

Controles estructurales favorables en sistemas geotérmicos al norte de la península de Baja California y su comparación con campos geotérmicos en la Gran Cuenca, EUA

Estefanny Dávalos-Elizondo y Georgina Izquierdo-Montalvo

Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Cuernavaca, Mor., México. Correo:
estefanny.davalos@iie.org.mx, davalos.eli@gmail.com

RESUMEN

Este es un estudio preliminar para la identificación de los patrones estructurales favorables para albergar sistemas geotérmicos al norte de la península de Baja California. La investigación consistió en la integración de la información pública disponible y el posterior análisis de imágenes LIDAR y Modelos de Elevación Digital. Las tres áreas de interés que se estudiaron debido a su potencial geotérmico fueron Ensenada, Laguna Salada y Valle de Mexicali. El trabajo estructural realizado por Faulds y colaboradores (2006, 2011) en la Gran Cuenca (estados de California y Nevada) fue clave para comparar con las características estructurales de la península de Baja California. La Gran Cuenca y la península están relacionadas con la evolución tectónica de las placas Pacífico y Norteamérica. La divergencia entre ambas placas causa una anomalía térmica y forma estructuras favorables que controlan los patrones de circulación de los fluidos geotérmicos. Dentro de la Gran Cuenca hay instaladas unas 24 plantas geotermoelectrivas de ciclo binario, y se han identificado más de 400 sistemas geotérmicos, de los cuales la mitad son sistemas geotérmicos ciegos. Mientras tanto, en la península de Baja California hay actualmente sólo dos campos geotérmicos en operación. Los resultados de esta investigación permitieron identificar los controles estructurales regionales al norte de la península de Baja California, desarrollados como producto de un régimen transtensional que facilita la formación de cuencas *pull-apart* a partir de fallas laterales-derechas. Estas cuencas *pull-apart* también son estructuras favorables que controlan los sistemas geotérmicos ya bien conocidos de Salton Sea, Walker Lane y Cerro Prieto. Asimismo, existen estructuras favorables de manera local que condicionan la ubicación de las manifestaciones termales de las tres áreas de estudio. Por ejemplo: terminaciones de fallas de tipo cola de caballo en fallas laterales-derechas con componente normal, las intersecciones entre fallas normales y laterales, y las zonas de acomodo en sistemas de fallas normales superpuestas con buzamientos opuestos. La continuación de esta investigación podría contribuir al desarrollo de nuevos campos, encontrar posibles sistemas geotérmicos ciegos y mejorar las técnicas de exploración para la localización de sitios de perforación con alta probabilidad de éxito.

Palabras clave: Estructuras favorables, fallamiento lateral-derecho, sistemas geotérmicos ciegos, cuencas *pull-apart*, tectónica transtensional.

Structural controls favorable for geothermal systems at northern Baja California peninsula and comparison with geothermal fields in the Great Basin, USA

ABSTRACT

This is a preliminary study to identify favorable structural settings capable of hosting geothermal systems in the northern area of the Baja California peninsula. The research involves the integration of available information, followed by the analysis of LIDAR images and Digital Elevation Models. The three main areas of interest studied, due to their geothermal potential, were Ensenada, Laguna Salada and Valle de Mexicali. The geological-structural work by Faulds et al. (2006, 2011) in the Great Basin (states of California and Nevada) was key to compare the structural characteristics of the Baja California peninsula. The Great Basin and the peninsula are related with the tectonic evolution of the Pacific and North American plates. The divergence between both plates causes a thermal anomaly and forms

favorable structures that control the geothermal fluid pathways. The Great Basin has more than 24 binary cycle power plants, and more than 400 geothermal systems identified. Out of those, more than half are blind geothermal systems. Whereas, in the Baja California peninsula only two geothermal fields are currently in operation. The research allowed to identify the regional structural controls in the northern area of the Baja California peninsula, developed by a transtensional regime facilitating the formation of pull-apart basins from right-lateral strike-slip faulting. These pull-apart basins are also favorable structures that control the well-known geothermal systems of the Salton Sea, Walker Lane and Cerro Prieto. Similarly, there are locally favorable structures that condition the location of the hot springs of the three areas of study. For example, horse-tailing right-lateral strike-slip faults termination with normal component, intersections between normal and strike-slip faults, and accommodation zones in overlapping opposing normal fault systems. The continuation of this research could contribute to the development of new geothermal fields, findings of potential blind geothermal systems and improving exploration techniques to locate the best drilling sites with a high probability of success.

Keywords: Favorable structures, right-lateral strike-slip faults, blind geothermal systems, pull-apart basins, transtensional tectonics.

1. Introducción

La península de Baja California (PBC) es una región de gran interés por su potencial geotérmico. La anomalía térmica en la región está relacionada con el calor del magmatismo que asciende desde la astenosfera, por medio de la ruptura y extensión del *rift* oblicuo que está formando nuevo piso oceánico (Buck, 1991; Bennett et al., 2016) en el actual Golfo de California.

A pesar de que existen numerosos reportes y artículos describiendo manantiales geotérmicos y pozos calientes alrededor de toda la PBC (p.ej. Vidal et al., 1978; Quijano, 1985; Prol-Ledesma y Ortega, 1988; Casarrubias-Unzueta y Romero-Ríos, 1997; Portugal et al., 2000; Barragán et al., 2001; Prol-Ledesma et al., 2004; López-Sánchez et al., 2006; CRE, 2011; Arango Galván et al., 2011; 2015), actualmente solo hay actualmente dos campos geotérmicos en operación: Cerro Prieto con 720 MW de capacidad instalada, y Las Tres Vírgenes con 10 MW (Quijano y Gutiérrez-Negrín, 2005; Gutiérrez-Negrín, 2010; Arango-Galván et al., 2011; 2015).

Trabajos como el de Arango-Galván et al. (2015) se han enfocado en la caracterización, el cálculo de geotermómetros y el potencial geotérmico de nuevas zonas a lo largo de la península. Estos autores han reportado temperaturas de más de 200°C en varias zonas con potencial geotérmico. Sin embargo, el hecho de que la mayoría de estos recursos se estiman de mediana a baja entalpía, es la causa principal por la que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) no los ha contemplado en sus planes de exploración y futuro desarrollo (Arango-Galván et al., 2011).

Otro factor que ha impedido el desarrollo de estos campos, es la todavía escasa comprensión de la complejidad de los sistemas geotérmicos de tipo tectónico-estructural, en los que las manifestaciones hidrotermales no están restringidas a las áreas de volcanismo activo reciente, sino que más bien están controlados por el fallamiento regional activo y una anomalía térmica regional. En este tipo de sistemas geotérmicos, las estructuras favorecen la actividad geotérmica, generando conductos subverticales de rocas fuertemente fracturadas a lo largo de zonas falladas, lo cual mejora la circulación de los fluidos y el ascenso de plumas térmicas asentadas a profundidad (Faulds et al., 2006).

Este trabajo utiliza la metodología implementada por Faulds et al. (2006, 2011) al noroeste de la Gran Cuenca, una zona de gran similitud geotérmica con la PBC y ligada a la evolución tectónica de las placas del Pacífico y Norteamérica, al norte de la frontera con los Estados Unidos, en los estados de California y Nevada. Estos autores han identificado alrededor de 400 sistemas geotérmicos, siendo más de la mitad de ellos de tipo ciego (*i.e.*, *blind or hidden geothermal systems*), designados así por la

ausencia de manifestaciones termales en superficie. Estos autores realizaron un catálogo de datos identificando las estructuras favorables capaces de albergar sistemas geotérmicos.

Por lo tanto, este estudio es un acercamiento preliminar a las zonas geotérmicas del norte de la PBC (Figura 1; todas las figuras al final del texto), identificando las zonas estructurales más favorables (Faulds et al., 2006, 2011), donde se encuentran las manifestaciones termales y áreas geotérmicas potenciales, reportadas por la CRE (2011) y Arango-Galván et al. (2015), basado en un contexto tectónico-estructural. Para este fin, se realizó una revisión bibliográfica de los trabajos con información estructural y tectónica de las áreas de interés, entre ellos los de Axen y Fletcher (1998), González-Fernández y Paz-López (2000), Martín-Barajas et al. (2001), Cruz-Castillo (2002), Pérez-Flores et al. (2004), Lira et al. (2005), Pacheco et al. (2006), Spelz et al. (2008), y Bennett et al. (2016). Por último, se complementó dicha información con el análisis de imágenes LIDAR y los Modelos de Elevación Digital disponibles en el INEGI, para después compilar la información en mapas estructurales por medio del software de Sistemas de Información Geográfica, para la identificación de los principales controles estructurales.

2. Antecedentes

Estudios realizados por Faulds y colaboradores (2006, 2010, 2011) en la zona noroeste de la Gran Cuenca al occidente de EUA, y basados en un contexto tectónico-estructural, han logrado identificar más de 400 sistemas geotérmicos, de los cuales más de la mitad son sistemas ciegos. La tectónica de esta región se encuentra relacionada con el límite entre las placas del Pacífico y Norteamérica. Axen y Fletcher (1998) dividieron en tres dominios este límite de placas. La zona de la Gran Cuenca se encuentra en el límite entre los dominios norte y centro con un régimen extensivo-transtensional con estructuras extensivas E-W a NE-SW, principalmente (Wernicke et al., 1988; Zoback et al., 1991); este dominio finaliza en la Sierra Nevada. Además, Faulds y colaboradores (2006) mencionan que los sistemas geotérmicos se encuentran en un cinturón con esta misma dirección NNE a NE. Asimismo, el norte de la PBC se encuentra en el dominio sur (Axen y Fletcher, 1998) caracterizado por fallamiento lateral-derecho en dirección NW-SE al sur de la Falla San Andrés y por extensión E-W (Henry y Aranda-Gómez, 1992). Este dominio finaliza en la desembocadura del Golfo de California.

