

## Propuesta para definir el potencial geotérmico de la nueva zona termal Cucapah ubicada al oeste del valle de Mexicali, BC, México

**Julio Álvarez Rosales, Juan Manuel Camacho Hernández, Víctor Ilitch Gallardo Federico,  
Griselda Macías Valdez y Diego Herrera Carrillo**

Residencia General de Cerro Prieto. Residencia de Estudios. Departamento de Geología y  
Geofísica. Campo Geotérmico de Cerro Prieto, B.C., México. Correo: [juan.camacho02@fce.gob.mx](mailto:juan.camacho02@fce.gob.mx)

### Resumen

El valle de Mexicali en B.C., México es conocido por su potencial geotérmico, ya que junto con el valle Imperial en Estados Unidos forma la provincia de Salton Trough, que incluye a los campos geotérmicos en activo de Salton Sea y Cerro Prieto, así como varias zonas termales que no han sido aprovechadas por considerarlas de baja entalpía. El 4 de abril de 2010 ocurrió un sismo de magnitud 7.2 con epicentro en la porción sur de la sierra Cucapah, cerca de las estribaciones de la sierra El Mayor y poco después se reportaron fumarolas al NNW del epicentro y al SW de la manifestación termal Calderón, identificada desde 1952. Visitas de reconocimiento geológico efectuadas a principios de 2011 confirmaron que continúa activa una fumarola al SW de la sierra Cucapah en una zona muy fracturada, descubriendose la presencia de volcanes de lodo inactivos y zonas húmedas. Esta zona fue incluida en la carta de focos termales de México y se propone llevar a cabo una serie de estudios complementarios de índole geológica, geoquímica y geofísica en ella para definir su posible potencial geotérmico.

*Palabras clave:* Exploración, sierra Cucapah, valle de Mexicali, fumarolas.

### Introducción

Desde los inicios de la exploración geotérmica en el Valle de Mexicali la sismicidad ha sido una de las principales características debido a su entorno tectónico relacionado con el movimiento relativo de las placas del Pacífico y Americana que ha dado origen a la provincia extensional del Golfo, siendo las fallas Cerro Prieto e Imperial las de mayor actividad que forman el centro de dispersión donde se ubica el campo Geotérmico de Cerro Prieto. Sin embargo, el movimiento telúrico del 4 de abril de 2010 de magnitud 7.2 en la escala de Richter se considera uno de los eventos sísmicos de mayor relevancia, ya que además de provocar daños al sistema hidráulico y agrícola del valle de Mexicali evidenció una vez más el importante potencial geotérmico de la zona originando la presencia de fumarolas en la sierra Cucapah y que de un antiguo pozo de observación abandonado de la antigua Secretaría de Recursos Hídricos, cercano a la zona termal de Tulecheck, fluyera vapor por unos días.

Debido a lo anterior y a las manifestaciones termales reportadas por el CICESE en la Sierra Cucapah durante la Reunión Anual Geofísica Mexicana 2010, personal de la Residencia General de Cerro Prieto CFE, se dio a la tarea de realizar reconocimientos geotérmicos para definir su interés para aprovechamiento.

Derivado de la visita de reconocimiento a la sierra Cucapah, se implementó un programa de exploración geotérmica iniciando con el estudio geológico estructural y muestreo para geoquímica.

## Objetivos

- Mostrar el avance del Estudio Geológico-Estructural (exploración superficial) realizado en la zona Termal Cucapah.
- Proponer que tanto la manifestación Calderón reportada en 1952, como la zona termal Cucapah sean incluidas en el plano de focos termales de la República Mexicana.

## Ubicación

Con la información aportada por el reconocimiento geotérmico realizado en enero del presente año, se definió en principio un área de estudio de 11 km<sup>2</sup>. La zona se localiza en el extremo suroriental de la sierra Cucapah, aproximadamente 38 kilómetros al sur de la ciudad de Mexicali. El acceso es a través de 23 kilómetros de brecha y arroyos que parten del poblado López Mateos, a la altura del kilómetro 40 de la carretera federal No.5 Mexicali-San Felipe y continúa al oeste-noroeste a lo largo del arroyo Cañada David; y posteriormente, hacia el este hasta llegar a una serie de arroyos en las faldas de la sierra Cucapah (Figura 1).

