

Análisis Estructural y Mapeo de Favorabilidad de Permeabilidad en el Campo Geotérmico de Ahuachapán

García Zamorano, Eduardo Alfredo*¹

¹Área de Geología, LaGeo, Santa Tecla, La Libertad, El Salvador.
(E-mail: egarcia@lgeo.com.sv)

Keywords: geology, structural geology, structural feasibility.

Resumen

Durante la etapa de exploración y desarrollo de campos geotérmicos, el análisis estructural es fundamental para comprender las características del campo. Este estudio investiga la relación entre el fallamiento estructural y la permeabilidad, evidenciada por manifestaciones hidrotermales. Se categorizaron estas manifestaciones según su asociación con arreglos estructurales, encontrando que la mayoría están vinculadas a configuraciones de terminación de falla tipo cola de caballo y fallamiento normal (32%), seguidas por intersecciones de fallas. Mediante un análisis estadístico, se determinó la frecuencia de sistemas estructurales, tanto aislados como en intersección, asociados a manifestaciones hidrotermales. Los sistemas con mayor incidencia fueron el N-S (32%), el NO-SE (23%) y la intersección NO-SE/ONO-ESE (16%). Con base en estos resultados, se desarrolló un mapa de favorabilidad de permeabilidad, destacando la zona central del campo y una región en Cuyanausúl con intersecciones de las familias N-S y NO-SE, y una zona potencialmente favorable en el sur del campo. Este estudio proporciona información valiosa para la exploración y desarrollo de campos geotérmicos, identificando áreas con mayor potencial de permeabilidad.

Abstract

During the exploration and development stage of geothermal fields, structural analysis is essential to understand the field's characteristics. This study investigates the relationship between structural faulting and permeability, as evidenced by hydrothermal manifestations. These manifestations were categorized based on their association with structural arrangements, finding that most are linked to horse-tail fault termination configurations and normal faulting (32%), followed by fault intersections. Through statistical analysis, the frequency of structural systems—both isolated and intersecting—associated with hydrothermal manifestations was determined. The systems with the highest incidence were N-S (32%), NW-SE (23%), and the NW-SE/WNW-ESE intersection (16%). Based on these results, a permeability favorability map was developed, highlighting the central zone of the field and a region in Cuyanausúl with intersections of the N-S and NW-SE families, as well as a potentially favorable zone in the southern part of the field. This study provides valuable information for the exploration and development of geothermal fields, identifying areas with higher permeability potential.

Introducción

El campo geotérmico de Ahuachapán (CGAH) ubicado en El Salvador comprende dos áreas de interés geotérmico: Ahuachapán (centro-oeste) y Cuyanausúl (este). El CGAH se ubica cerca de un límite convergente oblicuo entre las placas de Cocos y Caribe y una falla transformante sinestral entre la placa del Caribe y la de Norteamérica. La evolución tectónica consiste en una primer etapa extensiva de estructuras E-O por un cambio de ángulo en la placa subducida ('rollback'). Posteriormente, se instaura un régimen transtensivo derivado del movimiento relativo de la placa del Caribe hacia el este y la subducción oblicua de la placa de Cocos. Esta disposición reactiva las estructuras E-O y las transforma en fallas de rumbo dextrales con componente normal. Particularmente, la zona del CGAH se ve afectada por un esfuerzo extensivo E-O producto del acoplamiento de la Placa del Caribe cerca de la zona de sutura entre las Placas de Cocos, Norteamérica y Caribe [3] [1] [4]. El arreglo estructural del actual régimen tectónico conforma un enrejado complejo de fallas y estructuras en el CGAH.

El objetivo de este trabajo es caracterizar el sistema de fallas, a partir de lo cual se busca relacionar los arreglos estructurales con la incidencia de manifestaciones hidrotermales para estimar zonas de factibilidad de permeabilidad en profundidad en el CGAH. El análisis estructural está basado en los trabajos de [2] y [5], de los cuales se explora su reproducibilidad a una menor escala. En el primer trabajo se identificaron los tipos de arreglos estructurales (*Figura 2*) que están mayormente presentes en sistemas geotérmicos en el Basin & Range en EUA. En el segundo, se propone un modelo numérico que permite identificar las zonas con mayor permeabilidad en dichos arreglos estructurales.