Los sistemas geotérmicos en la Gran Cuenca han sido identificados por medio de un catálogo de datos realizado por Faulds y colaboradores (2011) (Figura 2), donde señalan los patrones estructurales favorables que almacenan los sistemas geotérmicos en esta zona. Estos controles estructurales son: fallas en escalón y rampas de relevo en fallamiento de tipo normal (Figura 3A), las cuales incrementan la densidad del fracturamiento y mejoran la permeabilidad. Otras estructuras favorables comunes son las intersecciones entre fallas normales y fallas oblicuas o de rumbo orientadas transversalmente (Figura 3D). Además, terminaciones de fallas normales, como de cola de caballo (Figura 3B), que generan numerosas fallas con espaciamiento muy cercano entre sí, aumentando la permeabilidad. Más patrones estructurales favorables son: zonas de acomodamiento y sistema de fallas normales superpuestas con buzamiento opuesto (Figura 3C), las fallas mayores de frente de cordillera, salientes o vértices de fallas normales mayores, y cuencas *pull-apart* en sistemas de fallas laterales.

Faulds y colaboradores (2011) argumentaron que los sistemas geotérmicos aparecen muy rara vez en las zonas de desplazamiento máximo o segmentos intermedios de fallas normales mayores, posiblemente debido a la reducida permeabilidad en zonas con salbanda de falla y al periódico movimiento producido por los sismos. También resaltaron la importancia de que muchos de los sistemas geotérmicos de alta entalpía se encuentran en una zona tectónica con más de un patrón estructural favorable (p.ej. rampas de relevo, terminaciones, intersecciones, zonas de acomodo, cuenca *pull-apart*).

3. Evolución Tectónica

La apertura del Golfo de California ocurrió debido a la separación divergente-oblicua entre las placas del Pacífico y Norteamérica (Hamilton, 1961; Larson et al., 1968; Lonsdale, 1989; Fenby y Gastil, 1991; Bennett et al., 2016) hace aproximadamente 12.3 Ma (Atwater y Stock, 1998), a lo largo de la zona de falla Tosco-Abreojos (Martín-Barajas, 2000). La evidencia de la deformación lateral-derecha temprana al este de Baja California está documentada en la costa, a lo ancho de la zona de deformación transtensiva, actualmente preservada como fallas inactivas y exhumadas de cuencas tectónicas no-marinas, en los márgenes continentales de Baja California (Lewis y Stock, 1998; Seiler et al., 2010) y Sonora (Bennett et al., 2013).

Entre hace 8.5 y 8 Ma se formó una bahía en la desembocadura del Golfo (Carreño, 1992; Molina-Cruz, 1994; McCloy et al., 1988), que fue inundada desde el norte hasta el centro hace 7 Ma (Holt et al., 2000; Miller y Lizarralde, 2013), mediante cuencas transtensionales relacionadas al *riifting* oblicuo (Skinner et al., 2012).

Alrededor de los 6.4-6.1 Ma, el *riifting* se localizaba en el núcleo del cinturón transtensivo, localizado justo en el límite entre las placas Pacífico y Norteamérica (Oskin y Atock, 2003a). Para los 6.3 una inundación tuvo lugar hasta la depresión Salton (Escalona-Alcázar et al., 2001; Pacheco et al., 2006; Dorsey et al., 2011; Bennett et al., 2015). De esta manera, se formó un gran depocentro marino, que contiene una secuencia potente de sedimentos marinos (González-Fernández et al., 2005), desarrollado por medio del cinturón de cuencas *pull-apart* en *echelón* de dirección NNW, ahora localizadas al este del moderno Golfo de California (Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007, Bennett et al., 2016).

Para el Plioceno (3.3-2.0 Ma), el régimen transtensional en el norte del Golfo de California migró hacia el oeste (Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007), abandonando las cuencas marinas del oriente e iniciando nuevas cuencas marinas *pull-apart* (Lonsdale, 1989). El límite moderno entre las placas del Pacífico y de Norteamérica está dominado por fallas transformantes en *echelón* de movimiento derecho, con dirección NW, conectadas con cuencas *pull-apart* de la misma dirección y poco más de 50 km de ancho (Bennett et al., 2016). El movimiento lateral-derecho se encuentra concentrado principalmente en el Sistema de Fallas de San Andrés (Axen y Fletcher, 1998). Estas cuencas *pull-apart* han precedido a la propagación del fondo marino al sur del Golfo de California (Larson et al., 1968; Lonsdale, 1989; Fenby y Gastil, 1991; Kluesner, 2011; Bennett et al., 2016) y, además, han formado una nueva corteza híbrida de basaltos y sedimentos en el norte del Golfo de California y la depresión de Salton (Fuis et al., 1984; Dorsey, 2010; Martín-Barajas et al., 2013; Bennett et al., 2016).

4. Zonas Geotérmicas y Controles Estructurales del norte de Baja California

La zona de Walker Lane en la Gran Cuenca (Faulds et al., 2006, 2011) es la continuación hacia el norte de la tectónica transtensional de la PBC, en el que los controles estructurales favorables corresponden a cuencas *pull-apart* y zonas de transferencia, principalmente. Además, dentro del patrón estructural regional de cuencas *pull-apart* es posible identificar localmente otras estructuras favorables (p.ej. terminaciones, intersecciones, rampas relevo, escalón de fallas).

Asimismo, la zona norte de la PBC presenta algunos prospectos geotérmicos en las áreas de Ensenada, Laguna Salada y el Valle de Mexicali (Figura 1). Estas áreas se encuentran ligadas a la evolución tectónica de la depresión de Salton, la cual corresponde a una cuenca de tipo *pull-apart*, y donde hay varios campos geotérmicos ya en producción (p.ej. Salton Sea, Heber, Brawley, Mt. Signal, Dunes, East Mesa) en EUA, mientras que para el lado de México solo se cuenta actualmente con el campo geotérmico de Cerro Prieto.

4.1 Ensenada

La zona geotérmica de Ensenada se ubica al sur de la Bahía Todos Santos y al este y sureste de la ciudad de Ensenada (Figura 4), en las coordenadas UTM WGS84 Zona 11: 520 000 E - 3 546 500 N y 620 000 E - 3 470 000 N. Las manifestaciones superficiales en el área fueron reportadas por Vidal et al. (1978), Álvarez-Rosales (1993), Beltrán-Abaunza y Quintanilla-Montoya (2001) y Arango-Galván et al. (2011; 2015), mientras que Arango-Galván et al. (2015) agruparon en tres localidades las manifestaciones de esta zona:

- a) Punta Banda (Figura 4). Aquí se registraron manantiales calientes superficiales y ventilas hidrotermales submarinas (Vidal et al., 1978; Álvarez-Rosales, 1993; Beltrán-Abaunza y Quintanilla-Montoya, 2001; Arango-Galván et al., 2011, 2015). Las temperaturas superficiales reportadas para las ventilas hidrotermales en esta área van desde los 55°C hasta los 109°C (Vidal et al., 1978), mientras que las temperaturas para los manantiales termales y los pozos calientes fueron reportadas en el rango de 40°C a 74°C y con pH entre 6.3 y 8.4. Los geotermómetros de sílice (Fournier et al., 1982) fueron calculados por Arango-Galván et al. (2011, 2015), quienes estimaron una temperatura de 126°C para las ventilas hidrotermales, y para los manantiales superficiales entre los 120°C y 140°C. Además, por medio del geotermómetro de Na/K (Giggenbach, 1988), estos mismos autores calcularon temperaturas de 214°C para las ventilas y 153-188°C para las manifestaciones superficiales. La temperatura calculada para los pozos calientes someros fue de 195°C. Por otro lado, la CRE (2011) reporta temperaturas de geotermómetros de 220°C para las manifestaciones submarinas y de 218°C para las manifestaciones superficiales, además de reportar una composición clorurada-sulfatada para estas últimas.
- b) Ejido Uruapan y Valle de Santo Tomás. Son manifestaciones termales con temperaturas de 40 a 60°C también relacionadas con la tectónica de las fallas Agua Blanca y Santo Tomás (Figura 4).
- c) San Carlos y Las Pocitas. Las manifestaciones son manantiales calientes entre 43-48°C, relacionados con la Falla El Descanso (Figura 4).

Las rocas más antiguas de la zona corresponden a una secuencia volcanoclástica de la Formación Alisitos del Cretácico Inferior, la cual consiste de un ensamble de rocas volcánicas, en su mayoría dacitas y andesitas (Santillán y Barrera, 1930; Arango-Galván et al., 2011) que afloran a lo largo de toda la planicie costera de Todos Santos y en la Península de Punta Banda. Hay además intrusiones tonalíticas-graníticas del Batolito Peninsular del Cretácico (Chávez-Cabello et al., 2006), el cual aflora hacia el este de la planicie costera y alcanza profundidades del orden de 600-800 m hacia la bahía (CRE, 2011). Esta cordillera de intrusiones que se extiende de E a NE sobreyace una secuencia detrítica de la Formación Rosario (Morán-Zenteno, 1984; Arango-Galván et al., 2011). El Cenozoico está representado por sedimentos marinos y rocas volcánicas, volcanoclásticas e hipabisales. Las formaciones más recientes corresponden a sedimentos clásticos, formaciones costeras, depósitos lacustres y aluvión de Holoceno.

La tectónica y la geología estructural de la zona controlan la ubicación de los manantiales termales. La península de Punta Banda representa un alto estructural de dirección NW-SE delineado por fallas transformantes derechas, correspondientes al sistema de fallas activas de Agua Blanca. La planicie costera adyacente de Todos Santos es un semi-graben rellenado por 2000 m de sedimentos (Gastil et al., 1975; Pérez-Flores et al., 2004; Arango-Galván et al., 2011). Las fallas principales son Agua Blanca (con 140 km de longitud y una dirección N 68°-70° W) y San Miguel (Pérez-Flores et al., 2004), y además se observan fallas menores como las de Vallecitos, El Descanso y Tres Hermanos (Figura 4).

Existe fallamiento de tipo normal con dirección NNW-SSE. La falla Agua Blanca se bifurca en dos segmentos que limitan a la península de Punta Banda (Figura 4); el segmento norte tiene un comportamiento lateral derecho con una componente normal, y forma el límite suroeste del semigraben que caracteriza la Planicie de Todos Santos (Gastil et al., 1975; Pérez-Flores et al., 2004).

El análisis estructural realizado en este trabajo por medio de imágenes LIDAR y Modelos de Elevación Digital (MED), además de la revisión bibliográfica disponible, permitió determinar que las manifestaciones termales se encuentran ubicadas en una zona con un patrón estructural regional de tipo *pull-apart*, donde las fallas Agua Blanca y San Miguel son fallas maestras locales. Este patrón de cuenca *pull-apart* podría estar relacionado de manera regional con fallas mayores, como la Falla de San Andrés y el sistema de cuencas a lo largo de toda la apertura del Golfo de California.