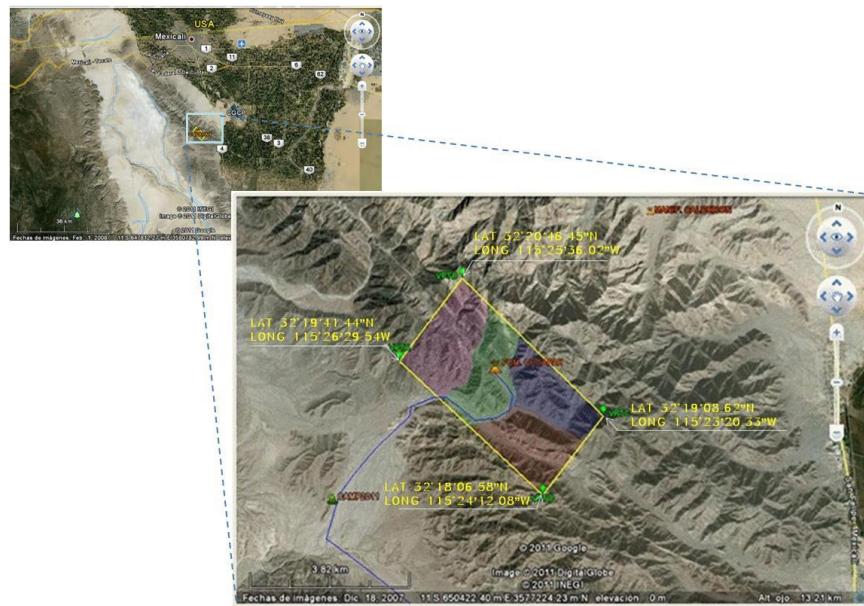


Figura 1. Localización del área de estudio en la porción sur-oriental de la sierra Cucapah (imagen Google Earth).

## Metodología

Después de la ubicación física de la fumarola al suroeste de la sierra Cucapah, se inició la exploración geotérmica superficial mediante el estudio geológico estructural. Posteriormente se continuará con los estudios geofísicos y geoquímicos para establecer el potencial geotérmico y su factibilidad de aprovechamiento para generar energía. Con el modelo geológico – geotérmico, se definirá si existen las condiciones geológico – térmicas para determinar la existencia o no de un yacimiento, y si éste es de alta o baja entalpia.

Actualmente se lleva a cabo el Estudio Geológico Estructural de la zona Termal Cucapah con carácter exploratorio. Se instaló el campamento en terreno abierto por razones de seguridad dado el dinamismo sísmico de la zona. Se realizaron caminatas diarias de dos horas aproximadamente para llegar al área de exploración ya que ésta se encontraba alrededor de 5.5 km al NE del campamento. Se utilizaron imágenes en Google Earth y planos escala 1:50 000 y 1: 10 000 obtenidos de la carta topográfica de INEGI I11D75. Adicionalmente, hasta el momento se ha realizado el muestreo de gases y suelo para análisis químico e interpretación geoquímica, además del establecimiento de una rejilla térmica para establecer la dirección del flujo de calor en la zona.

En base a un área delimitada de 11 km<sup>2</sup> (determinada así en función de las estructuras geológicas anexas a la zona hidrotermal) se pretendió abarcar la mitad del área total representada en colores verde y magenta en la Figura 1. Por cuestiones de tiempo y distancias, así como de prioridad evidente, los trabajos se desarrollaron en el área termal (polígono verde), al observar en primera instancia que la zona complementaria noroeste formada por el polígono magenta no evidenciaba el mismo interés geológico que el que se exploró. Esto no quiere decir que la zona noroeste deje de ser relevante; de realizarse posteriores visitas exploratorias debe entonces tomarse en cuenta las áreas aledañas a la zona termal para conformar y complementar el contexto geológico-estructural delimitando así con mayor precisión los alcances geotérmicos del lugar.

Durante el estudio se tomaron datos litológicos (petrología), sedimentológicos (disposición en campo), estratigráficos (contactos, estructuras sedimentarias) y estructurales (comportamiento de rumbos y echados de fracturamiento y fallas principales), así como colecta de muestras de roca para su análisis petrográfico. También se recolectaron muestras de suelos alterados hidrotermalmente y tres muestras de fluido para determinar química de gases.

### **Marco Geológico Regional**

La Provincia Extensional del Golfo (Gastil, 1975), que abarca la margen este de la península de Baja California y la margen oeste de la parte continental de México, está definida por estructuras formadas inicialmente a partir de un proceso extensional durante el Mioceno, que posteriormente evolucionó a un sistema transtensivo con la definición del límite de placas Pacífico-Norte América (Stock y Hodges, 1989). Esta evolución dio lugar a un rift oblicuo, caracterizado por el sistema de centros de dispersión y fallas transformes del Golfo de California y al sistema San Andrés. (Figura-2).

