



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
CENTRO DE GEOCIENCIAS**

## **MODELO TRIDIMENSIONAL DE LA CALDERA DE LOS HUMEROS; IMPLICACIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉRMICAS**

### **TESIS**

**PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**PRESENTA:**

**FRANCISCO OMAIL FERNÁNDEZ MAYA**

**TUTOR:**

**DR. GERARDO CARRASCO NÚÑEZ  
CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM**

**MIEMBROS DEL JURADO:**

**DR. JOSÉ LUIS MACÍAS (INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNIDAD MICHOACÁN)**

**DRA. PENÉLOPE LÓPEZ QUIROZ (CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM)**

**DR. DAMIANO SAROCCHI (INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UASLP)**

**DR. FERNANDO CORBO CAMARGO (CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM)**

**SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, ENERO, 2021**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

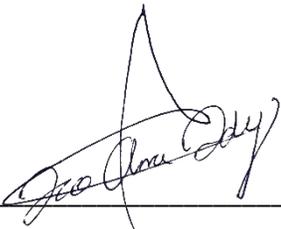
**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Declaración de ética**

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.



---

Francisco Omail Fernández Maya

## Resumen

El Complejo Volcánico de Los Humeros (CVLH) está ubicado en el límite oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano y aloja un reservorio geotérmico actualmente en explotación. Previa a la formación del CVLH, existió un periodo de intensa actividad efusiva (1.55 a 11 Ma), seguida por un periodo de formación de domos riolíticos pre-caldéricos (220 a 693 ka) que antecedió al vulcanismo explosivo asociado a la formación de un sistema de calderas anidadas durante el Pleistoceno, conocido como etapa caldérica (69 a 164 ka). Por último, un periodo de actividad volcánica que va desde hace aproximadamente 50 ka hasta el Holoceno, el cual incluye una fase de resurgencia en el centro de la caldera y una fase de vulcanismo explosivo y efusivo de tipo anular y composición bimodal (grupo post-caldérico). En el presente trabajo se realizó una recopilación y análisis de los estudios geológicos, geofísicos y geotérmicos más relevantes realizados en la Caldera de Los Humeros, que sirvieron de base para construir un modelo tridimensional (3D), a partir del uso del software de modelado Leapfrog Geo (licencia académica). Los resultados incluyen la modelación tridimensional de las unidades geológicas, las principales fallas, isothermas, zonas de permeabilidad. Además, se integraron datos como la distribución de la sismicidad, zonas de atenuación sísmica, zonas de fracturamiento, así como la visualización en 3D de mapas geológicos y geofísicos (mapas de anomalías magnéticas y anomalías de Bouguer), mapas de producción de vapor, perfiles magnetotelúricos, entre otros estudios. Con este modelo 3D se puede visualizar el yacimiento localizado a menos de 2500 metros de profundidad en rocas del grupo pre-caldérico, en su mayoría lavas andesíticas que presentan un moderado fracturamiento y microporosidades. Las isothermas están controladas directamente por las principales estructuras que se presentan dentro de la caldera. La capa sello está integrada parcialmente por la Ignimbrita Xáltipan dentro de la caldera cuyas litofacies presentan una distribución heterogénea que ocasiona variaciones en la permeabilidad. Las zonas de atenuación sísmica se correlacionan en su mayoría con zonas muy permeables y de poca producción de vapor. Parte de la sismicidad localizada al norte del campo geotérmico podría estar relacionada a los pozos inyectoros H-29 y H-38 debido a la cercanía de los sismos, aunque no se descarta la posibilidad que pudiera asociarse a procesos de resurgencia reciente a causada de vulcanismo silíceo reportado en el Holoceno tardío. A partir de las correlaciones se proponen varias zonas de interés con posible potencial geotérmico.

## **Dedicatoria**

*A mis padres que me mostraron el camino a la superación.*

## **Agradecimientos**

Al Dr. Gerardo Carrasco, gracias por la confianza brindada para desarrollar este proyecto, todos los conocimientos y experiencias compartidas, además de toda la ayuda que me ha brindado para continuar mi desarrollo profesional y académico.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme formar parte de esta gran casa de estudios, en especial al Centro de Geociencias que me brindo el apoyo de sus instalaciones, recursos y todo lo necesario para el desarrollo del proyecto. De igual manera al Posgrado del Centro de Geociencias, al Dr. Carlos Mendoza y al Dr. Alex Correa, y a sus asistentes Armando Ramírez y Blanca Rendón.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca de maestría otorgada. Al proyecto P05 del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo) No. 207032 y al proyecto 4.5 del consorcio GEMEX, financiado por el Fondo de Sustentabilidad Energética SENER-CONACyT No. 2015-04-268074, por su financiamiento a este proyecto particularmente para su finalización. Además, a la empresa SEEQUENT por brindar la licencia académica del software Leapfrog Geo.

Se agradece a la Comisión Federal de Electricidad y a su Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos por compartir información de relevancia para la realización de este trabajo.

Un especial agradecimiento a los miembros del jurado: a la Dra. Penélope López, al Dr. Jose Luis Macias, el Dr. Fernando Corbo, y al Dr. Damiano Sarrochi, por el tiempo y los consejos brindados en la revisión de esta tesis.

Al M.C. Javier Lermo y a la Ing. Nallely Jiménez por compartir información generada de sus trabajos. Al M.C. Javier Hernández Rojas, por compartirme sus conocimientos y explicarme las dudas que se desarrollaron en este trabajo, además por brindarme su amistad.

A la Licenciada Ana María González, gracias por su amistad, por brindarme todos esos consejos, por enseñarme que hay que ser comprometidos con el trabajo.

Gracias al Dr. Jaime Cavazos por todos los conocimientos transmitidos durante los viajes de campo, y por su amistad.

A la Dra. Paula Montoya, a la M.C. Argelia Silva y al M.C. Eliseo Hernandez por la orientación dada en el desarrollo del modelo en el software Leapfrog Geo.

Gracias a mis amigos del Centro de Geociencias, Daniela, Steven, Adrian, Bayona, Alexis, Carlos, Lenin, Oscar, Ivonne, Hector, Dante, Ivan por su amistad, consejos y compañía que hicieron más amena mi estancia en CGEO en el desarrollo de este trabajo.

Un especial agradecimiento a mi madre Marisol y a mi padre Francisco, y a mi familia por su apoyo incondicional en todo este tiempo de mi preparación profesional.

# INDICE

Resumen.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos .....	v
Lista de figuras.....	vii
Lista de tablas .....	ix
<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.3 Justificación. ....	3
1.4 Hipótesis. ....	4
1.5 Objetivos.....	4
1.6 Antecedentes .....	5
Modelos Conceptuales.....	5
Antecedentes de estudios geofísicos .....	12
Estudios sismológicos previos .....	13
<b>Capítulo 2. Marco geológico .....</b>	<b>17</b>
2.1 Generalidades del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) .....	17
2.2 Geología de La Caldera de Los Humeros .....	18
2.3 Basamento regional pre-volcánico.....	21
2.4 Vulcanismo de Los Humeros.....	22
Grupo pre-caldérico .....	22
Vulcanismo caldérico .....	23
Vulcanismo post-caldérico .....	25
2.5 Estratigrafía del subsuelo.....	26
<b>Capítulo 3. Metodología.....</b>	<b>31</b>
3.1 Generación de las bases de datos.....	31
3.2 Procesamiento de datos.....	33
3.3 Consideraciones del software .....	34
3.4 Desarrollo del modelo.....	36
<b>Capítulo 4. Resultados.....</b>	<b>39</b>
4.1 Modelo Geológico .....	40
Unidades geológicas.....	40

Modelo estructural de la caldera de Los Humeros.....	47
4.2 Modelo Geofísico.....	47
4.3 Modelo Geotérmico.....	52
<b>Capítulo 5. Discusión.....</b>	<b>56</b>
5.1 Representación del modelado geológico-estructural en el subsuelo.....	56
5.2 Caracterización e interpretación del sistema geotérmico de Los Humeros.....	57
Roca del reservorio.....	57
Roca Sello.....	62
Fuente de calor.....	64
5.3 Modelo conceptual geotérmico.....	67
5.4 Evaluación de zonas con posible potencial geotérmico.....	69
<b>Capítulo 6. Conclusiones.....</b>	<b>72</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>74</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>82</b>