Metodología

Se realizó un censo de las manifestaciones hidrotermales, primero, se asociaron a los arreglos estructurales (*Figura 2*) que [2] proponen, segundo, se identificó la familia estructural a la que pertenecen cada uno de los arreglos estructurales identificados.

A partir de este análisis se desarrolló un método de ponderación. Se asignó un factor de peso a cada una de las familias estructurales o intersección de falla en función de la frecuencia con que inciden en la aparición de fuentes hidrotermales, es decir, un valor mayor a las familias o intersecciones de familias con mayor ocurrencia de fuentes calientes, y viceversa.

Con el sistema de ponderación se realizó una red de puntos sobre las estructuras del CGAH, donde cada punto tiene asignado un valor de peso asignado. Con la red de puntos se interpolaron los valores en un mapa de tipo

ráster que se propone que represente las zonas de favorabilidad de permeabilidad basado en el análisis estadístico de fallas y fumarolas (*Figura 1*).

Resultados

En el CGAH se identificaron cinco familias de fallas principales: E-O, ONO-ESE, N-S, NE-SO y NO-SE. Se observó que el 32% de las manifestaciones hidrotermales están asociadas con un arreglo estructural de tipo cola de caballo, otro 32% a un tipo de fallamiento normal, el 16% a intersecciones de fallas, el 9% a un arreglo propuesto en este trabajo de estructura volcánica (*Figura 2*).

El análisis determinó que la familia estructural con mayor presencia de manifestaciones hidrotermales es la N-S seguida por la NO-SE, así como también la intersección entre NO-SE y ONO-ESE. De igual forma, de acuerdo con el análisis de Faulds et al. (2013) se logró proponer dirección de echado en la F. Buenavista hacia el SO y la F. San Antonio hacia el SE.

Para el análisis de mapa de favorabilidad en permeabilidad se segmentó el campo en tres zonas: este, centro y oeste. La zona oeste destaca únicamente un área de la intersección de la familia NO-SE (F. El Molino) con el patrón ONO-ESE. La zona centro destaca el área de pozos productores en el centro del campo entre las Fallas Buenavista y Los Ausoles, cuyo rumbo de las fallas es NO-SE y ONO-ESE. En la zona centro también se denotan áreas sin explorar donde se intersecta la F. Buenavista y la F. San Antonio, también en la F. El Playoncito que tiene una terminación de cola de caballo. Así mismo, destaca la intersección de las F. Oriental B y A, y la intersección de la F. Tacubita y Escalante, ambas áreas representan intersecciones de las familias NE-SO con NO-SE. Para el área este en el área geotérmica de Cuyanausúl se denota un área de favorabilidad en la estructuras N-S de la F Cuyanausúl, y otra más en la F. Tortuguero que intersecta un tren estructural NO-SE.

Discusión

A partir del censo de las manifestaciones asociándolas a los arreglos estructurales se resalta que el arreglo de cola de caballo junto con la de fallamiento normal son las que proyectan mayor probabilidad en permeabilidad. Por un lado, la cola de caballo representa la terminación de un segmento de falla que manifiesta una zona de transferencia de esfuerzos, donde ocurre mayor deformación. Por otro lado, el fallamiento normal es inherente al régimen tectónico de esfuerzos de la región: 1) La familia N-S que está presente como respuesta al esfuerzo extensivo E-O y la que mayor incidencia de manifestaciones termales presenta, y 2) La familia NO-SE que forma parte de las estructuras de la ZFES, que además de ser la segunda familia a la que mayormente se asocia con manifestaciones calientes, también cuando se intersecta con la familia ONO-ESE se reporta permeabilidad.