Los centros de dispersión en el Golfo de California se caracterizan por el magmatismo cuaternario y la actividad geotérmica (Lonsdale, 1989; Herzig y Jacobs, 1994). A partir del centro de dispersión ubicado más al norte de la serie distribuida a lo largo del golfo, se inicia el complejo sistema de falla de San Andrés, que representa la expresión norte del marco transtensivo (Mitchell y Reading, 1986; Irwin, 1990).

Se ha propuesto que la parte norte del escarpe de sierra Juárez es la placa superior de una falla de bajo ángulo (tipo detachment, con raíz bajo las Sierras Peninsulares, formando la depresión de La Laguna Salada (Axen, 1995). El escarpe en esta región tiene más de 1000 metros y contiene una serie de fallas subparalelas de orientación NNO sintéticas y antitéticas a la falla de bajo ángulo Cañada David (Axen, 1995; Romero Espejel, 1996).

En el límite este, la presencia de la zona de falla tipo “detachment” con deslizamiento al oeste o al ONO implica que el basamento granítico-metamórfico expuesto en la Sierra Cucapah y Sierra El Mayor, formen el bloque de piso, levantado por erosión tectónica (Barnard, 1968; Siem y Gastil, 1994; Axen, 1995).

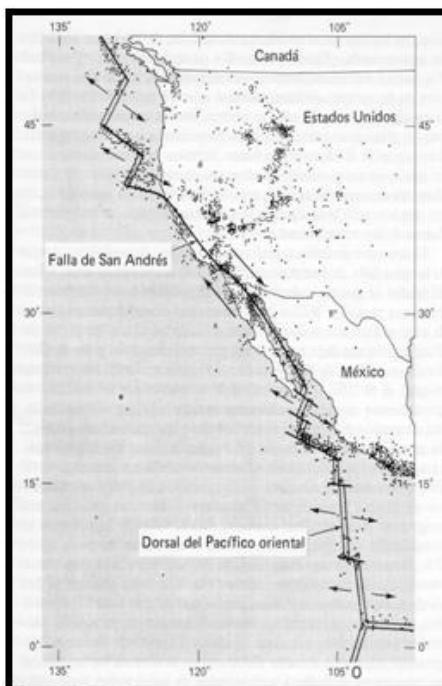


Figura 2. Imagen representativa del marco geológico regional.

En el borde SO de la Sierra Cucapá existen zonas de fallamiento dextral-oblicuo con orientación NO y tendencia paralela al sistema de falla San Andrés, principalmente la Falla Cucapah y la Falla Laguna Salada (Barnard, 1968, Gastil *et al.*, 1975; Suárez Vidal *et al.*, 1991).

La interacción de fallas de desplazamiento lateral y fallas normales ha contribuido el desarrollo de la cuenca de Laguna Salada y al levantamiento de las sierras El Mayor y Cucapá (Mueller y Rockwell, 1991; Siem y Gastil, 1994; Mueller y Rockwell, 1995).

## Estratigrafía

Las rocas pre-Cenozoicas en la región de la sierra Cucapah son esencialmente rocas metamórficas pre-batolíticas del Paleozoico (?) y rocas batolíticas e intrusivos del Cretácico, que forman los rasgos más abruptos al oeste de la sierra.

### Rocas del Basamento

En la sierra Cucapah afloran rocas metasedimentarias del Pérmico-Jurásico (?), de facies de sillimanita, probablemente producto de metamorfismo regional de alta temperatura y relativa baja presión; las más comunes son gneis cuarzofeldespático de hornblendita-biotita, gneis de sillimanita-almandino y calizas recristalizadas. Menos abundante es la anfibolita y raramente cuarcita (Barnard, 1968).

En la sierra El Mayor, afloran rocas metasedimentarias del Paleozoico (?), producto de un metamorfismo de alto grado (facies de anfibolita), principalmente gneis de granate, anfibolita, cuarcita y mármol (Siem, 1992).

En la porción centro-sur de la sierra Cucapah, está expuesto un intrusivo de tonalita (Tonalita La Puerta). La edad determinada por Plomo-alfa fue de 125-155 Ma (Barnard, 1968); la edad del mismo intrusivo, obtenida por K-Ar fue de  $62.6 \pm 1.5$  Ma (Gastil *et al.*, 1975). En la porción central una granodiorita (Granodiorita Cucapah), intrusionó al cuerpo de tonalita, implicando una edad posterior de emplazamiento (Barnard, 1968.).