Asimismo, por medio de estudios geofísicos gravimétricos y magnéticos Pérez-Flores et al. (2004) argumentaron que la Planicie de Todos Santos tiene un patrón estructural típico de cuenca *pull-apart* (Gastil et al., 1975; Legg et al., 1991) asociada anteriormente con la tectónica de una cuenca ante-arco durante el episodio de subducción. Aunque la Planicie Costera de Todos Santos ha sido afectada por diferentes regímenes tectónicos, el movimiento actual del sistema de fallas en esta zona tiene que ver con el contexto tectónico actual de la apertura del Golfo de California y la separación de la PBC hacia el noroeste (<12 Ma). Esto se evidencia, entre otras cosas, por la alta actividad sísmica (Figura 4) de las fallas Agua Blanca y San Miguel, además de la dirección de los esfuerzos principales que operan actualmente.

A pesar de que las tres zonas geotérmicas de Ensenada se encuentran regionalmente en lo que es una cuenca *pull-apart*, es posible de identificar de manera local que las manifestaciones se encuentran ubicadas en un patrón estructural de terminación de falla lateral de tipo cola de caballo (*horse-tailing fault termination*; Faulds et al., 2006). Para las zonas de Punta Banda y Ejido Uruapan-Valle de Santo Tomás es posible observar que la Falla Agua Blanca, de movimiento lateral derecho, se ramifica en una terminación de tipo cola de caballo (Figuras 3B y 4). Además, de manera mucho más local esta terminación de cola de caballo en la península Punta Banda parece bifurcarse en una falla norte y otra sur, ambas de movimiento lateral-derecho y unidas por dos o más fallas que las interconectan, similar a un patrón estructural de escalón de fallas y rampas relieve (Figuras 3A y 4) descrito por Faulds et al. (2006, 2011). Mientras que las manifestaciones de San Carlos-Las Pocitas se encuentran ubicadas en la terminación de cola de caballo de la falla Tres Hermanos-El Descanso (Figuras 3B y 4).

Además, es importante mencionar que la fallas Vallecitos y San Miguel, ambas de movimiento lateral derecho, presentan un mayor número de enjambres sísmicos durante los años 2010 a 2016 (Figura 4), siendo una zona de posible interés para la exploración geotérmica de sitios ciegos.

4.2 Laguna Salada y Valle de Mexicali

La zona de Laguna Salada se localiza en la parte noreste de la PBC, a 30 km del campo geotérmico Cerro Prieto y al suroeste de la ciudad de Mexicali, mientras que la zona geotérmica del Valle de Mexicali se ubica al oriente de Laguna Salada y de la Sierra de Cucapá, al oeste del Río Colorado y a unos 30 km al sur de la ciudad de Mexicali (Figura 5). Las coordenadas UTM WGS84 de un área que abarca ambas zonas geotérmicas son: 580 957 E - 3 619 176 N y 712 900 E - 3 519 600 N.

Ambas zonas geotérmicas se encuentran cerca de la frontera con el Valle Imperial. El Valle de Mexicali es la continuidad meridional de la Cuenca de Salton Sea, que es una zona con alto potencial geotérmico y numerosos campos ya en producción en EUA. Estas zonas también forman parte del sistema de Fallas de San Andrés que marca el borde entre las placas del Pacífico y Norteamérica.

a) Laguna Salada

Se trata de una cuenca de dirección NW-SE alineada con la Sierra Juárez al oeste y la Sierra de Cucapá y El Mayor al este y sureste, respectivamente. Existen dos zonas de manifestaciones: Cañón de Guadalupe y El Tajo. Ambas se encuentran al oeste de la cuenca de Laguna Salada, sobre la falla Juárez o escarpe del Golfo y al oriente de la Sierra del mismo nombre (Figura 5). Adicionalmente, las manifestaciones de Laguna Norte y Agua Caliente se encuentran al oeste de la Sierra Cucapá y la

temperatura de ésta última es en promedio de 36°C (Figura 5), ubicándose ambas sobre la falla maestra Laguna Salada (Tello y Tovar, 1993; Arango-Galván et al., 2015). La CFE perforó tres pozos exploratorios profundos (ELS-1, ELS-2 y ELS-3), cuya temperatura máxima medida fue de 126°C a una profundidad de 2390 m. La columna litológica definida para el pozo ELS-1 muestra un relleno sedimentario de por lo menos 1789 m de espesor (García-Abdeslem et al., 2001; Arango-Galván et al., 2015).

Las muestras de agua colectadas en las manifestaciones termales y los pozos exploratorios tienen una composición clorurado-sódica (Tello y Tovar, 1993; Arango-Galván et al., 2015). Los geotermómetros calculados por el método de Giggenbach (1988) varían entre los 181 y los 187°C (Arango-Galván et al., 2015). La CRE (2011), por su parte, estimó con geotermómetros un rango de 130 a 187°C.

Las rocas del basamento cristalino son del Mesozoico y están compuestas por intrusiones granitoides, esquistos, migmatitas, anfibolitas y mármol, las cuales constituyen las sierras Juárez al oeste, Cucapá al noroeste y El Mayor al este. La cuenca de Laguna Salada se encuentra rellena de sedimentos que han sido alimentados por incursiones fluviales episódicas del sistema del Río Colorado y por el depósito de aluvión de grano grueso proveniente de la erosión de las tres sierras mencionadas (Siem, 1992; Spelz et al., 2008).

La cuenca de Laguna Salada se localiza a lo largo del margen occidental de la Provincia Extensional del Golfo de California y constituyen el límite suroeste de la depresión del Salton Sea, junto con la cuenca Imperial (Martín-Barajas et al., 2001). La depresión de Salton es una cuenca *pull-apart* activa tectónicamente. La abundante actividad sísmica en el sistema de fallas de Laguna Salada (FLS, Figura 5) confirma su localización cerca del eje de la zona de cizalla entre las placas Norteamérica y Pacífico (Spelz et al., 2008).

La cuenca de Laguna Salada forma una estructura de semi-graben (García-Abdeslem et al., 2001), controlada por dos fallas mayores que bordean las cordilleras Cucapá y El Mayor y que definen el límite oriental de la cuenca (Figura 5, Axen y Fletcher, 1998). La mayor subsidencia se encuentra en el lado oriental de la cuenca, adyacente al norte de la Sierra El Mayor y centro de la Sierra Cucapá (Savage et al., 1994; Axen y Fletcher et al., 1998). La falla de despegue El Mayor (FDM, Figura 5), controla el margen oeste de la Sierra del mismo nombre. Esta falla tiene una longitud de 60 km y un movimiento normal de bajo ángulo con buzamiento al oeste que yuxtapone conglomerados del Plio-Pleistoceno contra el basamento cristalino del Mesozoico (Spelz et al., 2008). La actividad de la FDM comenzó a los 12 Ma y acomodó 10-12 km de extensión horizontal (Axen et al., 2000), y continua actualmente con el depósito de la secuencia sedimentaria de tipo *syn-rift* (Spelz et al., 2008). La falla Laguna Salada (FLS) se ubica al norte de la FDM; es una falla de ángulo alto con movimiento normal y componente lateral derecho, que controla el margen occidental de la Sierra Cucapá (Spelz et al., 2008).

Al oeste de la cuenca Laguna Salada, el frente de la cordillera de la Sierra de Juárez está dominado por fallamiento normal de ángulo alto (Axen y Fletcher, 1998), también conocido como escarpe del Golfo o Falla Sierra de Juárez (FSJ, Figura 5). Mendoza-Borunda et al. (1995) indicaron dos direcciones de extensión que controlaron el escarpe del Golfo, la primera NE-SW, y la más joven de dirección WNW-ESE, como un sistema de reacomodo ortogonal.

Algunos autores han interpretado la cuenca de Laguna Salada como una cuenca *pull-apart* con una geometría rómbica similar a los centros expansivos de Cerro Prieto y Salton Sea (Fenby y Gastil, 1991; Mueller y Rockwell, 1991, 1995). Sin embargo, otros estudios como los de Axen y Fletcher (1998) y Axen et al. (1999, 2000) han reinterpretado la geometría de la cuenca en sus inicios como un graben asimétrico que se formó por un fallamiento de despegue (Falla El Mayor) y transportado hacia el oeste.

Por medio de la recopilación de los datos geológico-estructurales de la zona y el análisis de las imágenes LIDAR y MED, en este estudio se identificó que las manifestaciones del Cañón de Guadalupe y El Tajo se encuentran sobre el escarpe del Golfo o Falla Sierra de Juárez de tipo normal y dirección

NNW-SSE, buzando al oriente principalmente. Ambas manifestaciones se encuentran en la intersección con la estructura principal NW-SE y estructuras inferidas de dirección casi E-W. Además, ambas manifestaciones se encuentran también en zonas de acomodo de sistemas de fallas normales superpuestas con buzamiento opuesto (*overlapping opposing normal fault systems*; Faulds et al., 2006). Además, cerca de la manifestación de El Tajo se ubican los epicentros de tres sismos de magnitud entre 2 y 2.7 Mc y profundidad aproximada de 50 km, registrados entre los años 2015 y 2016 (Figura 5).

Las manifestaciones de Laguna Norte y Agua Caliente, ubicadas al occidente de la Sierra Cucapá, se encuentran ubicadas en una zona de terminación de tipo cola de cabello (*horse-tailing fault termination*; Faulds et al., 2006), correspondiente a las Fallas El Pescador (FP), Falla Borrego (FB) y Falla Laguna Salada (FLS). La Sierra de Cucapá presenta actividad sísmica importante (Figura 5), siendo una zona tectónicamente muy activa de la PBC. Al norte de la Sierra Cucapá, al frente de la cordillera, en lo que podría ser una estructura favorable de tipo cola de caballo (Figura 5), se observa un enjambre sísmico con magnitudes en el rango de 1 y 3 Mc y profundidades entre 8 y 12 km, registrados entre 2015 y 2016, pudiendo ser una zona de interés para futuras exploraciones geotérmicas. Además, se ha reportado actividad sísmica reciente en la Sierra de Cucapá-El Mayor, como la ocurrida en abril de 2010 con un sismo de magnitud de 7.2 Mc; se ha reportado que este sismo contribuyó a la formación de una nueva manifestación termal en la zona sureste de la terminación de la Sierra Cucapá (Álvarez-Rosales et al., 2012; Arango-Galván et al., 2015).

b) Valle de Mexicali

Las manifestaciones principales en el Valle de Mexicali son: el campo geotérmico de Cerro Prieto (Figura 5), que es actualmente el campo más importante de México y el segundo más grande del mundo, Tulecheck y Riito. Estas dos últimas áreas son zonas donde se ha reportado la existencia de numerosas manifestaciones termales, y ambas ya fueron perforadas por la CFE (Lira et al., 1993; Carreón et al., 1992; Arango-Galván et al., 2015).