Para el análisis de mapa de favorabilidad en permeabilidad (*Figura 1. Mapa de favorabilidad de permeabilidad del CGAH, los colores café oscuro muestran las áreas de mayor favorabilidad de permeabilidad.*): La zona oeste destaca el dominio de la familia NE-SO en el sector occidental del CGAH pero que representa una zona de escaso interés en términos de permeabilidad por la ausencia de manifestaciones hidrotermales. La zona centro destaca las áreas de intersección de las familias NE-SO y NO-SE. Para la zona este se denotan áreas de favorabilidad que están controladas por el fallamiento normal del sistema N-S, y que a su vez está potenciado por la intersección con el sistema NO-SE.

Conclusión

El censo y análisis de cada una de las manifestaciones hidrotermales asociado con el sistema estructural puede ser representado en un mapa de favorabilidad de permeabilidad que ayuda a visualizar potenciales áreas con posible actividad hidrotermal ciega a profundidad. A partir del análisis se propone la dirección de echado de las Fallas Buenavista y San Antonio basado en el análisis de [2].

La zona este, Cuyanausúl, se identificó a la familia N-S y a la intersección de N-S y NO-SE como los patrones más favorables para la permeabilidad. En la zona centro destacan las intersecciones NO-SE con NE-SO, N-S con NE-SO y NO-SE con ONO-ESE.

Figura 2. Ejemplos de los arreglos estructurales encontrados en el campo de Ahuachapán y Cuyanausúl. 1) Terminación de falla en cola de caballo; 2) Fallamiento normal; 3) Intersección de fallas; 4) Curvamiento de falla; 5) Estructura volcánica (Faulds et al. 2013; Siler 2023).