La sierra El Mayor también incluye cuerpos intrusivos de tonalita a monzogranito en forma de diques, mantos y troncos (Siem, 1992).

### Rocas Volcánicas Terciarias

Las rocas volcánicas que afloran en la sierra Cucapah, son diques y derrames de andesita afanítica de color verde parduzco, probablemente emplazados en el Terciario (Barnard, 1968). Estas lavas cortan y sobreyacen a las rocas del basamento en la sierra Cucapah, se han reportado autobrechas y aglomerados de dacita porfídica de plagioclasa a dacita porfídica de hornblenda. Una edad de K-Ar de  $15.3 \pm 0.8$  Ma., fue publicada por Barnard (1968). En la sierra El Mayor existen diques de andesita afanítica verde a gris con fenos cristales de hornblenda, probablemente similares a los de la Sierra Cucapah (Siem, 1992).

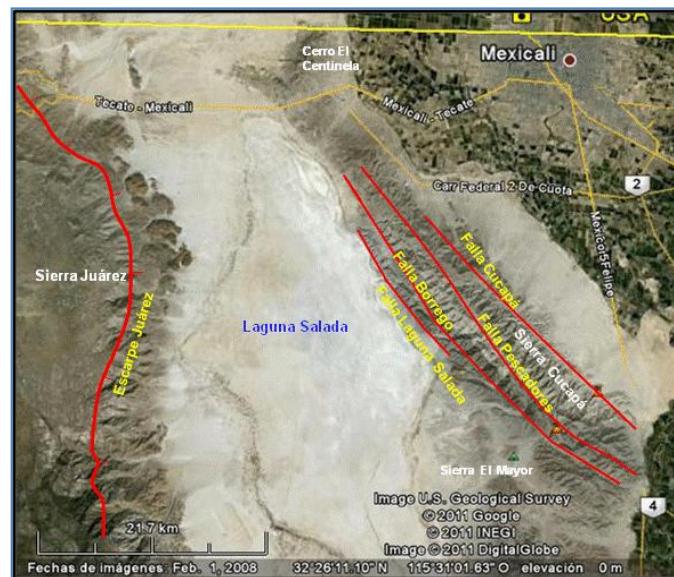
### Depósitos Cuaternarios

Existen depósitos cuaternarios Qal (Cuaternario aluvión), en la sierra Cucapah nombrados como conglomerado gris, su matriz es arenosa y se encuentra no consolidado, las capas horizontales del conglomerado reciente sobreyacen en discordancia angular a las diferentes unidades anteriormente descritas y su espesor aumenta considerablemente hacia el SO.

### Geología Estructural

La sierra Cucapah se encuentra dominada por un fracturamiento compensatorio muy importante con rumbo NO-SE conjugado con desplazamientos alternativos de ambos. Las fallas regionales (Figura 3) que imperan y afectan la continuidad de la sierra, son las fallas Cucapah, Borrego, Pescadores, de edad postmiocénica. La falla Laguna Salada, durante el evento distensivo del Mioceno tuvo un comportamiento lístrico, que evolucionó a dextral normal, que es el desplazamiento actual de las otras fallas mencionadas.

Figura 3. Principales fallas regionales al norte de Baja California



## Estudio Geológico Estructural

### Resultados preliminares

De forma general se menciona que hacia el oriente del área la litología está compuesta de rocas graníticas y granodioríticas cortadas por gran cantidad de diques cuarzofeldespáticos, hacia el oeste predomina un complejo metamórfico, conglomerados (rocas sedimentarias), rocas metasedimentarias así como arroyos. Se evidencia marcado fracturamiento, esto dado el tectonismo de la zona lo que ocasiona también gran presencia de caídos lo que dificulta la apreciación en la continuidad de rasgos estructurales importantes. Sin embargo, puede establecerse que los alineamientos estructurales principales y que fueron medidos son NW-SE con echados mayores a los 70°, incluso existen algunos prácticamente en dirección N-S. En base a lo anterior se presenta en la Figura 4 un plano geológico preliminar donde se muestra gráficamente la información señalada anteriormente.