La litología del subsuelo reportada por los más de 320 pozos perforados en la cuenca tectónica de Cerro Prieto se compone por un basamento de granito del Cretácico, un paquete de lutita gris con intercalaciones de arenisca, más lutita café y lodolita del Terciario, con un espesor de 2700 m, que sobreyacen al basamento, y finalmente un paquete de sedimentos clásticos de edad Cuaternaria producto del material depositado por el Río Colorado y el coluvión de la Sierra Cucapá, compuesto por grava, arena y arcilla que alcanzan un espesor promedio de 2500 m (Lira et al., 2005).

- La zona del campo geotérmico de Cerro Prieto (Figura 5) forma parte del sistema de fallas de San Andrés. Las fallas más importantes de la zona son las de Cucapá (FP), Imperial (FI), Cerro Prieto (FCP) y Algodones (FA) (Puente y De-La-Peña, 1979; Lira, 2005; Arango-Galván et al., 2015). Las manifestaciones termales de esta zona se encuentran relacionadas principalmente con la falla Cerro Prieto (Figura 5). El reservorio geotérmico de Cerro Prieto, con temperaturas $>300^{\circ}\text{C}$, se encuentra albergado en las rocas sedimentarias de lutitas con intercalaciones de areniscas del Terciario. La fuente de calor corresponde a intrusiones alcalinas y la capa sello corresponde al paquete sedimentario de lutitas de la parte superior (Lira et al., 2005).
- Las manifestaciones de Tulecheck (Figura 5) se localizan al oriente de la Sierra de Cucapá, con una litología similar a la del campo geotérmico de Cerro Prieto, donde predomina el sedimento como relleno de cuencas (Fonseca et al., 1980; Arango-Galván et al., 2015). Las muestras de agua geotérmica de Tulecheck tienen composición clorurado-sódica y los geotermómetros de Na/K (Giggenbach, 1988) varían entre los 178 y 242°C (Arango-Galván et al., 2015).
- Las manifestaciones de Riito (Figura 5) están localizadas a lo largo de una cuenca al sur de la terminación del Valle de Mexicali, que posiblemente es la continuación noroeste de la

estructura observada en el Golfo de California. El relleno sedimentario tiene un espesor de unos 7 km (Fonseca et al., 1981; Arango-Galván et al., 2015). Se han colectado muestras de agua de pozos profundos y someros de Ríito (Barragán et al., 2001; Portugal et al., 2005; Arango-Galván et al., 2015). Solo una muestra de un pozo profundo (ER, a 3791 m) presentó equilibrio, dando una temperatura de geotermómetro de Na/K (Giggenbach, 1988) de 221°C (Arango-Galván et al., 2015).

Las fallas Cerro Prieto (FCP) e Imperial (FI) (Figura 5) forman un centro de dispersión (Cruz-Castillo, 2002; Lira et al., 2005) y una cuenca *pull-apart*; además de ser parte del límite entre las placas Pacífico y Norteamérica. La FI es la principal conexión entre el sistema San Andrés y las estructuras del Golfo de California. Se extiende a lo largo de 75 km, desde 3 km al sur de Brawley, California, hasta el centro de dispersión Cerro Prieto, con una orientación de N42°W. Su velocidad de desplazamiento se ha estimado en 47 mm/año, y se le han asociado temblores de magnitudes altas, pero de escasa microsismicidad (Cruz-Castillo, 2002). La FCP tiene movimiento lateral derecho, se extiende a lo largo de 80 km desde el centro de dispersión Cerro Prieto hasta la Cuenca de Wagner. La traza de la falla es visible únicamente en su sector sur, pero su parte norte se ha identificado por medio de métodos geofísicos. En la región del Valle de Mexicali, su desplazamiento promedio es mayor a 50 mm/año. Presenta actividad sísmica importante (Cruz-Castillo, 2002).

El campo geotérmico de Cerro Prieto se encuentra en una zona estructuralmente favorable, justo en la terminación de la falla lateral derecha FCP y en el vértice izquierdo del centro de dispersión entre las FCP y FI (Figura 5). Además, se encuentra dentro del límite sur de la estructura de cuenca *pull-apart* de Salton Sea, junto con las zonas de Tulecheck y Ríito. Para las zonas de Tulecheck y Ríito no fue posible identificar estructuras favorables locales, ya que en la bibliografía existente no se han delimitado estructuras visibles debido a que probablemente están sepultadas por el relleno sedimentario. Sin embargo, las manifestaciones termales de ambas zonas presentan una alineación NW-SE entre ellas, paralelas al fallamiento lateral derecho principal. Además, para la zona de Tulecheck se ha registrado microsismicidad con magnitudes de 1.8 Mc y con la misma alineación NW en el año 2016.

Se observan zonas ciegas de gran interés para la exploración geotérmica, principalmente donde se encuentran los enjambres sísmicos de magnitudes entre 1 y 3 Mc con profundidades no mayores a 15 km, ubicados en patrones estructurales favorables en el Valle de Mexicali (Figura 5).

5. Discusión

Este trabajo es un análisis preliminar de los controles estructurales favorables capaces de albergar sistemas geotérmicos al norte de la PBC, basados en los trabajos realizados por Faulds y colaboradores (2006, 2011) en la Gran Cuenca.

Es importante continuar un análisis estructural detallado en cada una de las zonas geotérmicas reportadas en la PBC. La predicción de los segmentos de zonas de ruptura como las zonas de interconexión de fallas, ayudan a mejorar la permeabilidad y favorecen el ascenso de los fluidos. Asimismo, Faulds y colaboradores (2011) señalan que los sistemas geotérmicos rara vez se encuentran en las zonas de máximo desplazamiento o en los segmentos medios de fallas mayores, argumentando una posible reducción de la permeabilidad debido a la salbanda de falla y a los desplazamientos periódicos en sismos de magnitudes mayores.

A pesar de que los trabajos realizados por Faulds y colaboradores (2006, 2011) en la Gran Cuenca han identificado patrones estructurales favorables en un contexto tectónico de un régimen extensivo dominante, la zona de transferencia Walker Lane presenta una tectónica transtensiva con fallas laterales-derechas y normales, la cual está asociada con la divergencia-oblicua entre las placas

Pacífico y Norteamérica, mostrando por lo tanto una conexión y similitud tectónica con la zona norte de la PBC.

Además, se observa que en la región del norte de la PBC, así como en el área de Walker Lane (Faulds et al., 2011) y en la depresión Salton Sea (Herzig y Mehegan, 1987; Hiriart-LeBert y Gutiérrez-Negrín, 1994) los controles estructurales favorables regionales en los sistemas geotérmicos corresponden principalmente a cuencas *pull-apart* y zonas de transferencia, asociados localmente a terminaciones de cola de caballo de fallas mayores laterales-derechas o intersecciones de fallas laterales y/o normales. Mientras, que los sistemas geotérmicos más abundantes en la Gran Cuenca están albergados en estructuras favorables de escalones, rampas relevo y zonas de acomodo en sistemas de fallas normales relacionados a un régimen extensivo (Faulds et al., 2011).

La microsismicidad y la identificación de estructuras favorables, pueden servir como una guía preliminar para delimitar áreas de posibles sistemas geotérmicos ciegos. La microsismicidad a profundidades relativamente someras (<10 km) puede estar asociada con el movimiento de cuerpos magmáticos, o bien con el movimiento de fluidos hidrotermales que ocasiona rupturas en las rocas. En la zona norte de la PBC se registra una importante concentración de enjambres sísmicos, por lo que es recomendable identificar aquellos que pudieran estar relacionados con una actividad geotérmica. En este trabajo, se señalan zonas de posible interés al frente de la Sierra de Cucapá, principalmente en el segmento norte de la falla Laguna Salada.

Queda mucho trabajo por hacer en la recolección de la información estructural de campo y en el análisis conjunto de la información geoquímica y geofísica, para la posterior elaboración de los modelos geotérmicos de cada sitio y la identificación de nuevas zonas. La continuación de este trabajo a futuro permitiría identificar posibles sistemas geotérmicos ciegos a lo largo de la PBC, y contribuir a desarrollar nuevos campos geotérmicos en un área de gran potencial geotérmico. Además, permitiría aportar técnicas de exploración más eficientes para la localización de sitios de perforación, con la finalidad de aumentar la probabilidad de éxito en la búsqueda y explotación de estos recursos.

Referencias

- Álvarez-Rosales, J., 1993. Reconocimiento geotérmico en el Área de Ensenada, B.C. Gerencia de Proyectos Geotermoelectrivos, Departamento de Exploración, CFE. Inédito.
- Álvarez-Rosales, J., Camacho-Hernández, J.M., Gallardo-Federico, V.I., Macías-Valdez, G., Herrera-Carrillo, D., 2012. Características geológicas preliminares de la nueva zona termal Cucapá en el Valle de Mexicali, BC, México. *Geotermia* 25 (2), 21–27.
- Aragón-Arreola, M., Martín-Barajas, A., 2007. Westward migration of extension in the northern Gulf of California, Mexico. *Geology* 35 (6), 571–574.
- Arango-Galván, C., Prol-Ledesma, R.M. & Torres-Vera, M.A., 2015. Geothermal prospects in the Baja California Peninsula. *Geothermics*, 55, 39–57.
- Arango-Galván, C., Prol-Ledesma, R.M., Flores-Márquez, E.L., Canet, C., Villanueva Estrada, R.E., 2011. Shallow submarine and subaerial, low-enthalpy hydro-thermal manifestations in Punta Banda, Baja California, Mexico Geophysical and geochemical characterization. *Geothermics* 40, 102–111.
- Atwater, T., Stock, J.M., 1998. Pacific North America plate tectonics of the Neogene southwestern United States: an update. *Int. Geol. Rev.* 40 (5), 375–402.
- Axen, G.J., Fletcher, J.M., 1998. Late Miocene–Pliocene extensional faulting, northern gulf of California and Salton Trough, California. *Int. Geol. Rev.* 40 (3), 217–244.