## Lista de figuras

Figura 1. Localización de la Caldera de Los Humeros.....	2
Figura 2. Modelo conceptual de la cámara magmática que subyace al Campo Geotérmico de Los Humeros. Modificado de Verma (1985). .....	5
Figura 3. Modelo conceptual del Campo Geotérmico de Los Humeros Puebla propuesto por Viggiano y Robles (1988). .....	6
Figura 4. Modelo conceptual del campo geotérmico de Los Humeros Puebla (Arellano et al., 1999).....	7
Figura 5. Modelo hidrogeológico del campo geotérmico de Los humeros propuesto por Cedillo (2000). .....	8
Figura 6. Sección geológica propuesta por Cedillo (2000). .....	8
Figura 7. Sonda de registro de presión (Signature Quartz Gauges: Schlumberger, 2016)...	10
Figura 8. Perfiles de temperatura medida y estabilizada, pérdida de circulación, litología, arreglo de tuberías e índices de calentamientos durante la perforación y terminación del pozo H-33 del CGLH (Arellano et al.,1998). .....	10
Figura 9. Correlación de perfiles de temperatura, pérdida de circulación, unidades litológicas e índices de calor, en los pozos H-17, H-3, H-28 y H-11. Modificado de Aragón et al. (2003). .....	12

Figura 10. Perfiles Magnetelúricos (Corbo-Camargo et al., 2020).....	13
Figura 11. Mapa residual de la anomalía de Bouguer y Mapa de anomalías magnéticas (Arzate et al., 2018).....	13
Figura 12. Mapas de distribución de atenuaciones y de sismos en el Campo Geotérmico Los Humeros ( Lermo, 2015).....	15
Figura 13. Mapas de isoamplitudes de Torres-Cuenca (2017).....	16
Figura 14. Localización de la caldera de Los Humeros dentro del sector oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano (Gómez-Tuena et al., 2005). ....	17
Figura 15. Mapa geológico de la caldera de Los Humeros y campo geotérmico (Carrasco- Núñez et al., 2017b) .....	20
Figura 16. Mapa de la distribución de la Ignimbrita Xáltipan (Cavazos-Álvarez y Carrasco- Núñez, 2019).....	24
Figura 17. Secciones estratigráficas del subsuelo de Los Humeros (Carrasco-Núñez et al., 2017a).....	30
Figura 18. Diagrama de generación de base de datos del presente estudio.....	31
Figura 19. Mapas de producción de vapor. ....	34
Figura 20. Pasos a seguir para la importación del DEM y creación de la topografía del modelo. b) detalles sobre la importación de archivos geológicos al modelo.....	36
Figura 21. Visualización en 3D del modelo digital de elevación de la Caldera de Los Humeros y sus pozos geotérmicos. ....	37
Figura 22. Generación del modelo geológico en el software LeapFrog Geo. ....	37
Figura 23. Etapa de interpolación de estructuras geológicas.....	38
Figura 24. Procesado de datos de isothermas y permeabilidad. ....	39
Figura 25. Configuración geológica de la unidad 9 (basamento sedimentario). ....	40
Figura 26. Configuración geológica de la unidad 8 (andesita de hornblendas). ....	41
Figura 27. Configuración geológica de la unidad 7 (andesita Teziutlán).....	42
Figura 28. Configuración geológica de la unidad 6 (riolitas pre-caldera).....	43
Figura 29. Configuración geológica de la unidad 5 (ignimbrita Xáltipan). ....	43
Figura 30. Configuración geológica de la unidad 4 (toba Faby). ....	44
Figura 31. Configuración geológica de la unidad 3 (ignimbrita Zaragoza). ....	45
Figura 32. Configuración geológica de la unidad 2 (vulcanismo post-calderico).....	46
Figura 33. Modelo estructural de la Caldera de Los Humeros. ....	47
Figura 34. Visualización 3D de mapas geofísicos.....	49
Figura 35. Visualización 3D de perfiles Magnetelúricos realizados en La Caldera de Los Humeros (modificado de Corbo-Camargo et al., 2020).....	50

Figura 36. Visualización 3D de estudios sísmicos realizados en el Campo Geotérmico de Los Humeros. ....	52
Figura 37. Visualización 3D de isotermas del CGLH. ....	53
Figura 38. Visualización en 3D de zonas posibles de permeabilidad. ....	55
Figura 39. Mapas de producción de vapor. ....	55
Figura 40. Correlación de petrografía del pozo H-63 con el registro de temperatura y la pérdida de circulación. ....	59
Figura 41. Correlación de zonas de atenuación con zonas permeables y fallas. ....	60
Figura 42. Correlación de parámetros en el modelo resultante 3D. ....	61
Figura 43. Correlación de isotermas, resistividades y estructuras geológicas en la CLH. ....	64
Figura 44. Representación esquemática del sistema de “plomaría”(plumbing) magmática que alimenta la actividad post-caldérica de Los Humeros Modificada de Lucci et al. (2020). ....	66
Figura 45. Modelo geotérmico 3D de Los Humeros. ....	69
Figura 46. Zonas con potencial geotérmico. ....	71

## Lista de tablas

Tabla 1. Comparación de columnas estratigráficas del subsuelo propuestas para la región de Los Humeros. Modificado de Fernández-Maya (2017). ....	27
Tabla 2. Base de datos para este trabajo. ....	32
Tabla 3. Tipos de datos que pueden ser cargados en LeapFrog Geo, propuesto en Alcazar et al. (2011). ....	35
Tabla 4. Tipos de datos cargados en el modelo resultante. ....	39



# Capítulo 1. Introducción

La geotermia es una fuente renovable de energía que se ha desarrollado como una alternativa al uso tradicional de los combustibles fósiles. De acuerdo con el reporte más actualizado (Huttler, 2020), México ocupa el sexto lugar a nivel mundial de producción de energía geotérmica, con una capacidad instalada de 1.105 MW, lo cual muestra la importancia que tiene en la generación de electricidad. El Campo Geotérmico de los Humeros (CGLH), se encuentra en el sector oriental del Cinturón Volcánico TransMexicano (CVTM) y es uno de los tres campos geotérmicos más importantes de México, produciendo actualmente alrededor de 94 MW de electricidad (Gutiérrez-Negrín, 2019). Este campo geotérmico se asocia con un sistema de calderas formadas desde hace 164 ka (Carrasco-Núñez et al., 2017a).

Estudios de diferentes disciplinas se han desarrollado en el Campo geotérmicos de Los Humeros principalmente enfocados con la evolución de la caldera y el desarrollo del sistema geotérmico (Carrasco-Núñez et al., 2015). La mayoría de estos estudios se realizaron en las décadas de los 80 y 90, en el auge de la prospección geotérmica en México. El modelo conceptual del yacimiento geotérmico está basado principalmente en estos trabajos. Recientemente derivado a las reformas energéticas se han realizado diversos estudios los cuales han sido publicados en artículos e informes, que no suelen ser de acceso abierto y dificulta en parte la actualización del modelo conceptual.

Como parte del esfuerzo por ampliar el conocimiento sobre el funcionamiento del CGLH, se presenta esta investigación cuyo enfoque principal es la visualización y modelado tridimensional de la misma, mediante la integración de toda la información existente, tanto nueva como la de estudios previos, lo cual permitirá generar una visualización en 3D que facilitará el análisis espacial sobre las características geológicas, estructuras y propiedades del sistema geotérmico-magmático que aloja el Complejo Volcánico Los Humeros (CVLH). Este conocimiento puede ser de gran utilidad para orientar la prospección de futuros pozos en el campo geotérmico y la localización de nuevas zonas potenciales explotables.

## 1.1- Ubicación

El Campo Geotérmico de Los Humeros (CGLH) se ubica en el límite oriental del CVTM ([Fig. 1a](#)), entre el límite de los estados de Puebla y Veracruz. Las coordenadas geográficas son: latitud de 19.700 a 19.635° y longitud de -97.475° a -97.440°. Se encuentra dentro de la caldera de Los Humeros ([Fig. 1b](#)), la cual tiene una forma irregular de 15 x 21 km de diámetro, y cuenta con una caldera anidada en su interior de 9 km de diámetro denominada Los Potreros. Dentro de la Caldera de Los Potreros se han perforado más de 60 pozos de los cuales solo un poco más de 20 son productores (Carrasco-Núñez et al., 2017a).