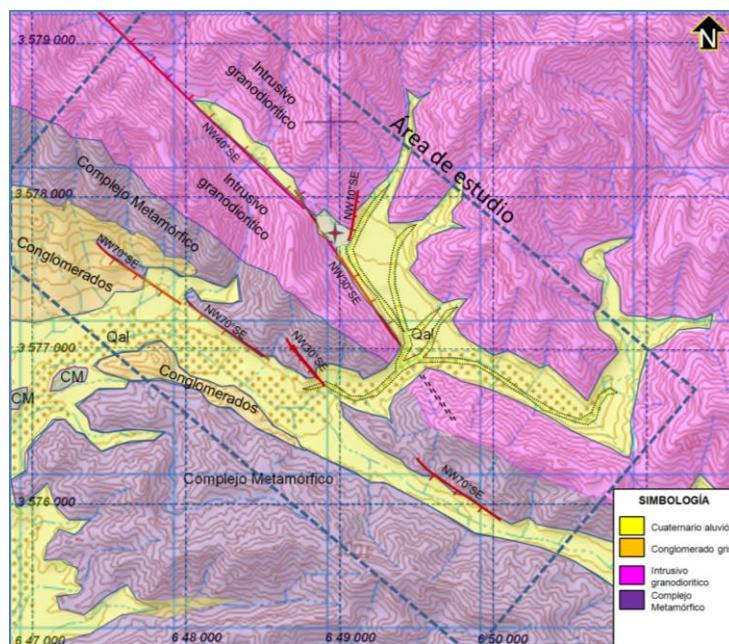


Figura 4. Plano Geológico preliminar de la zona de estudio, donde se muestran las principales estructuras.

En la Figura 5 se presenta la imagen mostrando las características anteriores en Google Earth para dar una visión más realista de la morfología del terreno. De igual forma, se observa también una serie de 11 puntos enumerados y marcados en azul que corresponden a algunas de las fotografías tomadas durante los caminamientos efectuados al momento de la exploración a la zona termal de la fumarola.

A continuación se muestran las 10 imágenes a las que se hizo referencia anteriormente. Por otra parte se menciona que la falla principal localizada en la zona norte de la fumarola (Figura 5) y cuyos datos estructurales fueron tomados en campo corresponde a la falla de tipo regional denominada Pescaderos de edad pliocénica y desplazamiento lateral derecho.