- Axen, G.J., Fletcher, J.M., Cowgill, E., Murphy, M., Kapp, P., MacMillan, I., Ramos- Velázquez, E., Aranda-Gómez, J., 1999. Range-front fault scarps of the Sierra El Mayor, Baja California: formed above a low-angle normal fault? *Geology* 27, 247–250.
- Axen, G.J., Stockli, D., Grove, M., Lovera, O.M., Rothstein, D.A., Fletcher, J.M., Farley, K., Abbott, P.L., 2000. Thermal evolution of Monte Blanco dome: low-angle normal faulting during Gulf of California rifting and late Eocene denudation of the eastern Peninsular Ranges. *Tectonics* 19, 197–212.
- Barragán, R.M., Birkle, P., Portugal, M., Arellano, E.G., Alvarez, V.M.R.J., 2001. Geochemical survey of medium temperature geothermal resources from the Baja California Peninsula and Sonora, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 110, 101–119.
- Beltrán-Abaunza, J.M., Quintanilla-Montoya, A.L., 2001. Calculated heat flow for the Ensenada region, Baja California, Mexico. *Ciencias Marinas* 27, 619–634.
- Bennett, S.E.K., 2013. The Role of Rift Obliquity in Formation of the Gulf of California (Ph.D thesis) University of California, Davis (220 p). Inédito.
- Bennett, S.E.K., Osokin, M.E., Dorsey, R.J., Iriondo, A., Kunk, M.J., 2015. Stratigraphy and structural development of the southwest Isla Tiburón marine basin: Implications for latest Miocene tectonic opening and flooding of the northern Gulf of California. *Geosphere*.
- Bennett, S.E.K., Osokin, M.E., Iriondo, A., Kunk, M.J., 2016. Slip history of the La Cruz fault: Development of a late Miocene transform in response to increased rift obliquity in the northern Gulf of California. *Tectonophysics* 623, 409–435.
- Buck, R.W., 1991. Modes of continental extension. *J. Geophys. Res.* 96, 20161–20178.
- Carreño, A.L., 1992. Neogene Microfossils from the Santiago Diatomite, Baja California Sur, Mexico. *Paleontología Mexicana*, Vol. 59.
- Carreón, C., Ramírez, J., Vega, M., 1995. Aplicación del diagrama de Stiff como herramienta geoquímica en la exploración geotérmica del valle de Mexicali, Baja California. *Ingeniería Hidráulica en México X*, 37–46.
- Casarrubias-Unzueta, Z., Romero-Ríos, F., 1997. Propuesta para la localización de pozos de gradiente en El Centavito, Agua Caliente y Santispac, BCS. Comisión Federal de Electricidad. Gerencia de Proyectos Geotermoelectréticos. Departamento de Exploración. Inédito.
- Chávez-Cabello, G., Molina Garza, R., Delgado Argote, L., Contreras Flores, R., Ramírez, E., Ortega Rivera, A., Böhnel, H., Lee, J., 2006. Geology and paleomagnetism of El Potrero pluton, Baja California: Understanding criteria for timing of deformation and evidence of pluton tilt during batholith growth. *Tectonophysics* 424, 1–17.
- Comisión Reguladora de Energía, 2011. *Evaluación de los recursos geotérmicos de baja entalpía de la península de Baja California, México*. Reporte Final. Universidad Politécnica de Baja California.
- Cruz-Castillo, M., 2002. Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de la Baja California, México. *Geos* 22 (1), 37–42.
- Dorsey, R.J., 2010. Sedimentation and crustal recycling along an active oblique-rift margin: Salton Trough and northern Gulf of California. *Geology* 38 (5), 443–446.
- Dorsey, R.J., Housen, B.A., Janecke, S.U., Fanning, C.M., Spears, A.L.F., 2011. Stratigraphic record of basin development within the San Andreas fault system: Late Cenozoic Fish Creek-Vallecito basin, southern California. *Geol. Soc. Am. Bull.* 123 (5–6), 771–793.

- Escalona-Alcázar, F.J., Delgado-Argote, L.A., López-Martínez, M., Rendón-Márquez, G., 2001. Late Miocene volcanism and marine incursions in the San Lorenzo Archipelago, Gulf of California, Mexico. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 18 (2), 111–128.
- Faulds J. E., Hinz, N. H., Coolbaugh, M. F., Cashman, P. H., Kratt, C., Dering, G., Edwards, J., Mayhew, B., McLachlan, H., 2011. Assessment of Favorable Structural Settings of Geothermal Systems in the Great Basin, Western USA. *Geothermal Resources Council Transactions*, v. 35.
- Faulds, J. et al., 2010. Characterizing Structural Controls of Geothermal Reservoirs in the Great Basin, USA, and Western Turkey: Developing Successful Exploration Strategies in Extended Terranes.
- Faulds, J.E., Coolbaugh, M.F., Vice, G.S., and Edwards, M.L., 2006, Characterizing structural controls of geothermal fields in the northwestern Great Basin: A progress report. *Geothermal Resources Council Transactions*, v. 30, p. 69-76.
- Fenby, S.S., Gastil, R.G., 1991. Geologic–Tectonic Map of the Gulf of California and Surrounding Areas. In: Dauphin, J.P., Simoneit, B.R.T. (Eds.), *AAPG Memoir 47: The Gulf and Peninsular Province of the California*. Vol. 47, pp. 79–83.
- Fonseca, H.L., Razo, A., Palma, O., 1980. Estudios de Gravimetría y Magnetometría en el Valle de Mexicali. B.C. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Departamento de Exploración. Inédito.
- Fournier, R.O., Rosenbauer, R.J., Bischoff, J.L., 1982. The solubility of quartz in aqueous sodium chloride at 350°C and 180 to 500 bars. *Geochim. Cosmochim. Acta* 46, 1975–1978.
- Fuis, G.S., Mooney, W.D., Healy, J.H., McMechan, G.A., Lutter, W.J., 1984. A seismic refraction survey of the Imperial Valley Region, California. *J. Geophys. Res.* 89, 1165–1189.
- García-Abdeslem, J., Espinosa-Cerdeña, J.M., Munguía-Orozco, L., Wong-Ortega, V.M., Ramírez Hernández, J., 2001. Crustal structure from 2-D gravity and mag- netic data modeling, magnetic power spectrum inversion, and seismotectonics in the Laguna Salada basin, northern Baja California, Mexico. *Geoffs. Int.* 40 (2), 67–85.
- Gastil, R.G., Phillips, R.P., Allison, E.C., 1975. Reconnaissance Geology of the State of Baja California. *Geological Society of America Memoirs* 140, 170p.
- Giggenbach, W.F., 1988. Geothermal solute equilibria: derivation of Na–K–Mg–Ca geoindicators. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52 (12), 2749–2765.
- González-Fernández, A., Danobeitia, J.J., Delgado-Argote, L., Michaud, F., Cordoba, D., Bartolome, R., 2005. Mode of extension and rifting history of upper Tiburon and upper Delfin basins, northern Gulf of California. *J. Geophys. Res.* 110, 1–17.
- González-Fernández, A., Martín-Atienza, B., Paz-López, S., 2000. Identificación de fallamiento en la Península de Punta Banda, B.C., a partir de datos de topografía, magnetometría y gravimetría. *Geos* 20, 98–106.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., Maya-González, R., Quijano-León, J.L., 2010. Current Status of Geothermics in Mexico. *Proceedings of the 2010 World Geothermal Congress*, Bali, Indonesia, Paper 101, 11 pp.
- Hamilton, W., 1961. Origin of the Gulf of California. *Geol. Soc. Am. Bull.* 72 (9), 1307–1318.
- Henry, C.D., Aranda Gomez, J.J., 1992. The real southern basin and range mid Cenozoic to late Cenozoic extension in Mexico. *Geology* 20 (8), 701–704.
- Herzig, C.T. y Mehegan, J.M., 1987. Quaternary depositional history of an active pull-apart basin, Salton Through, California. *GSA, Abstracts with Programs*, v.19, no. 7, p. 701.
- Hiriart-LeBert, G. y Gutiérrez-Negrín, L.C.A., 1994. Geothermal development in Mexico. *Geothermal Resources Council Transactions*, v.18, p. 269-274.