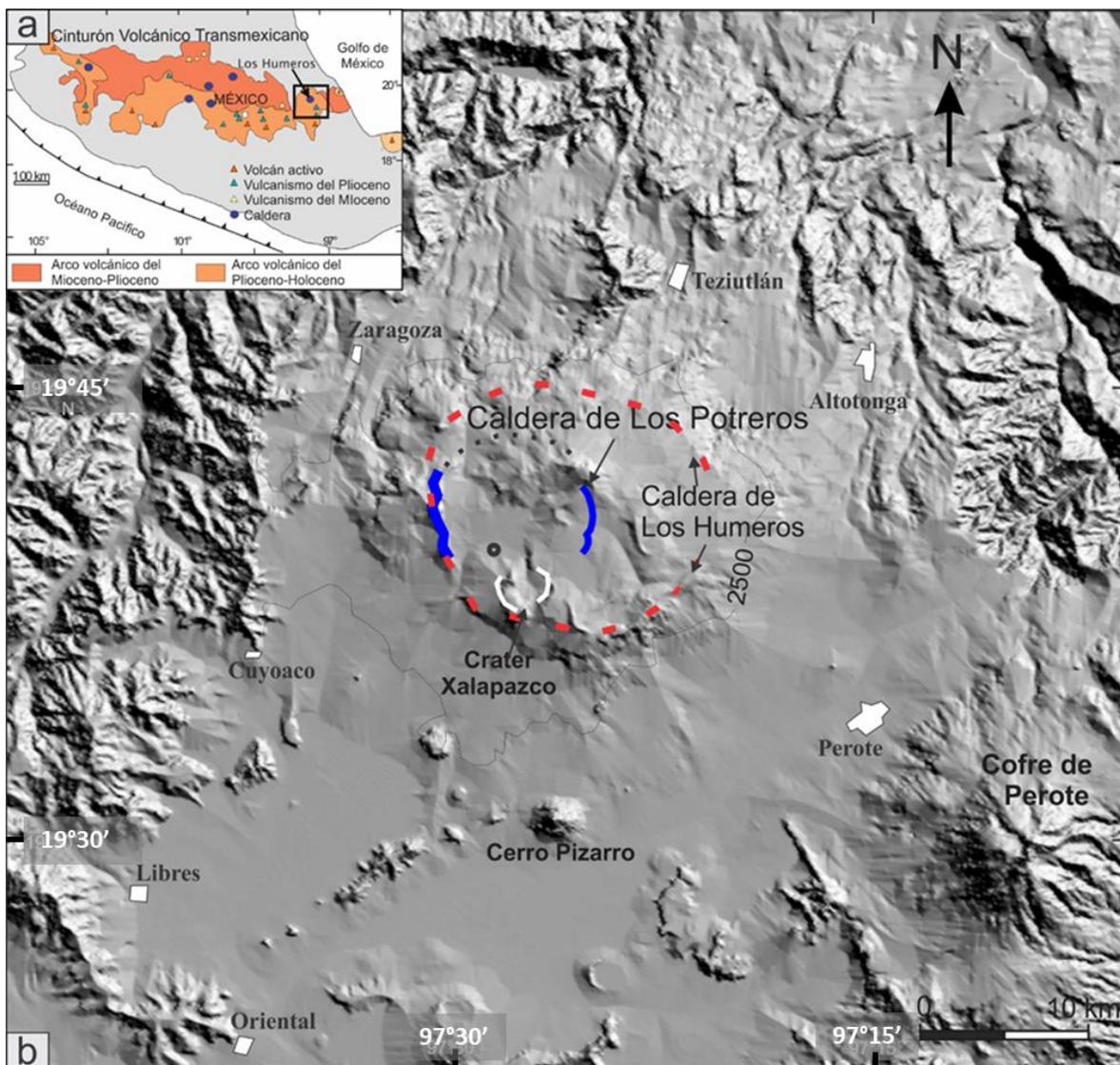


Figura 1. Localización de la Caldera de Los Humeros. A) Ubicación de la Caldera de Los Humeros en el Cinturón Volcánico TransMexicano. B) Modelo de elevación digital (DEM) de las principales estructuras del

Campo Volcánico de Los Humeros (límite de la Caldera de Los Humeros, línea roja punteada; y el límite de la Caldera de Los Potreros, línea azul). Figura modificada de Carrasco-Núñez et al. (2017a).

## **1.2 Planteamiento del problema.**

Uno de los principales retos que enfrenta cualquier campo geotérmico activo, como el caso de Los Humeros, es el contar con un programa de expansión del campo basado en un conocimiento profundo y detallado de las condiciones que favorecen un mayor potencial geotérmico, para lo cual se hace imprescindible la actualización periódica del modelo conceptual del yacimiento geotérmico. El problema que se detecta en la actualidad es la falta de integración de diversos estudios geológicos, geofísicos, geoquímicos y geocronológicos, en un sistema que facilite su análisis y permita su actualización de una manera rápida y efectiva. En este sentido, en este trabajo se propone realizar una integración de la información existente que pueda ser visualizada en un modelo 3D único, lo cual permita realizar una mejor reevaluación del sistema geotérmico-magmático, a fin de poder tener un mejor aprovechamiento del recurso geotérmico como energía sustentable.

## **1.3 Justificación.**

Estudios recientes sobre la edad del Complejo Volcánico de Los Humeros (CLVLH), muestran que la caldera es más joven ( $164 \pm 4.2$  ka; Carrasco-Núñez et al., 2018) de lo que se había reportado con anterioridad ( $460 \pm 40$  ka, Ferriz and Mahood, 1984), lo cual revela una mayor longevidad del sistema magmático, y mayor potencial geotérmico a futuro (Carrasco-Núñez et al., 2018). Ante esa expectativa es importante considerar una actualización del conocimiento que se tiene del modelo geotérmico vigente, pese a la gran cantidad de estudios reportados al momento, siguen siendo aún insuficientes, en virtud de que la evolución vulcano-estructural de la caldera de Los Humeros, que el sustento en que se basa el desarrollo del yacimiento geotérmico asociado es muy complejo y dista mucho por ser conocido en detalle. A pesar de que existen varios modelos geológicos, geofísicos y geoquímicos (Gutiérrez-Negrín e Izquierdo-Montalvo, 2010; Calcagno et al., 2018, 2019; Herrera-Casseres, 2018; Velázquez-Juárez, 2019), sigue haciendo falta la integración toda la información pertinente (geológica, geofísica, geoquímica, etc.) en un solo modelo 3D, que

facilite la comparación de rasgos, estructuras, anomalías, parámetros físicos y datos diversos. Con todos estos datos permita interpretar las condiciones que definan mejor el comportamiento térmico del sistema y los conductos que permitan su ascenso a la superficie. Estos resultados permitirán actualizar el modelo geotérmico conceptual.

#### **1.4 Hipótesis.**

La estrategia de agrupar y visualizar información en espacio y tiempo de las diversas herramientas geológicas, geotérmicas y geofísicas, es esencial para la generación de un modelo conceptual confiable y completo, a través de la implementación de un modelo en 3D. Utilizando esta herramienta se podrán hacer estimaciones de sobre la construcción del complejo volcánico, además de hacer una correlación más directa de los parámetros que intervienen en la configuración del yacimiento geotérmico, y así hacer una mejor evaluación de las condiciones hidrotermales del sistema. Todo ello servirá para identificar rasgos o condiciones con posible potencial geotérmico.

#### **1.5 Objetivos.**

El objetivo principal de esta tesis es la elaboración de un modelo integral de visualización 3D que, mediante la integración de información geológica, geofísica y geoquímica, permita realizar un análisis detallado sobre los parámetros y condiciones que intervienen en la conformación del modelo geotérmico-magmático conceptual de la Caldera de Los Humeros.

Los objetivos específicos del presente estudio son:

- Recopilar e integrar de datos de estudios previos realizados en la Caldera de los Humeros.
- Identificar y correlacionar las unidades estratigráficas presentes en el subsuelo.
- Definir la distribución de las zonas de alteración hidrotermal en el campo geotérmico, así como posibles zonas de fallas y/o fracturas.

- Elaborar un modelo geotérmico tridimensional integrando diferentes estudios mencionados anteriormente.
- Actualizar el modelo geotérmico conceptual.
- Comparar y correlacionar diferentes parámetros geológicos, geofísicos y geotérmicos que permitan visualizar posibles asociaciones de condiciones geotérmicas favorables.

## 1.6 Antecedentes

### Modelos Conceptuales

Diversos autores han desarrollado modelos para el campo geotérmico de Los Humeros. Verma (1985) describe en términos de la evolución petrológica, uno de los primeros modelos conceptuales del sistema geotérmico asociado a la caldera de los Humeros. En dicho modelo se propone la existencia de una cámara magmática somera que es la fuente de calor del sistema geotérmico, la cual se encuentra estratificada a una profundidad de 5 km y se conecta a través de dos conductos al sistema geotérmico (Fig. 2).