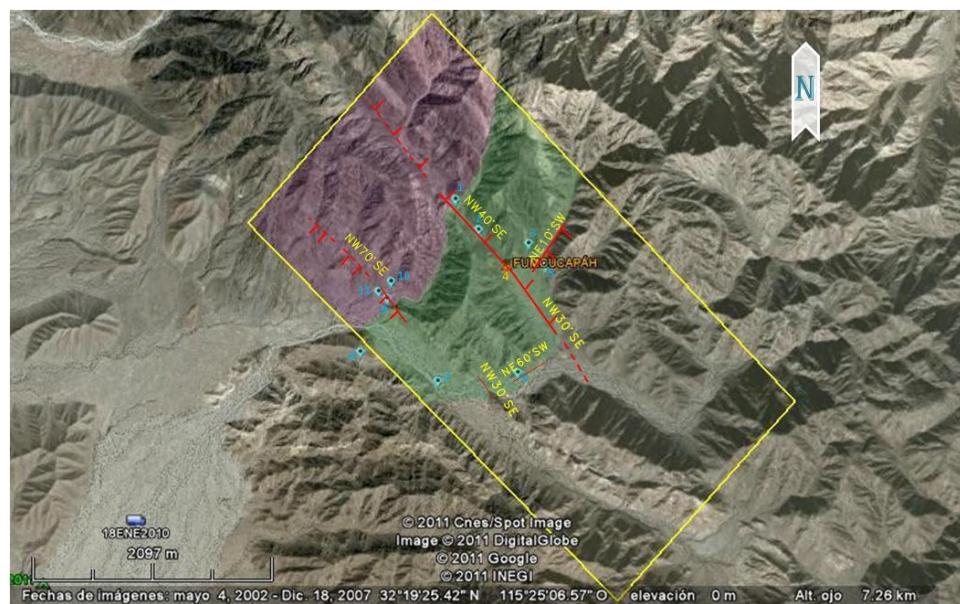
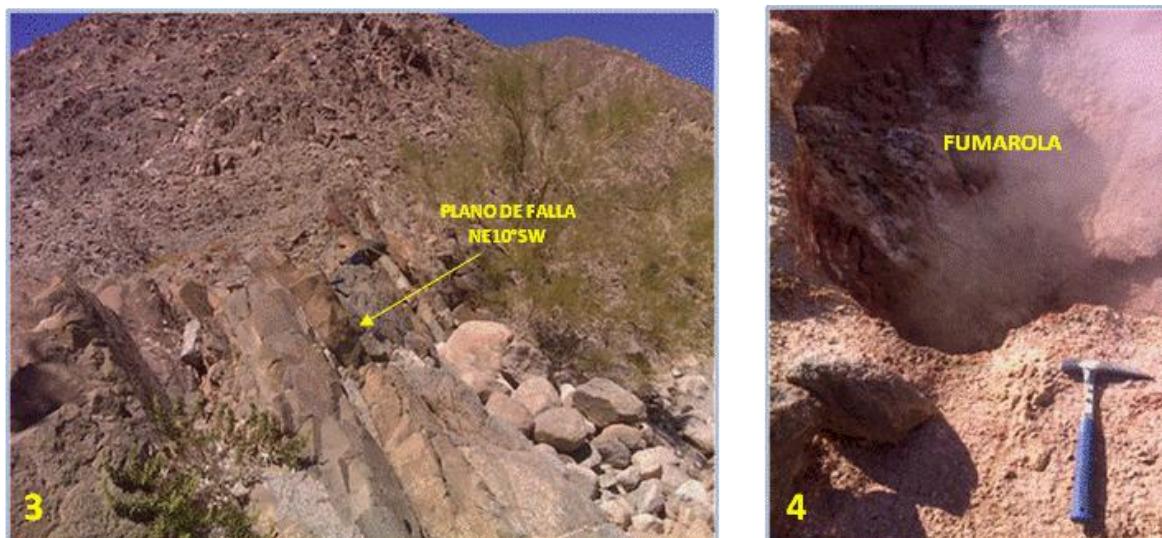
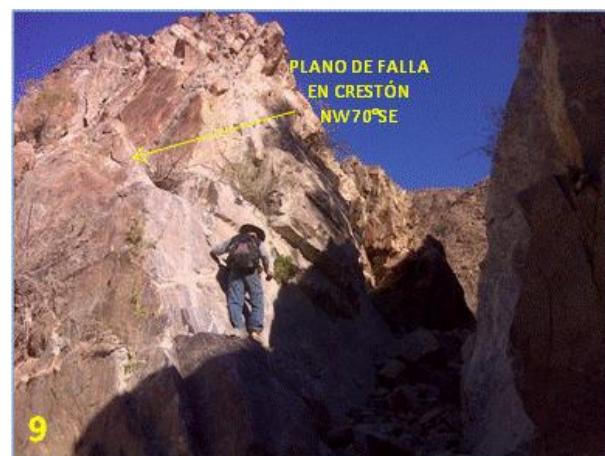
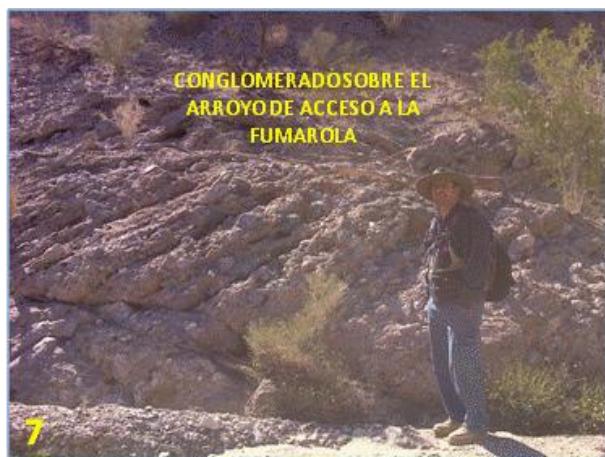
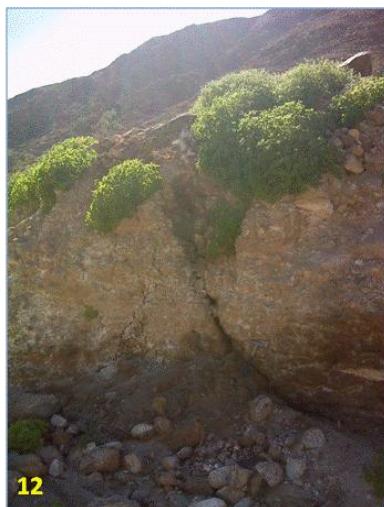
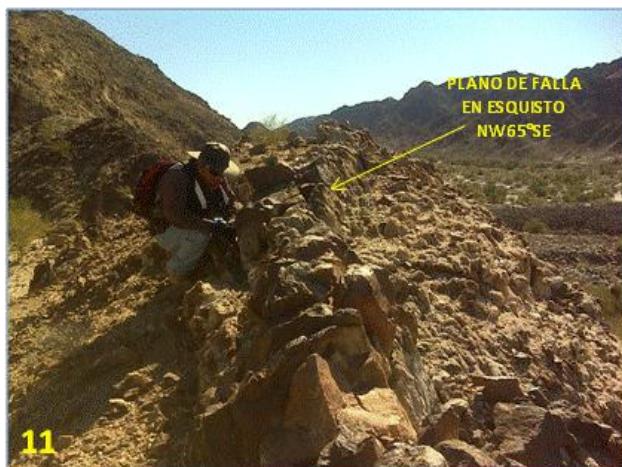


Figura 5. Vista en Google Earth de las principales estructuras localizadas en el área explorada.