- Holt, J.W., Stock, J.M., Holt, E.W., 2000. An age constraint on Gulf of California rifting from the Santa Rosalía basin, Baja California Sur, Mexico. *GSA Bull.* 112 (4), 540–549.
- Cluesner, J.W., 2011. Marine Geophysical Study of Cyclic Sedimentation and Shallow Sill Intrusion in the Floor of the Central Gulf of California. PhD thesis, University of California, San Diego, 213 p. Inédito.
- Larson, R.L., Menard, H.W., Smith, S.M., 1968. Gulf of California: a result of ocean floor spreading and transform faulting. *Science* 161, 781–784.
- Legg, R.M., Wong, V. and Suárez-V., F. (1991). Geologic structure and tectonics of the inner continental borderland of northern Baja California. In: P. Dauphin and B. Simoneit (eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the California*. AAPG Mem., 47, 145–177.
- Lewis, C.J., and Stock, J.M., 1998. Late Miocene to recent transtensional tectonics in the Sierra San Fermín, northeastern Baja California, Mexico. *J. Struct. Geol.* 20, 1043–1063.
- Lira, H., Álvarez Rosales, J., González López, M., 1993. Estudio de la prefactibilidad de la zona geotérmica de aeropuerto, Mexicali, B.C. CFE, Residencia General de Cerro Prieto, Departamento de Exploración. Inédito.
- Lira-Herrera, H., 2005. Actualización del modelo geológico conceptual del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geotermia*, v.18, No. 1.
- Lonsdale, P., 1989. Geology and Tectonic History of the Gulf of California. In: Winterer, E.L., Hussong, D.M., Decker, R.W. (Eds.), *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii, Geology of North America. Geological Society of America*, Boulder, CO, pp. 499–521 (Volume N).
- López-Sánchez, A., Báncora-Alsina, C., Prol-Ledesma, R.M., Hiriart, G., 2006. A new geothermal resource in Los Cabos, Baja California Sur, Mexico. *Proceedings of the 28th New Zealand Geothermal Workshop*, University of Auckland, New Zealand, Paper S3, 6 p.
- Martín-Barajas, A., González-Escobar, M., Fletcher, J.M., Pacheco, M., Osokin, M., Dorsey, R., 2013. Thick deltaic sedimentation and detachment faulting delay the onset of continental rupture in the Northern Gulf of California: analysis of seismic reflection profiles. *Tectonics* 32, 18.
- Martín-Barajas, A., Vazquez-Hernandez, S., Carreno, A.L., Helenes, J., Suárez-Vidal, F., Álvarez-Rosales, J., 2001. Late Neogene stratigraphy and tectonic control on facies evolution in the Laguna Salada Basin, northern Baja California, Mexico. *Sediment. Geol.* 144, 5–35.
- McCloy, C., Ingle, J.C., Barron, J.A., 1988. Neogene stratigraphy, foraminifera, diatoms, and depositional history of María Madre Island, Mexico: evidence of early Neogene marine conditions in the southern Gulf of California. *Mar. Micropaleontol.* 13, 193–212.
- Mendoza-Borunda, R., Axen, G. X, and Frías-Camacho, V., 1995. Fallamiento normal en la parte sur de la zona de falla de Sierra Juárez, en la vecindad del escarpe principal del Golfo: Evidencias de cambios en la dirección de extensión en esa latitud (?). *Geos*, v. 15, no. 2, p. 69.
- Miller, N.C., Lizarralde, D., 2013. Thick evaporites and early rifting in the Guaymas Basin, gulf of California. *Geology* 41 (2), 283–286.
- Molina-Cruz, A., 1994. Biostratigraphy and paleoceanographic significance of the radiolarians from the protomouth of the Gulf of California. *Ciencias Marinas* 20 (4), 441–465.
- Morán-Zenteno, D.J., 1984. Geology of the Mexican Republic. American Association of Petroleum Geologists, *Studies in Geology* 39, Tulsa, OK, USA, 160 p.
- Mueller, K., J., and Rockwell, T. K., 1991. Late Quaternary structural evolution of the western margin of the Sierra Cucapa, northern Baja California. In: Dauphin, J.P., and Simoneit, B.T., eds., *The Gulf and Peninsular provinces of the California*. Tulsa, OK, Amer. Assoc. Petrol. Geol. Memoir, v. 47, p. 249–260.

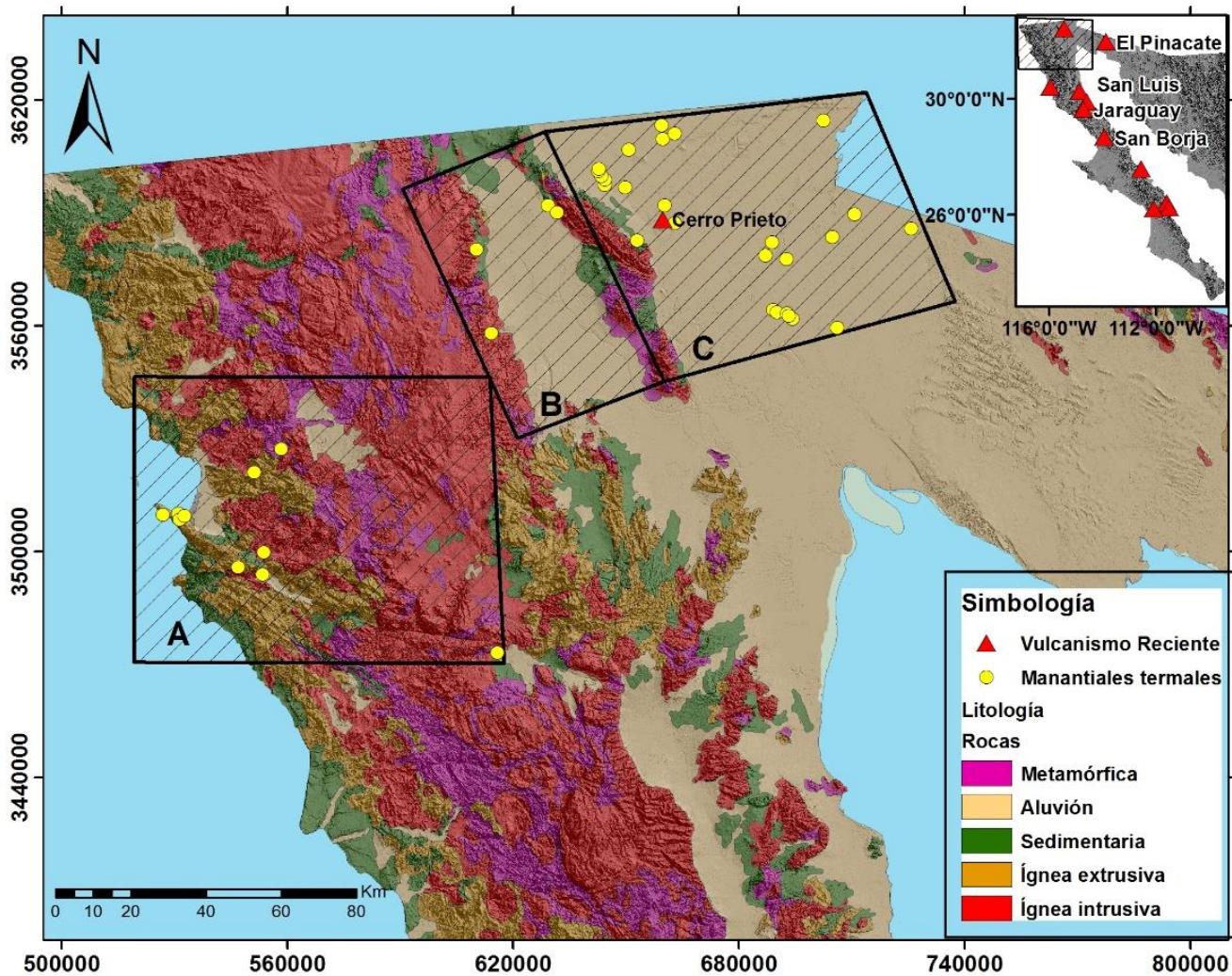
- Mueller, K.J., Rockwell, T.K., 1995. Late Quaternary activity of the Laguna Salada Fault in northern Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin* 107, 8–18.
- Osokin, M., Stock, J.M., 2003. Marine incursion synchronous with plate-boundary localization in the Gulf of California. *Geology* 31, 23–26.
- Pacheco, M., Martín-Barajas, A., Elders, W., Espinosa-Cardena, J.M., Helenes, J., Segura, A., 2006. Stratigraphy and structure of the Altar basin of NW Sonora: implications for the history of the Colorado River delta and the Salton trough. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 23 (1), 22.
- Pérez-Flores, M.A., Suárez-Vidal, F., Gallardo-Delgado, L.A., González-Fernández, A., Vázquez, R., 2004. Structural pattern of the Todos Santos Coastal Plain, based on geophysical data. *Ciencias Marinas* 30, 349–364.
- Portugal, E., Birkle, P., Barragan, R., Arellano, R.M.G., Tello, V.M., Tello, E.M., 2000. Hydrochemical-isotopic and hydrogeological conceptual model of the Las Tres Vírgenes geothermal field, Baja California Sur, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 101, 223–244.
- Portugal, E., Izquierdo, G., Truesdell, A., Álvarez, J., 2005. The geochemistry and iso-tope hydrology of the Southern Mexicali Valley in the area of the Cerro Prieto, Baja California (Mexico) geothermal field. *J. Hydrol.* 313, 132–148.
- Prol-Ledesma, R.M., Canet, C., Torres-Vera, M.A., Forrest, M.J., Armienta, M.A., 2004. Vent fluid chemistry in Bahía Concepción coastal submarine hydrothermal system, Baja California Sur, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 137, 311–328.
- Prol-Ledesma, R.M., Ortega, A., 1988. Geochemical evidence of a thermal component in the groundwater of the San Juan Londó Valley, Baja California Sur, Mexico. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 12, 137–141.
- Puente, C., De-La-Peña, A., 1979. Geology of the Cerro Prieto geothermal field. *Geothermics* 8, 155–175.
- Quijano, J.L., 1985. Evaluación geoquímica de las zonas termales del Estado de Baja California Sur. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoelectréticos, Departamento de Exploración. Inédito.
- Santillán, M., Barrera, T., 1930. Las posibilidades petrolíferas en la costa occidental de la Baja California, entre los paralelos 30 y 32 de latitud norte. *Anales del Instituto de Geología* 5, 1–37.
- Savage, J. C, Lisowski, M., King, N. E., and Gross, W. K., 1994, Strain accumulation along the Laguna Salada fault, Baja California, Mexico. *Jour. Geophys. Res.* v. 99, pp. 18,109-18,116.
- Seiler, C., Fletcher, J.M., Quigley, M.C., Gleadow, A.J.W., Kohn, B.P., 2010. Neogene structural evolution of the Sierra San Felipe, Baja California: evidence for proto-gulf transtension in the Gulf Extensional Province? *Tectonophysics* 488, 87–109.
- Siem, M.E., 1992. The structure and petrology of Sierra El Mayor, northeastern Baja California, Mexico. M.S. Thesis, San Diego State University, San Diego, California, 244 p. Inédito.
- Skinner, L.A., Umhoefer, P.J., Kluesner, J.W., 2012. The Proto Southern Gulf of California Represented by GIS Plate Tectonic Reconstructions. *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Spelz, R.M., Fletcher, J.M., Owen, L.A., Caffee M.W., 2008. Quaternary alluvial-fan development, climate and morphologic dating of faults scarps in Laguna Salada, Baja California, Mexico. *Geomorphology* 102, 578-594.
- Tello, E., Tovar, R., 1993. Geoquímica de detalle de la zona geotérmica de Laguna Salada, BC. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoelectréticos, Departamento de Exploración. Inédito.