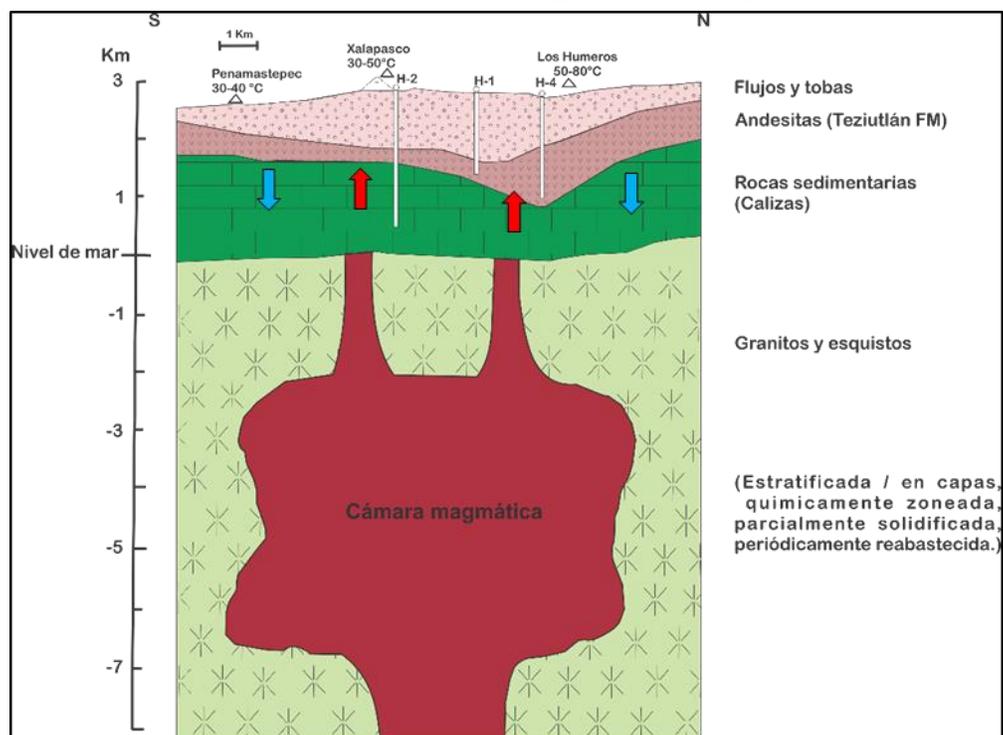


Figura 2. Modelo conceptual de la cámara magmática que subyace al campo geotérmico de Los Humeros. Modificado de Verma (1985).

Posteriormente, Viggiano y Robles (1988) presentan un modelo conceptual del CGLH a partir de trabajos de mineralogía hidrotermal, química de fluidos geotérmicos y temperatura de pozos; en este modelo muestran que el yacimiento geotérmico se encuentra alojado en la parte inferior de las Andesitas Teziutlán, con un espesor de 1000 m (Fig. 3). En el mismo año, Pról.-Ledesma (1998), con base en datos isotópicos de carbón y azufre propone un segundo reservorio más profundo, que se encuentra alojado en las andesitas Teziutlán, ya que en sus resultados se tenía registro que a esa profundidad los fluidos interactúan fuertemente con las rocas sedimentarias del basamento. Adicionalmente, Arellano et al. (1999; 2000; 2003) propone otro modelo conceptual para el CGLH, el cual están basado en datos de distribución de presión y temperatura de 42 pozos del yacimiento en su estado inicial.

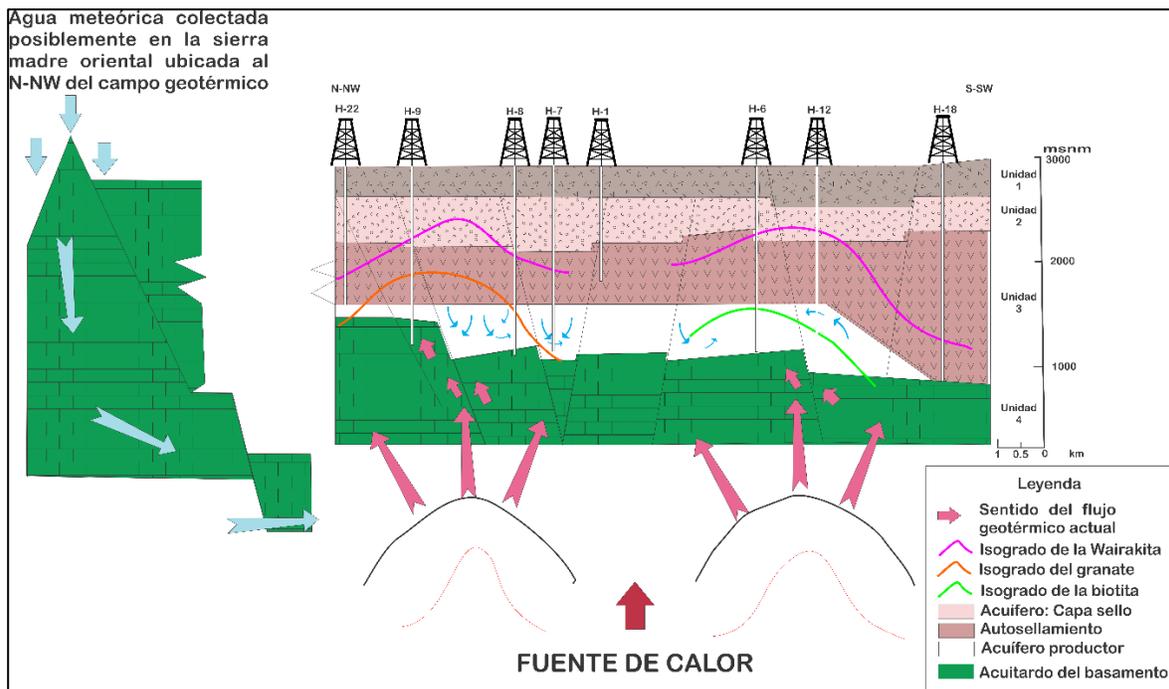


Figura 3. Modelo conceptual del campo geotérmico de Los Humeros Puebla propuesto por Viggiano y Robles (1988).

Este último modelo (Arrellano, 2003) plantea la existencia de al menos dos yacimientos, el primer yacimiento, alojado en las andesitas Teziutlán, localizado entre 1600 y 1025 m s. n. m., es un yacimiento de líquido dominante con temperatura de 300 y 330°C. El segundo yacimiento, alojado en andesitas de hornblenda, basaltos y parte de los mármoles, se localiza por debajo de los 850 m.s.n.m. y se extiende hasta los 100 m s. n. m., se considera

un yacimiento de baja saturación de líquido con temperaturas estimadas de 300 y 400°C. El modelo propuesto por Arellano et al. (1999) considera la existencia de una capa que separa a los dos yacimientos, denominada Toba Humeros (Cedillo, 2000), la que se caracteriza por tener baja permeabilidad. Además, proponen un ciclo del fluido hidrotermal en algunas zonas del yacimiento profundo, en el cual el vapor asciende, y a cierta profundidad se condensa (Fig. 4).

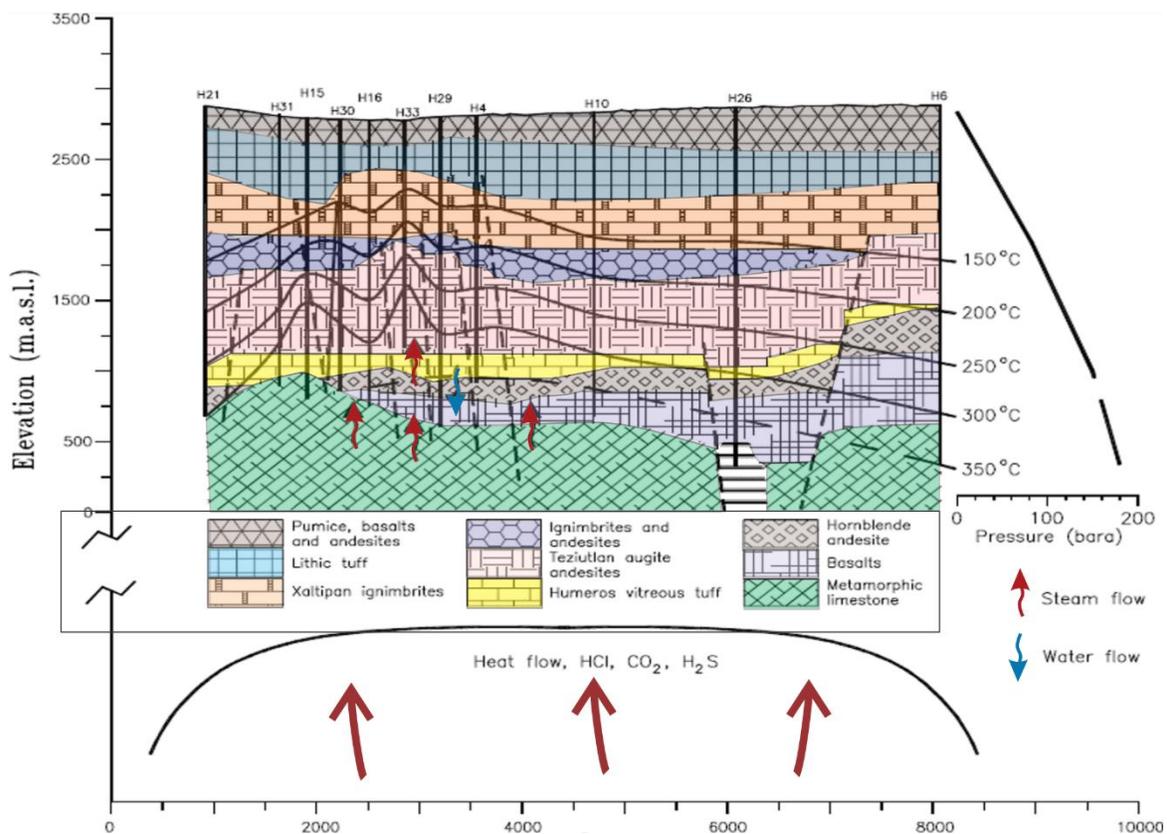


Figura 4. Modelo conceptual del campo geotérmico de Los Humeros Puebla. Toba Humeros (litología color amarillo). Tomado y modificado de Arellano et al. (1999).