Al continuar con el reconocimiento en la zona propia de la fumarola, parece ser que el material (suelo) *in situ* en la que se ubica la fumarola (Fotografías 12 y 13) corresponde a roca totalmente degradada indicativo de un intenso y prolongado intemperismo químico, además se menciona que la zona está cubierta por material rocoso (caídos) lo que a su vez impide observar la continuidad (salvo algunos tramos) hacia el sur de la falla pescadores la cual en contraste se aprecia bastante bien al norte de la fumarola.

## Geotermia

### *Exploración geotérmica en su primera etapa*

La exploración geotérmica en la sierra Cucapah comienza con la adquisición, compilación y evaluación de todos los datos existentes. Una visita al área de estudio para comprender los procesos geológicos-estructurales asociados a una manifestación termal recientemente descubierta, fue el propósito de este trabajo que en conjunto con otros complementarios para tratar de formular un modelo conceptual preliminar.

La manifestación termal de la sierra Cucapah está compuesta por una fumarola de aproximadamente 30 m de altura (penacho de vapor, por su altura se deduce que tiene gran presión y particularmente el vapor se observa sin agua en superficie, por lo que posiblemente escurra dentro de la oquedad o sea seco) y otras manifestaciones. El conducto tiene una forma circular de aproximadamente 1,5 m de diámetro con una ligera inclinación hacia el noreste, la fumarola forma parte de una estructura tipo montículo de lodo color café ocre de aproximadamente 2 m de altura, cubierta parcialmente por depósitos de talud y abanicos aluviales de los cerros aledaños.

Esta fumarola se encuentra asociada a otras manifestaciones termales dentro de un área aproximada de 12,500 m<sup>2</sup> como son: conos de lodo secos con escaso vapor, fracturas humeantes y depósitos de talud también humeantes. Se midió la temperatura dentro del área de influencia y se observó que la temperatura variaba de 100°C (cerca de la fumarola) a 55°C (temperatura promedio del suelo). Una forma muy interesante de observar la zona de influencia de la manifestación termal fue la vegetación de matorrales predominantemente verdes asociados a la superficie húmeda causada por la manifestación termal.

Desde el punto de vista estructural, se observaron fallas y fracturas con rumbos asociados a la manifestación termal en un patrón NW-SE (de 30° a 45°) asociada con la falla Pescadores y un sistema NE-SW (de 10° a 30°) y N-S dentro de la zona de influencia, la roca (granodiorita) y depósitos de talud se encuentran alteradas, con arcillas blancas (alteración de plagioclasas) material rojizo alterado (oxidado) y un ligero olor a azufre en el material.

#### *Exploración geotérmica en su segunda etapa.*

Posteriormente se complementó la visita exploratoria superficial tomando datos geológicos y estructurales en el área restante de la propuesta originalmente (sur de la fumarola). Se muestreó fluido (líquido) en área adyacente a la zona termal, suelo, roca y gases para su posterior análisis químico, así como datos de temperatura a través del establecimiento de una rejilla térmica. Actualmente esta información se está procesando después de haberla integrado con la de la primera etapa de exploración para presentar un segundo avance en consecuencia más completo de las características geológicas, químicas y térmicas de la zona termal en la que se encuentra la fumarola Cucapah.



*Tulecheck*

Producto del sismo de abril de 2010, un antiguo pozo de la antigua SARH se destapó y estuvo fluyendo agua y vapor con temperaturas desde 70 a 90°C por aproximadamente dos semanas al sur de la zona de manifestaciones termales. Por lo tanto, y no obstante los resultados no satisfactorios de los dos pozos perforados en 2010, se recomienda continuar con la exploración directa bajo el esquema de ciclo binario en esa zona termal.

#### **Conclusiones**

Se inició la etapa exploratoria superficial de la zona termal de la sierra Cucapah mediante un estudio geológico estructural, muestreo para geoquímica y toma de temperaturas.

Mediante esas primeras visitas exploratorias a la zona de la fumarola localizada al suroeste de la sierra Cucapah, se ha constatado físicamente la presencia de actividad termal en la mencionada zona. Por ello, se propone incluir esta zona en la carta de focos termales de México.