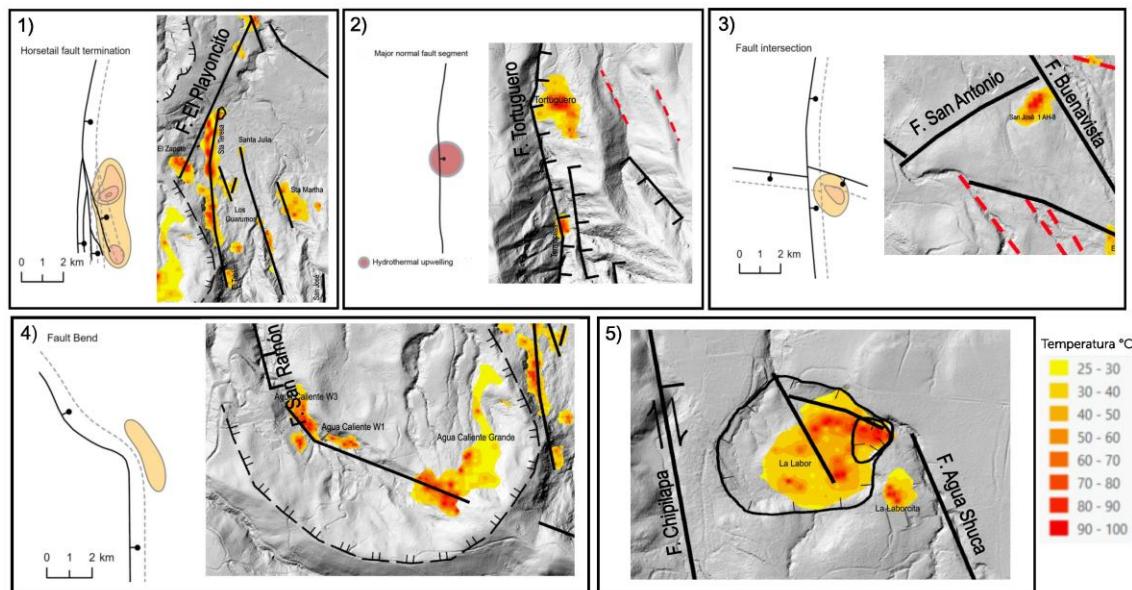
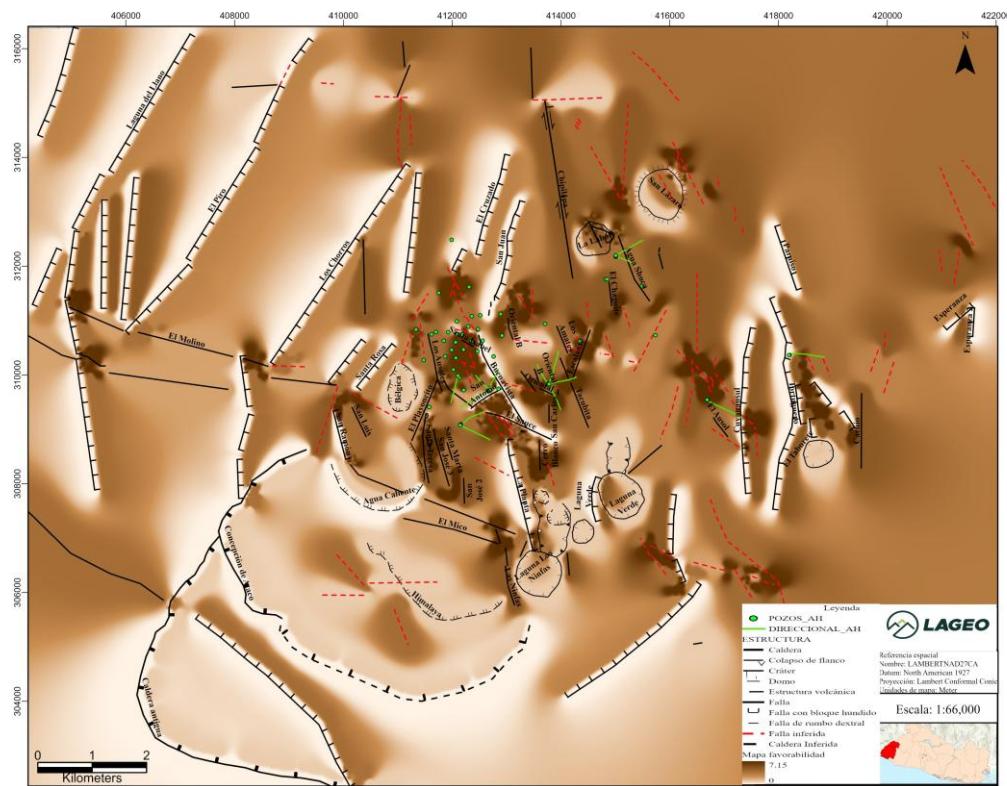


Figura 1. Mapa de favorabilidad de permeabilidad del CGAH, los colores café oscuro muestran las áreas de mayor favorabilidad de permeabilidad.



Referencias

- [1] Alonso-Henar, J., Schreurs, G., Martinez-Díaz, J. J., Álvarez-Gómez, J. A., Villamor, P. 'Neotectonic development of the El Salvador Fault Zone and implications for deformation in the Central America Volcanic Arc: Insights from 4-D analog modeling experiments'. *Tectonics*, 2015, 34, 133–151, doi:10.1002/2014TC003723.
- [2] Faulds, J. E., Hinz, N. H., Dering, G. M., & Siler, D. L. 'The hybrid model—the most accommodating structural setting for geothermal power generation in the Great Basin, western USA'. *Geothermal Resources Council Transactions*, 2013, 37, pp. 3–10.
- [3] Malfait, B. T., Dinkelman, M. G. 'Circum-Caribbean tectonic and igneous activity and the evolution of the Caribbean Plate'. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1972, 83, 251–272.
- [4] Martínez-Díaz, J. J., Álvarez-Gómez, J. A., Staller, A., Alonso-Henar, J., Canora, C., Insúa-Arévalo, J. M., ... & Mixco, L.. 'Active faults of El Salvador'. *Journal of South American Earth Sciences*. 2021, vol. 105, p. 103038.
- [5] Siler, D. L. 'Structural discontinuities and their control on hydrothermal systems in Great Basin, USA'. *Geoenergy, geoenergy* 2023, 009.