Cedillo (2000) coincide con Arellano et al. (1999) en la propuesta de los dos yacimientos separados por la denominada toba Humeros (Fig. 5), cuya interpretación está basada en análisis petrográficos, datos de presión-temperatura y geoquímica de fluidos de pozos perforados dentro del yacimiento, así como datos de pozos y norias de los alrededores. Sin embargo, Cedillo (2000) propone temperaturas estimadas para el yacimiento superior de 282°C con un pH neutro y la temperatura del yacimiento inferior de 330°C con un pH ácido.

Además, sugiere la existencia de dos acuíferos dentro de la CLH, uno frío y otro caliente, cuya recarga ocurre dentro de la cuenca cerrada de la CLH, y recargan a los yacimientos geotérmicos a través de fallas y fracturas, dentro del límite del colapso de Los Humeros (Fig. 6)

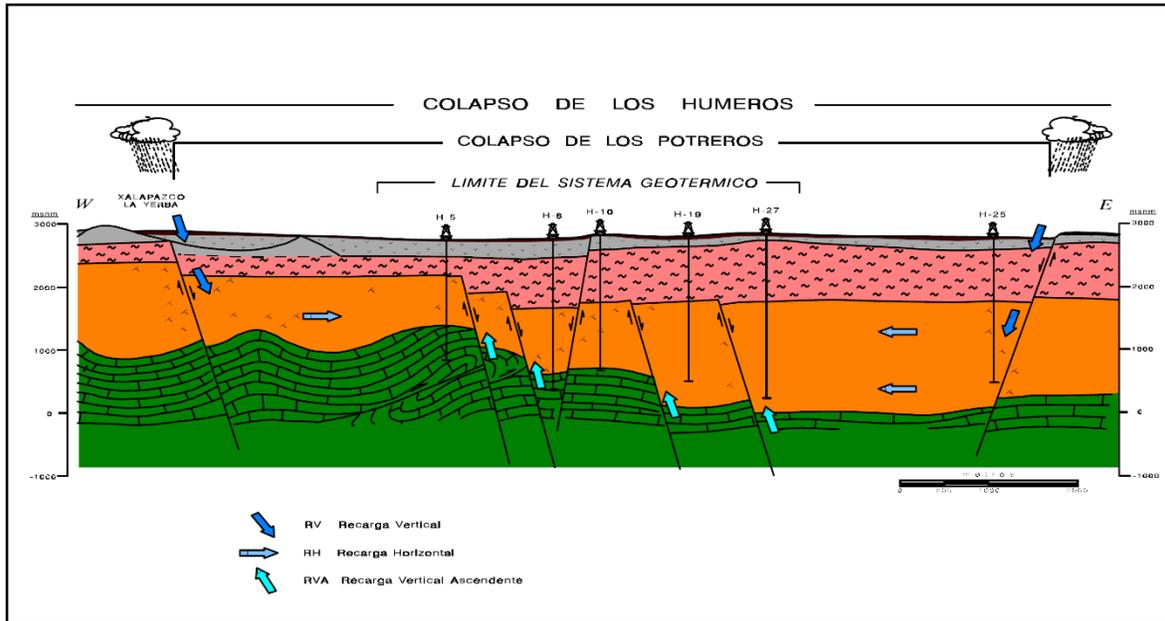


Figura 5. Modelo hidrogeológico del campo geotérmico de Los humeros propuesto por Cedillo (2000).

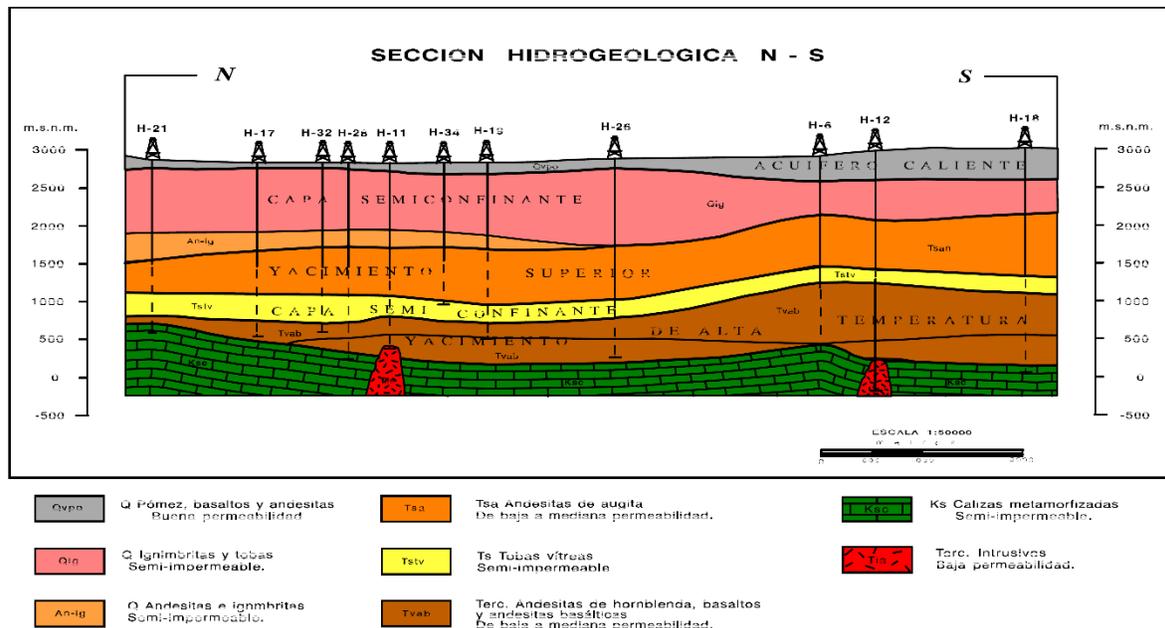


Figura 6. Sección geológica propuesta por Cedillo (2000) en donde se pueden apreciar los dos yacimientos geotérmicos (superior e inferior) separados por una capa semi-confinante denominada Toba Humeros (color amarillo).

García-Gutiérrez (2009) propone también la existencia de dos reservorios a profundidad, con base en el cálculo de las temperaturas estabilizadas por el método de la esfera ajustado por el método PPEP (perfil de presión vs profundidad), el cual asume las temperaturas iniciales factibles del reservorio. El autor plantea que el reservorio superior se encuentra entre 1650 y 100 m s. n. m., con temperaturas de 290-330°C, y que el reservorio inferior se localiza entre 900 y 0 m s. n. m., con temperaturas de 300-400°C. Dicha información se obtuvo a partir de reportes de temperaturas de pozos, en los cuales se definen dos grupos de pozos con temperaturas y profundidades diferentes.

En contraste, Gutiérrez-Negrín e Izquierdo-Montalvo (2010) plantean que el sistema geotérmico podría ser caracterizado como un solo reservorio con varias zonas de alimentación, las cuales estarían sujetas a una serie de procesos recurrentes de autosellamiento e hidrofracturamiento provocado por el movimiento de fluidos. Esto con base en una revisión de las características geológicas, geoquímicas y de producción del campo geotérmico, con datos actualizados de los pozos productores. Además, descartan la separación física de los dos reservorios previamente reportados, ya que la Toba Humeros no fue cortada por la mayoría de los pozos, por lo que no puede ser considerada como una capa continua que delimite a dos reservorios.

### **Registros geofísicos de pozos geotérmicos**

Los métodos geofísicos son usados como una técnica de prospección amplia en la exploración de recursos naturales en donde se requiere conocer las características más importantes del subsuelo. En los mismos pozos se puede monitorear las propiedades físicas por medio de dispositivos de medición llamadas sondas (Bjorlykke, 2010). Las sondas consisten en uno o más sensores que dependiendo del tipo de sensor miden su respuesta física de las rocas que se localizan en las paredes del pozo ([Fig. 7](#)). Durante la etapa de perforación y calentamiento se realizan una serie de mediciones para conocer los intervalos permeables, la temperatura y presión que ayudan a identificar la zona productora del yacimiento. Para conocer la permeabilidad en el pozo se utiliza la pérdida de circulación que consiste en tener registro de la cantidad fluido de perforación se pierde hacia la formación a través de porosidad o fracturas, un aumento en la pérdida de circulación puede indicar que la perforación se está acercando al yacimiento, una vez detectados los intervalos de pérdida de

circulación se realizan mediciones de presión y temperatura para detallar la zona del yacimiento.



Figura 7. Sonda de registro de presión. Se puede observar los componentes de la sonda los cuales son: la batería, la parte electrónica y el sensor. (Signature Quartz Gauges: Schlumberger, 2016).

