
- Pacheco-Martínez, J., Hernández-Marín, M., Burbey, T. J., González-Cervantes, N., Ortiz-Lozano, Á., Zermeno-De-

León, M., Solís-Pinto, A., (2013), *Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México*. *Engineering Geology*, (164), pp. 172-180, pp. 172–186.