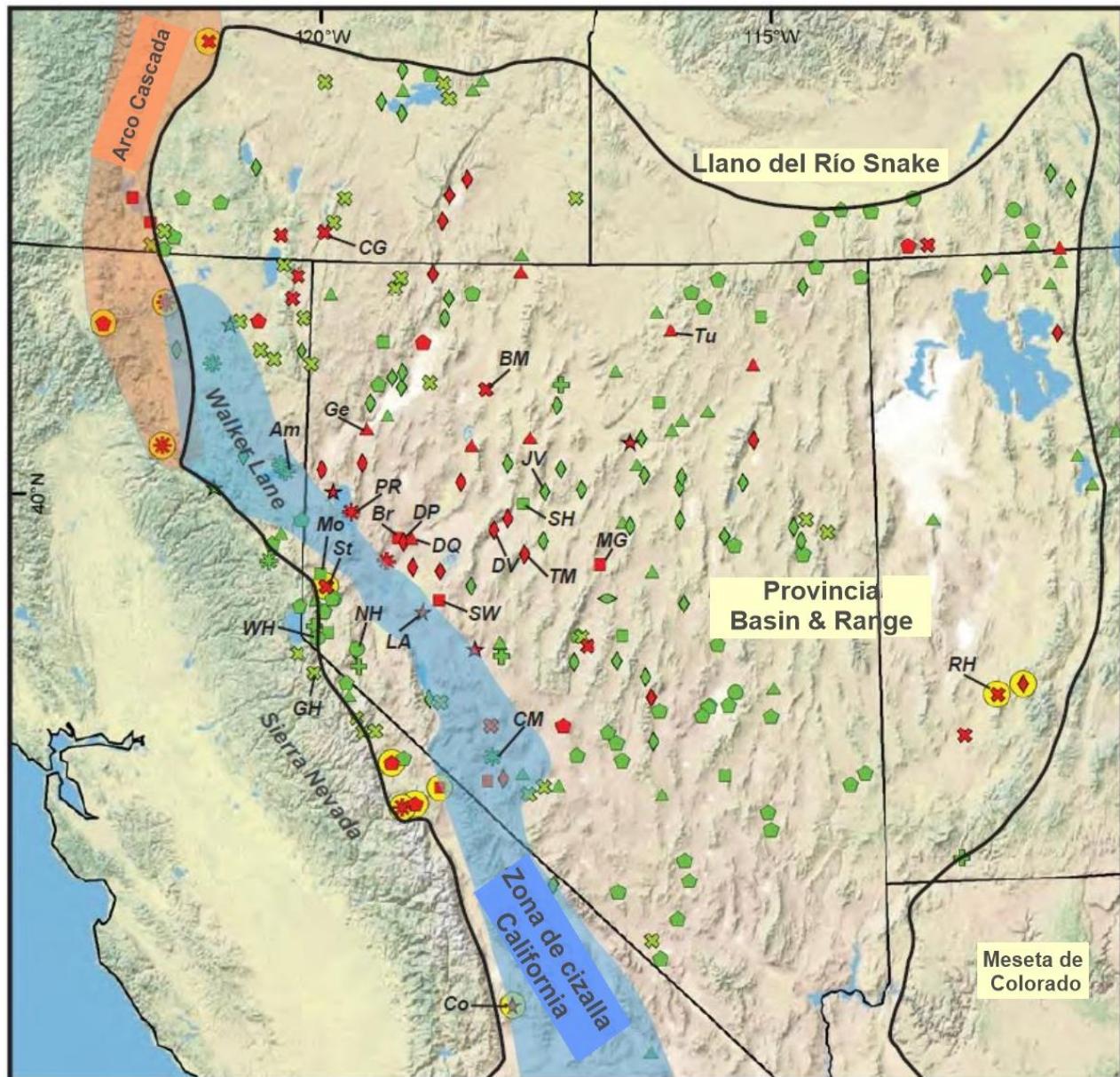
Vidal, V.M.V., Vidal, F.V., Isaacs, J.D., Young, D.R., 1978. Coastal submarine hydrothermal activity of northern Baja California. *J. Geophys. Res.* 83, 1757–1774.

Wernicke, B., Axen, G. J., and Snow, J. K., 1988, Basin and Range extensional tectonics at the latitude of Las Vegas, Nevada: *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v. 100, p.1738-1757.

Zoback, M. L., Zoback, M. D., Adams, J., Bell, S., Suter, M., Suárez, G., Jacob, K., Estabrook, C., and Magee, M., 1991. Stress map of North America: Continent scale map 005, *Geol. Soc. Amer.*, 1: 5,000,000 scale.

FIGURAS





Patrones Estructurales: Símbolos rojos > 150°C, Símbolos verdes <150°C

- | | | |
|--|--|---|
| ▲ Terminación de fallas normales mayores | ● Apéndices o salientes de fallas normales | ★ Pull-apart en zonas de fallas laterales |
| ◆ Escalones o rampas relevo en fallas | ◆ Fallas normales antitéticas | ◆ No definido |
| ■ Zona de acomodamiento | ✖ Intersección de fallas | ● Sistema magnético inferido o conocido |
| ✚ Fallas normales mayores | ✳ Zona de transferencia | |

Figura 2. Catálogo de datos de los patrones estructurales en los sistemas geotérmicos de la Gran Cuenca, elaborado por Faulds et al. (2011). Símbolos rojos: sistemas geotérmicos de alta temperatura (> 150°C); símbolos verdes: sistemas de baja temperatura (< 150°C). Los sistemas geotérmicos identificados son: Am, Amedee; BM, Blue Mountain; Br, Brady; CG, Crump Geyser; CM, Columbus Marsh; Co, Coso; DP, Desert Peak; DQ, Desert Queen; DV, Dixie Valley; Ge, Gerlach; GH, Grover's Hot Springs; JV, Jersey Valley; LA, Lee-Allen; MG, McGinness; Mo, Moana; NH, Nevada Hot Springs; PR, Pyramid Rock; RH, Roosevelt Hot Springs; SH, Sou Hot Springs; St. Steamboat; SW, Salt Wells; TM, Tungsten Mountains; Tu, Tuscarora; WH, Walley's Hot Springs.

Tomado de Faulds et al. (2011).

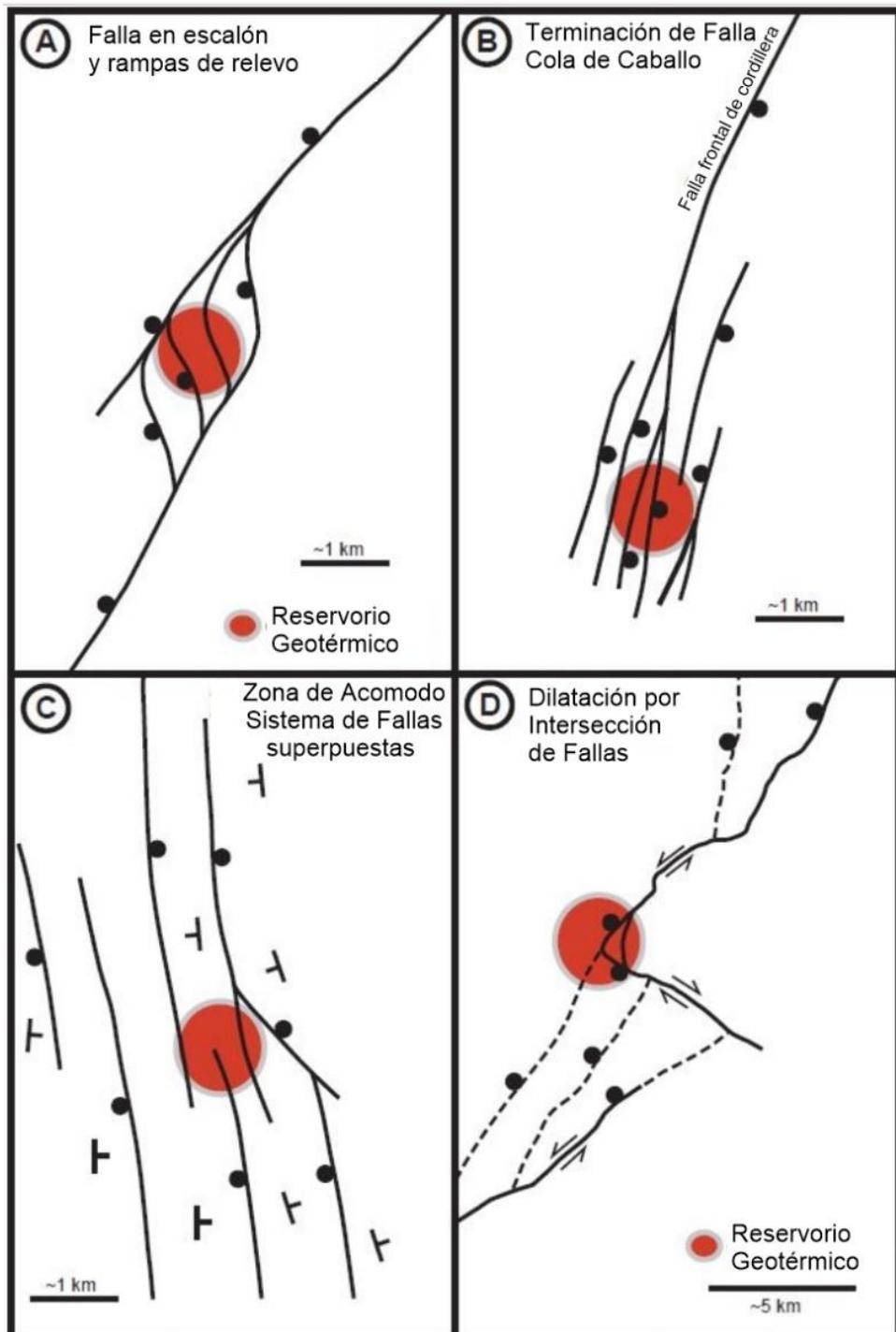


Figura 3. Imágenes ejemplificando algunos de los patrones estructurales favorables a los sistemas geotérmicos. Las áreas donde se almacena el fluido geotérmico son los círculos rojos. A: Fallas en escalón y rampas relevo entre dos segmentos de fallas normales superpuestas con fallas menores múltiples proporcionando una fuerte conexión entre las dos fallas mayores. B: Terminaciones de fallas normales mayores, en donde las fallas se dividen en múltiples ramificaciones de cola de caballo. C: Solapamiento, sistema de fallas normal con buzamientos opuestos (zona de acomodo) que genera múltiples intersecciones de falla en la superficie; Los símbolos de rumbo y buzamiento indican la dirección de basculamiento de los bloques de falla. D: Dilatación de intersección de fallas entre fallas normales y laterales. Tomado de Faulds et al. (2011).