En el Campo Geotérmico de Los Humeros se tiene registro de presión, temperatura y pérdida de circulación de 52 pozos geotérmicos, estos datos han sido utilizados en diversos estudios (Castillo-Roman et al., 1991; Aragón et al., 2000, 2003; Arrellano, 1999; Arrellano-Gómez, 2008; García-Gutiérrez, 2009) para caracterizar el sistema geotérmico. Uno de los primeros en utilizar estos datos fue Aragón et al. (2000) el cual analiza el comportamiento de la presión a través de estímulos suministrados al yacimiento y consistía en calcular el índice de calentamiento por medio del registro de temperatura versus tiempo y correlacionar con los demás parámetros disponibles (litología, pérdida de circulación, velocidades de penetración). Como una calibración previa Aragón et al. (2000) utilizó los datos del pozo Br-2 del campo geotérmico de Broadlands de Nueva Zelanda. Este método se aplicó a los pozos H-11, H-31 y H-33 (Fig. 8). Con esta metodología se identificó los intervalos de interés de cada pozo, principalmente la zona permeable con alimentación de calor.

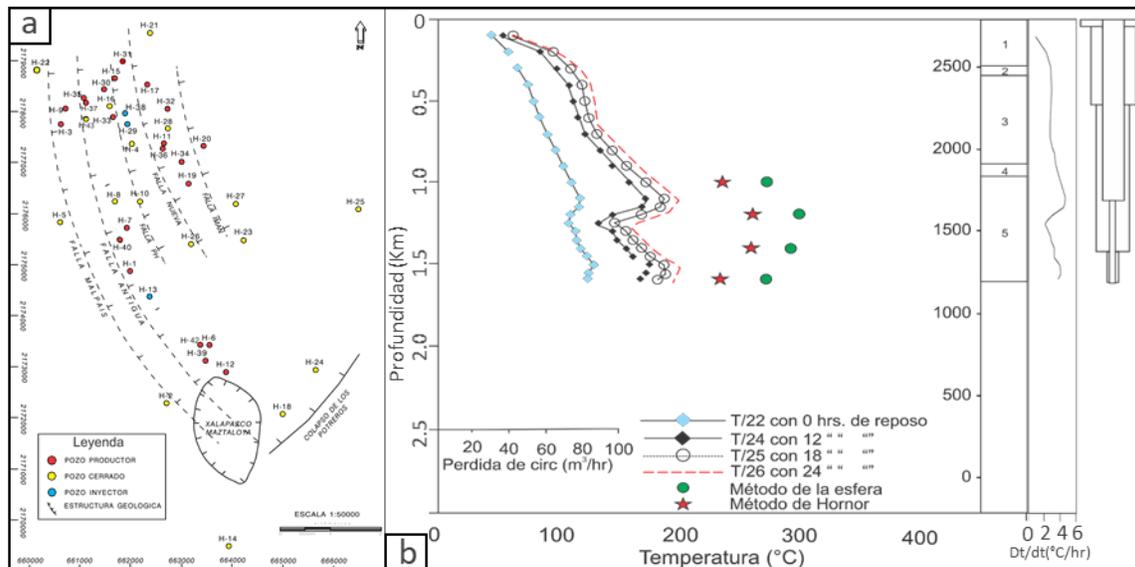


Figura 8. Mapa de distribución de pozos y registro geofísico del pozo H-33. a) Mapa de distribución de los pozos en el CGLH, se puede observar también las principales estructuras geológicas. b) Perfiles de temperatura

medida y estabilizada, pérdida de circulación, litología, arreglo de tuberías e índices de calentamientos durante la perforación y terminación del pozo H-33 del CGLH. Modificado de Arrellano et al. (1998).

Aragón et al. (2003) empleó un método de análisis que utiliza los registros de pozos, este método consiste en analizar el enfriamiento (disminución de temperatura en el registro) causado por la circulación de fluido durante la perforación para determinar los índices de calor (Fig. 9), además, permite identificar los estratos litológicos con o sin permeabilidad. Los índices de calentamientos se obtuvieron a partir de un par de registros de temperatura tomados en diferentes momentos de cierre, su aplicación sirve para determinar el gradiente térmico en función del tiempo. Este método se aplicó a casos prácticos de un reservorio donde la zona productora está controlada principalmente por fracturamiento. A partir de la aplicación de este método se pudo correlacionar los índices de calor con la litología, zonas de pérdidas de circulación de fluidos y perfiles de temperaturas, además de poder determinar el espesor productivos del yacimiento (h). La metodología empleada permite determinar el espesor de la zona permeable, sin embargo, solo puede identificar de manera cualitativa zonas con permeabilidad, para la cuantificación de la permeabilidad en las formaciones es necesario aplicar otros métodos de análisis.

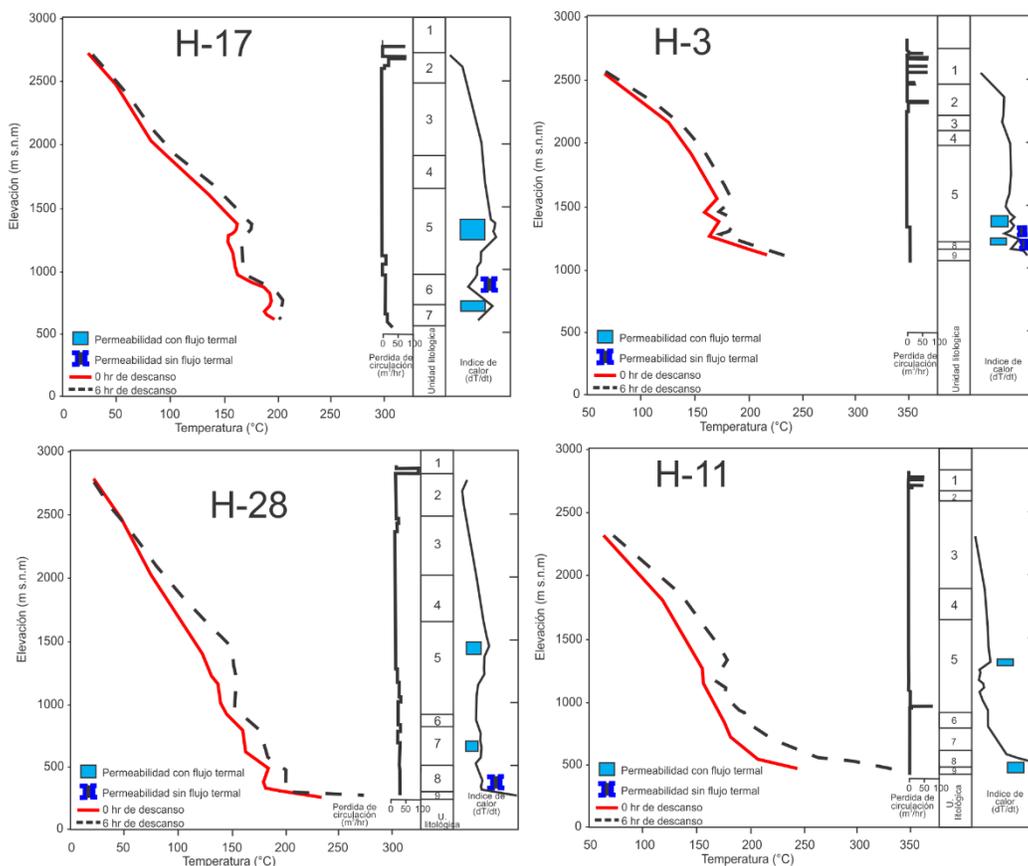


Figura 9. Correlación de perfiles de temperatura, pérdida de circulación, unidades litológicas e índices de calor, en los pozos H-17, H-3, H-28 y H-11. Modificado de Aragón et al. (2003).