Se levantó la geología y se tomaron datos estructurales, evidencia fotográfica, video, muestreo de gases y suelo para análisis químico e interpretación geoquímica, y se estableció una serie de 50 puntos en los que se midió la temperatura en el suelo próximo a la fumarola para formar una rejilla térmica a través de la cual se pudiera definir una probable dirección del flujo de calor en la zona.

Al oriente del área explorada hay predominancia de rocas ígneas de tipo granodiorita, diorita y granito cortadas por diques cuarzofeldespáticos. Al oeste se aprecia un complejo metamórfico compuesto principalmente por pizarras, esquistos y gneiss, así como rocas metasedimentarias (calizas silicificadas), y conglomerados. En su totalidad los grandes cuerpos rocosos presentan alto grado de fracturamiento y fallamiento.

Es posible la asociación de la fumarola (como parte de una manifestación en superficie) con la zona de influencia de la falla Pescadores, la cual es una de las estructuras regionales que enmarcan el contexto tectónico de la sierra Cucapah. Se observó que el área próxima a esta zona termal está cubierta por material de caídos cubriendo la visibilidad de la posible continuidad de la falla en el área.

El suelo donde se ubica la fumarola parece en realidad la degradación de la roca por la misma acción química del fluido de la fumarola. A reserva de lo que indiquen futuros estudios, puede establecerse que la fumarola no es reciente, es decir, no apareció debido al sismo del 4 de abril de 2010, sino en todo caso éste la reactivó.

### **Recomendaciones**

Continuar con los estudios geológicos correspondientes para sustentar la posible viabilidad geotérmica de la zona, es decir, incorporar en las subsecuentes etapas de exploración trabajos de geofísica, geoquímica, así como estudios hidrogeológicos para definir el modelo geológico-geotérmico de la zona.

Se recomienda continuar con la exploración, caracterizar la anomalía como de alta o baja entalpia y efectuar los estudios de prefactibilidad y factibilidad para aprovechar el recurso geotérmico.

Continuar la exploración directa en la zona termal de Tulecheck con objetivos de de ciclo binario.

### **Bibliografía**

- Axen, G., y H. Romero Espejel, 1994. Cambio de dirección en el buzamiento de los sistemas de fallamiento basal de la parte norte del escarpe principal del Golfo de California. Resumen. Reunión 1994, Unión Geofísica Mexicana, *Geos* 14, p. 74.
- Axen, G., 1995. Extensional segmentation of the main Gulf scarpment. Mexico and United States. *Geology*, 23, pp. 515-518.
- Barnard, F.L., 1968. Structural Geology of the Sierra de los Cucapas, northeastern Baja California, Mexico. Faculty of Graduate School of the University of Colorado, Boulder, Colorado, Doctoral Thesis. Inédito.

- Gastil, R.G., R.P. Phillips and E.C. Allison, 1975. Reconnaissance geology of state of Baja California". *Geol. Soc. of Amer. Memoir 140*. 170 p.
- Herzig, C.T. and D.C. Jacobs, 1994. Cenozoic volcanism and two-stage extensional in the Salton trough, southern California and northern Baja California". *Geology*, 22, pp. 991-994.
- Mitchell, A., and H.G. Reading, 1986. Sedimentation and Tectonics. In: G. Reading (ed). *Environments and Facies*. 2<sup>nd</sup> ed. Backwell Scientific Publication, Oxford. 615 p.p.
- Mueller, K.J and T.K. Rockwell, 1991. Late Quaternary structural evolution of the western margin of the Sierra Cucapa, northern Baja California. *Geol. Soc. of Amer. Bull.*
- Mueller, K.J and T.K. Rockwell, 1995. Late Quaternary activity of the Laguna Salada Fault in northern Baja California, Mexico. *Geol. Soc. of Amer. Bull.* 107, pp. 8-18.
- Stock, J.M and K.V. Hodges, 1989. Pre-Pliocene extension around the Gulf California and the transfer of Baja California the Pacific Plate. *Tectonics*, 8, pp. 99-115.
- Siem, M.E., 1992. The Structure and Petrology of Sierra El Mayor, northeastern Baja California, Mexico. San Diego State University, Master Thesis. Inédito.
- Siem, M. E. y G.R. Gastil, 1994. Mid -Tertiary to Holocene extension associated with the development of the Sierra El Mayor metamorphic core complex, northeastern Baja California, Mexico.
- Vásquez Hernández S., 1996 Estratigrafía y ambientes de depósito de la secuencia sedimentaria al oriente de la Laguna Salada, Baja California. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Inédito.