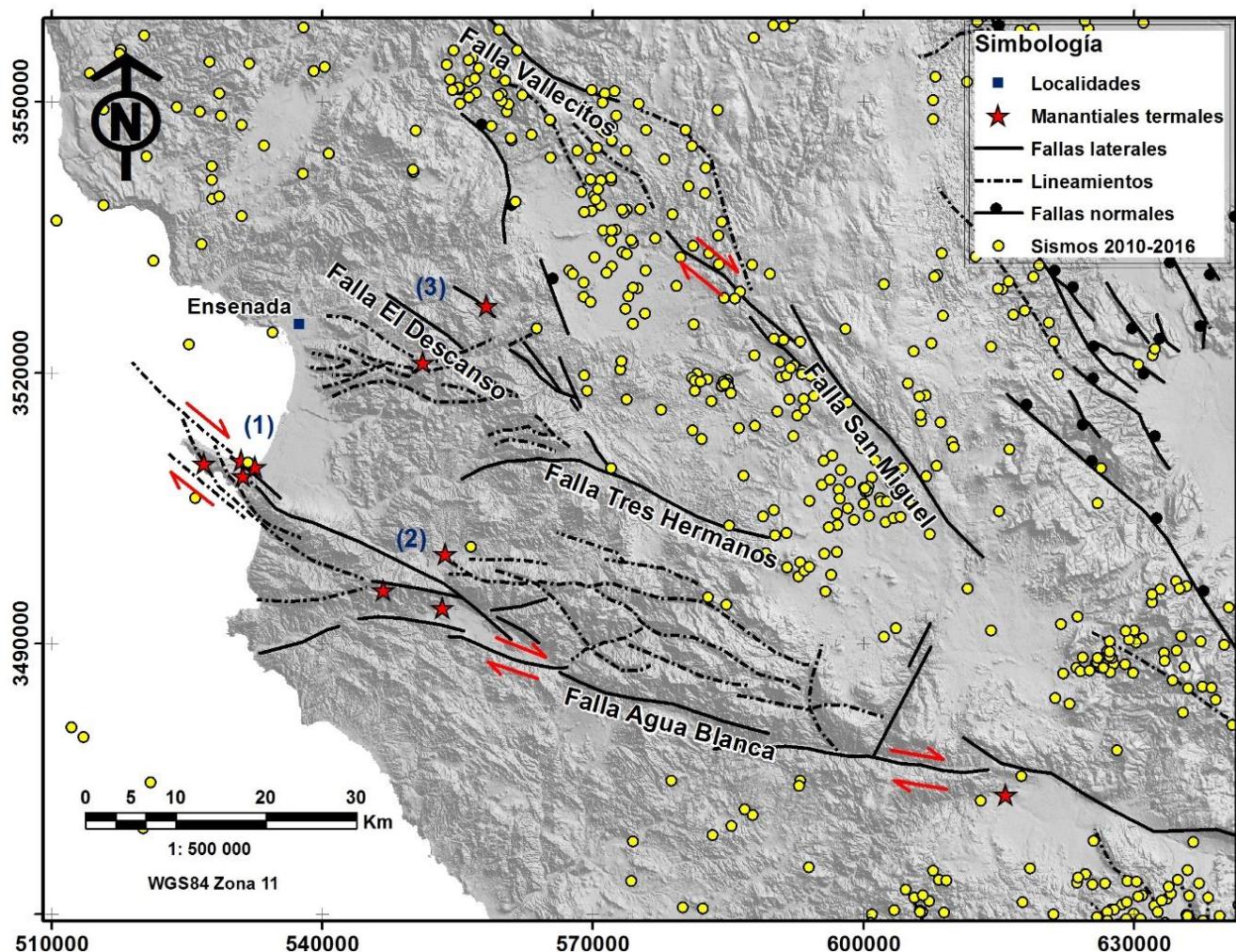


Figura 4. Mapa estructural del área de Ensenada que muestra las tres zonas de interés geotérmico con estrellas rojas: 1) Punta Banda, 2) Ejido Uruapan y Valle de Santo Tomás, y 3) San Carlos y Las Pocitas. En círculos amarillos los sismos registrados entre 2010 y 2016. Regionalmente la zona muestra un patrón estructural favorable de tipo pull-apart limitado por las fallas mayores de Agua Blanca y San Miguel de movimiento lateral-derecho. Las zonas 1 y 2 se observan en la terminación de cola de caballo de la Falla Agua Blanca, mientras que la zona 3 está en la terminación de cola de caballo de la Falla Tres Hermanos-El Descanso.

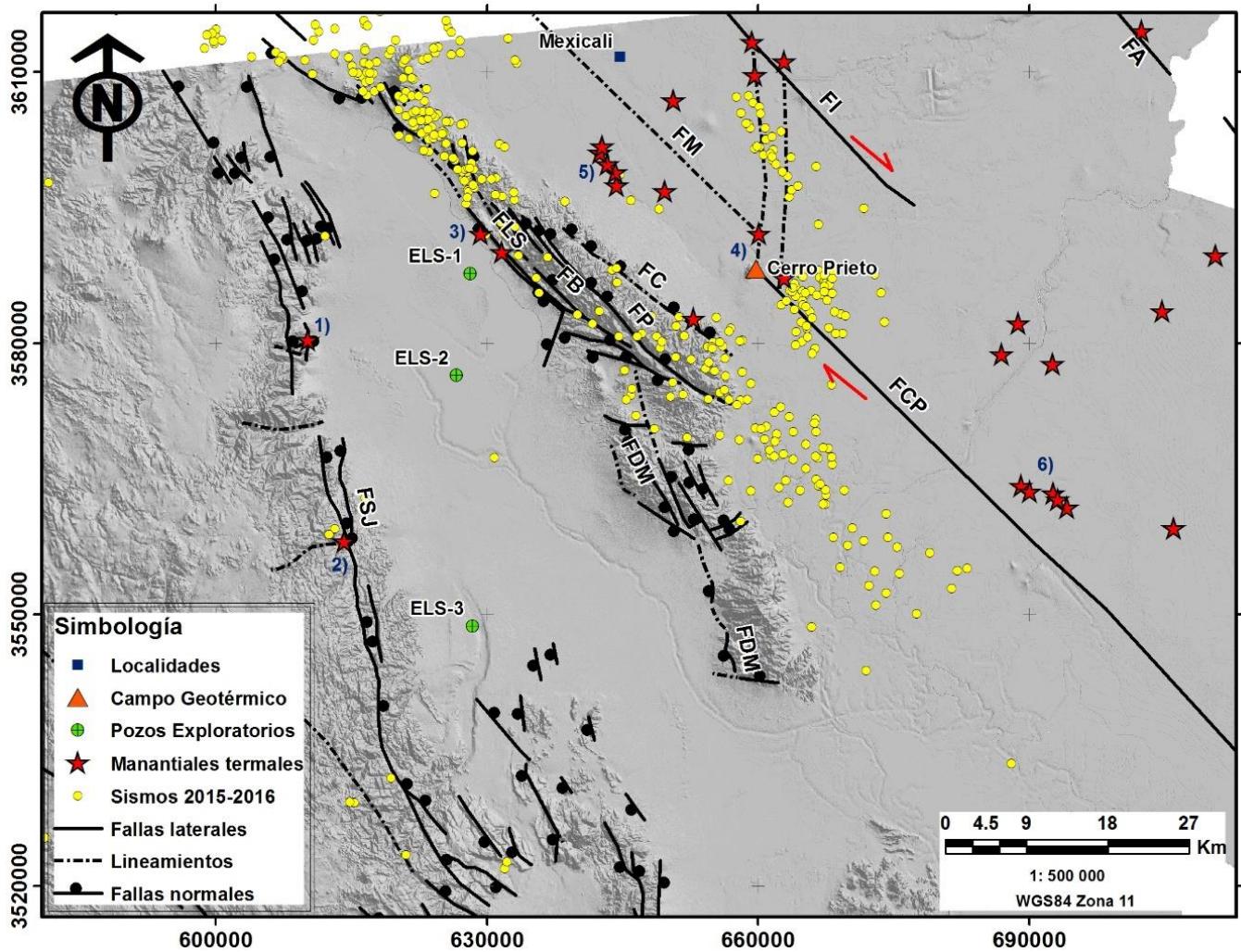


Figura 5. Mapa estructural del área de Laguna Salada y Valle de Mexicali que muestra las seis zonas geotérmicas con estrellas rojas: 1) Cañón de Guadalupe; 2) El Tajo; 3) Laguna Norte y Agua Caliente; 4) Cerro Prieto; 5) Tulecheck; y 6) Riito. En triangulo anaranjado se indica el campo geotérmico de Cerro Prieto. Los círculos amarillos señalan epicentros de los años 2015-2016 y los círculos verdes los pozos perforados por la CFE en la zona de Laguna Salada. Las fallas más importantes de la zona son: FSJ, Falla Sierra de Juárez; FDM, Falla de despegue El Mayor; FLS, Falla Laguna Salada; FB, Falla Borrego; FP, Falla El Pescador; FC, Falla Cucapá; FM, Falla Martín; FI, Falla Imperial; FCP, Falla Cerro Prieto; FA, Falla Algodones. Las zonas termales de Laguna Salada están dentro de en una estructura regional de tipo pull-apart. Localmente las zonas 1 y 2 se encuentran en un cruce de estructuras NNE y E-W, además de una zona de acomodo de sistemas de fallas superpuesta con buzamientos opuestos. La zona 3 se localiza en una terminación de tipo cola de caballo correspondiente a las fallas FLS, FB y FP. Mientras que, para las zonas del Valle de Mexicali, sólo se identifica una estructura regional de tipo pull-apart y la zona 4 localmente se localiza en la terminación de la falla FCP. En las zonas 5 y 6 se asume que las estructuras se encuentran sepultadas por los sedimentos.