### **Antecedentes de estudios geofísicos**

En este apartado se mencionan algunos de los principales estudios geofísicos realizados en el Campo Geotérmico de Los Humeros. Estos trabajos han aplicado diferentes métodos geofísicos (gravimétricos, magnéticos, electromagnéticos, sísmicos, entre otros) con el fin de buscar estructuras y caracterizar el yacimiento geotérmico. Por ejemplo, los estudios magnetotelúricos han demostrado ser una de las técnicas más exitosas para la modelación de sistemas geotérmicos, especialmente para delimitar estructuras geológicas, además de definir la capa sello que lo conforman arcillas de baja resistividad y poca permeabilidad (Ussher et al., 2000). Unos de los principales estudios geofísicos realizados recientemente en la CLH son los de Arzate et al. (2018) y Corbo-Camargo et al. (2020), en el primero de ellos se realizaron 70 sondeos magnetotelúricos de banda ancha (MT), representados en 3 perfiles y en el segundo se realizó una inversión 3D de los 87 sondeos Mt realizados en el campo geotérmicos (Fig. 10). También se realizó un mallado de 718 estaciones de gravedad niveladas con precisión. Estos conjuntos lo complementaron 13 sondeos TDEM para resolver el corrimiento estático de los sondeos MT, así como la carta digital aeromagnética del área (#E14-3, SGM, 2004). En el análisis de los sondeos MT; el perfil 1 (P1) consiste en 15 sondeos MT orientado E-O (Fig. 10a) y cruza la zona de producción principal del CGLH, muestra un cuerpo resistivo a los 2000 metros de profundidad, que lo cortan los pozos H-5, H-8 y H-10, y que sigue la isoterma de 250°C. Además, que se puede observar un cuerpo de baja resistividad que se puede asociar a minerales arcillosos, de acuerdo con la interpretación y correlación con el mapa geológico de los Humeros (Carrasco-Núñez et al., 2017a), se pudieron identificar y delimitar algunas de las principales fallas. En el perfil 2 (Fig. 10a), con una orientación N-S, pasa a un lado del cráter Xalapazco, y por los pozos H-20, H-23 y H-27. Muestra que el cuerpo de alta resistividad presenta una interrupción al norte de la caldera, de igual manera el cuerpo de baja resistividad muestra un desfase en esa zona que se correlaciona con las principales estructuras de las CLH. En el mapa residual de la anomalía de Bouguer (-18 a +9 mGal) y de la anomalía magnética (-280 a 43 nT) (Fig. 11) se observan en la parte central-norte de la caldera anomalías de baja densidad (color azul) y alta

susceptibilidad magnética, además se pudieron delimitar los bordes de las calderas de Los Humeros y Los Potreros (Carrasco-Núñez et al., 2017b).

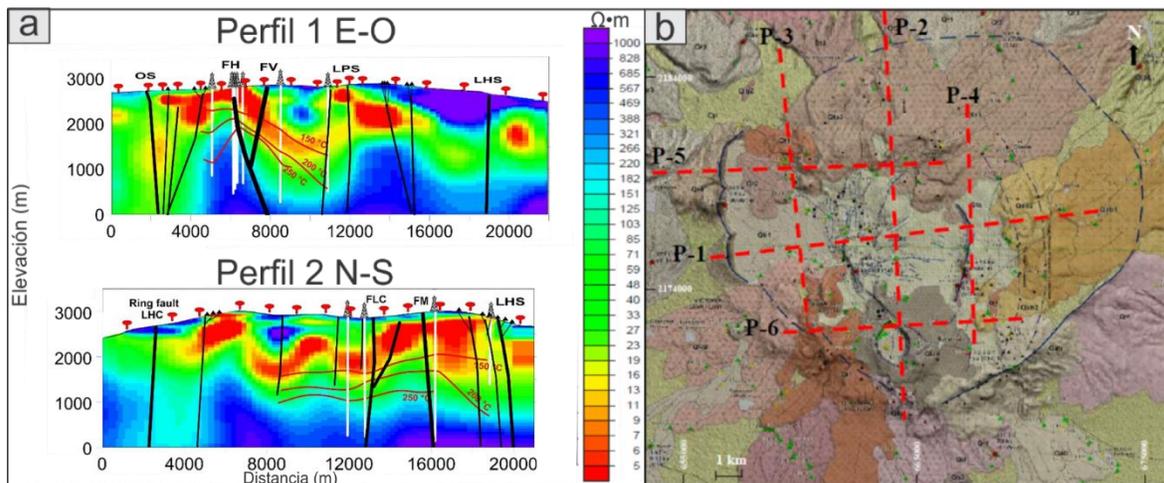


Figura 10. Perfiles Magnetotéluricos. A) Perfiles Magnetotéluricos 1 y 2 de Corbo-Camargo et al. (2020), donde se presentan los sondeos MT hechos en el CGLH. B) Mapa geológico con la distribución de los perfiles realizados. Modificado de Carrasco et al. (2017b).

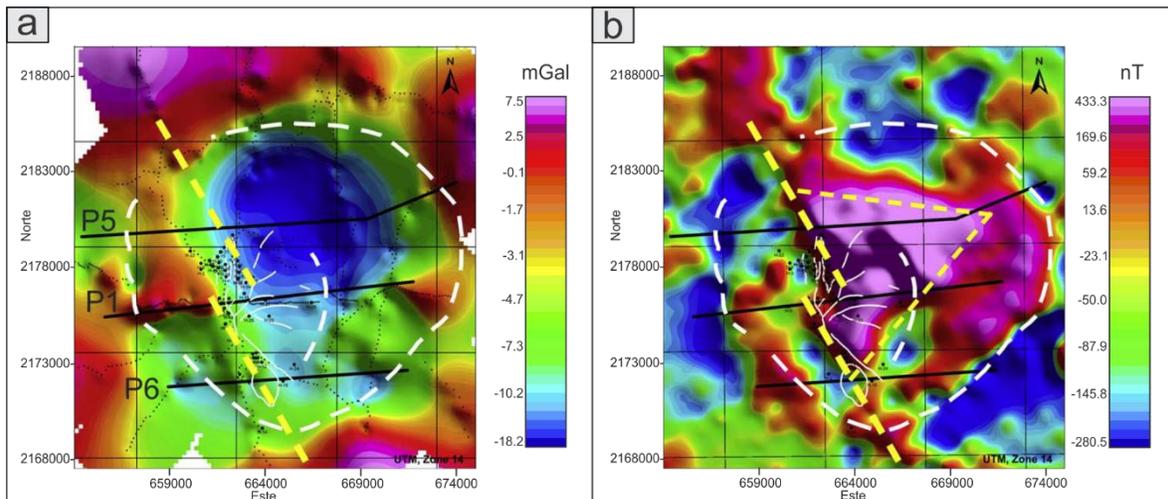


Figura 11. A) Mapa residual de la anomalía de Bouguer. B) Mapa de anomalías magnéticas. Modificado de Arzate et al. (2018).

### Estudios sismológicos previos

Ponce y Rodríguez fueron los pioneros en realizar monitoreo sísmico en el CGLH a finales de la década de los 70's. Su trabajo consistió en monitorear el mes de enero de 1977 con 3 estaciones sísmicas. Durante ese periodo de tiempo se registraron 7 sismos locales, que

fueron localizados en la periferia del campo geotérmico, los cuales los relacionaron con fallas tectónicas.

La instalación de estaciones para el monitoreo sísmico comenzó a partir de 1997, debido a un sismo superficial (2000 m) reportado el 25 de noviembre de 1994, que fue sentido en las ciudades de Teziutlán y Puebla con una intensidad de III en la escala de Mercalli modificada (Fernández et al., 1996; reporte sísmico preliminar-SSN). La red está integrada por 6 estaciones distribuidas alrededor del CGLH. Desde entonces se ha ido estudiando el comportamiento sísmico por Lermo et al. (1999a, 1999b, 2000, 2002, 2005), Lermo y Lorenzo (2003) y Lorenzo (2002, 2004).

Lermo (2015), seleccionó 250 sismos del periodo 1997-2016, el criterio de selección fue en tenerlos registrados en más de 5 estaciones y que los arribos de las ondas P y S fueran claros. Además, propone 4 zonas de atenuación, a partir de un análisis de 90 sismos y sus trayectorias de viaje para obtener las áreas donde la señal sufre alteración ([Fig. 12](#)). Torres Cuenca (2017) analizó las amplitudes reales de los 29 puntos medidos en distintos intervalos de frecuencias, utilizó todas las señales que presentan una variación en su amplitud, y se realizó 3 mapas, usando como referencia las frecuencias de 0.35 Hz, 0.65Hz y 1.1 Hz ([Fig. 13](#)). El color azul está asociado a la zona de amplitud total, el color verde se asocia a la amplitud somera, el color amarillo se asocia a la zona de no amplitud y, por último, la zona de color rojo se asocia a la zona de ruptura.

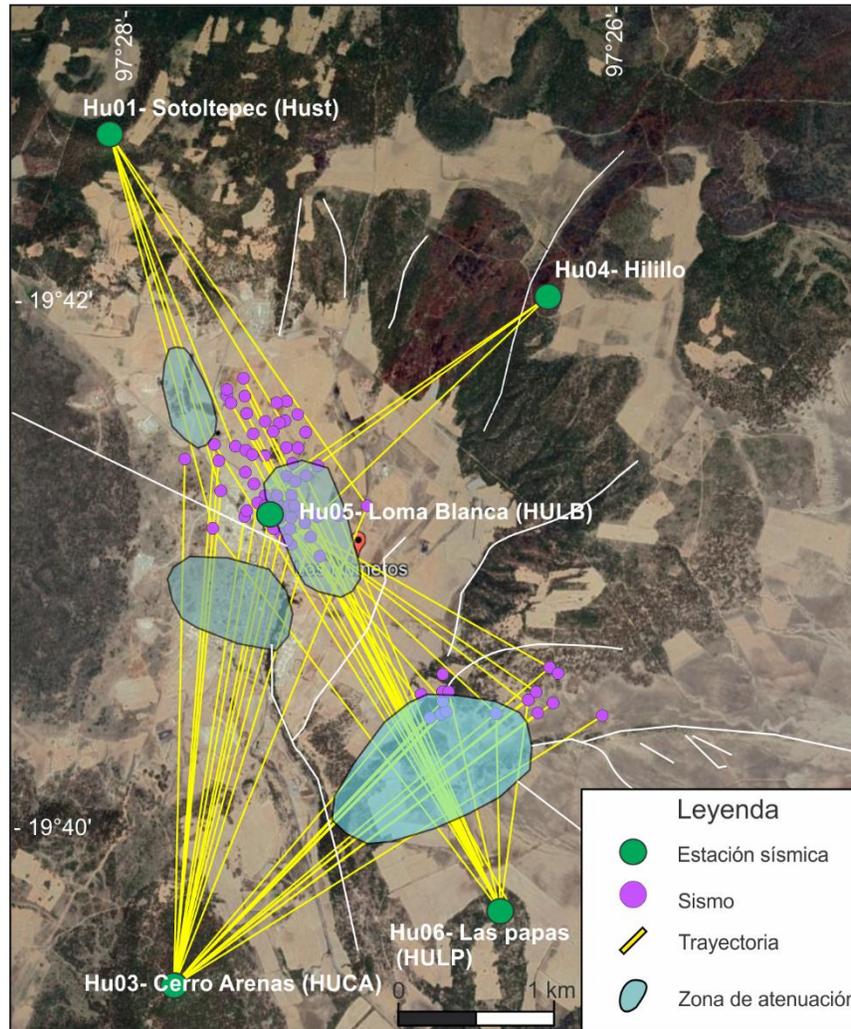


Figura 12. Mapas de distribución de atenuaciones y de sismos en el Campo Geotérmico Los Hornos. Modificado de Lermo (2015).

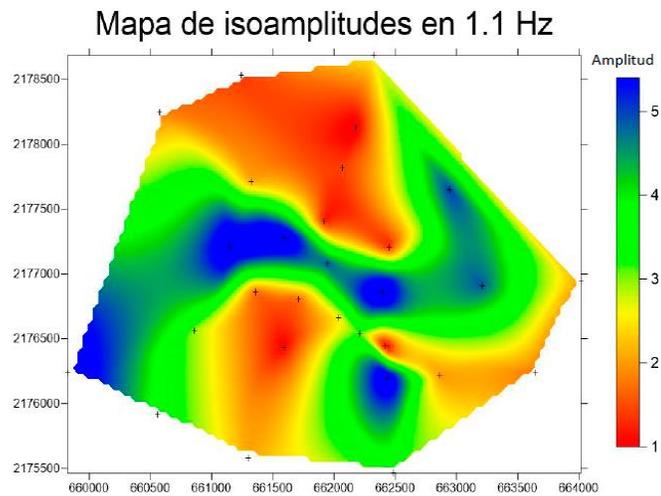
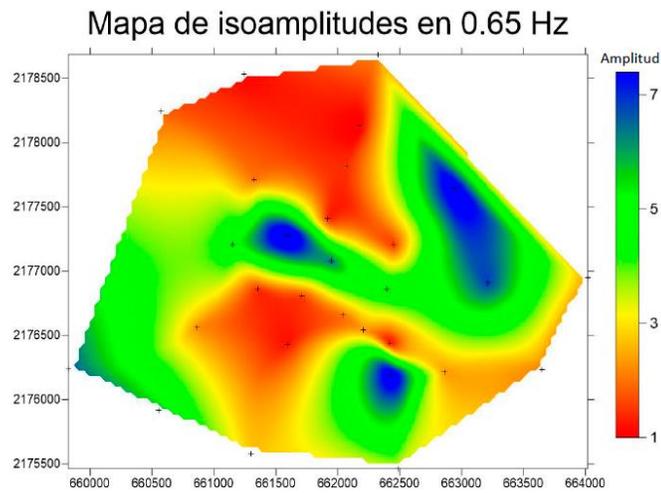
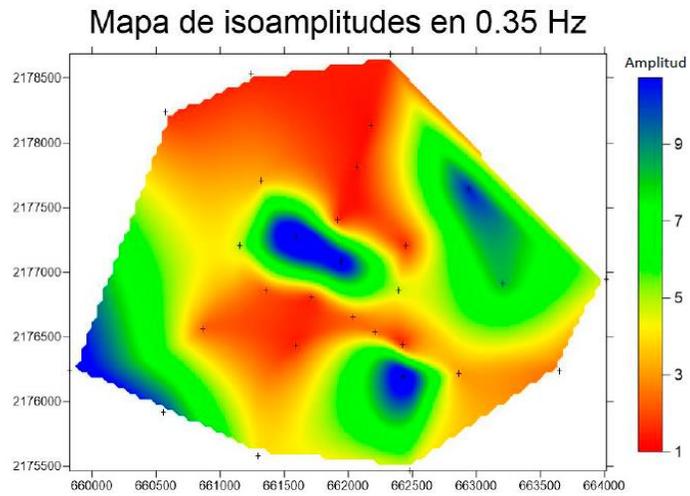


Figura 13. Mapas de isoamplitudes. A) Isoamplitudes de 0.35 Hz. B) Mapa de isoamplitudes de 0.65 Hz. C) Mapa de isoamplitudes en 1.1 Hz. Modificado de Torres-Cuenca (2017).

## Capítulo 2. Marco geológico

### 2.1 Generalidades del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM)

El Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) es un arco continental del Neógeno (Mioceno medio y tardío), con una longitud de 1,000 km que atraviesa el centro de México desde el Golfo de California hasta el Golfo de México (Ferrari et al., 1999; 2012). Este arco se atribuye a la subducción de la placa de Cocos y Rivera por debajo de la placa norteamericana (Demant, 1978; 1982), contiene una gran variedad en composición y estilos volcánicos, constituidos principalmente por grandes estratovolcanes andesíticos, calderas silíceas, domos y campos volcánicos monogenéticos, que se extiende en una dirección este-oeste, desde Jalisco hasta Veracruz (Mooser, 1972; Demant, 1978; Verma, 1987). El CVTM está dividido en tres grandes sectores (Ferrari et al., 1999), de acuerdo a su tipo de vulcanismo y composición: occidental, oriental y central (Fig. 14). El sector occidental está limitado al este por el rift de Colima, se sobrepone a la parte norte del bloque Jalisco (BJ) y al límite meridional de la Sierra Madre Occidental (SMO).

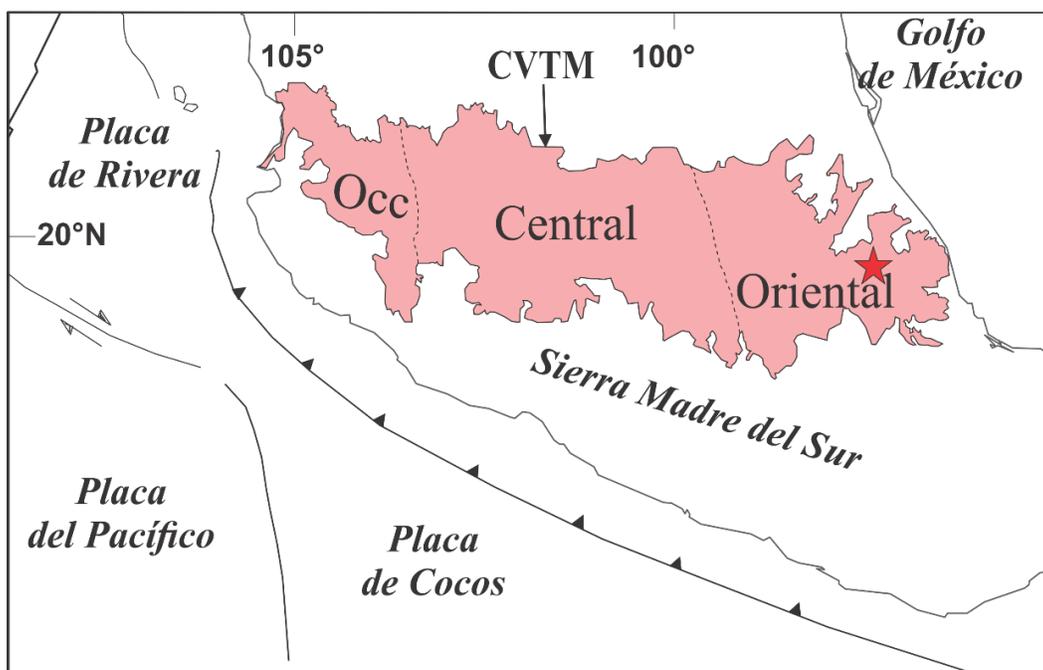


Figura 14. Localización de la caldera de Los Humeros (estrella roja) dentro del sector oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM). Además, se muestra la distribución de las placas tectónicas actuales. Modificado de Gómez-Tuena et al. (2005).

El vulcanismo emplazado en el límite sur de la SMO es claramente bimodal, formado tanto por estratovolcanes y complejos de domos dacítico-riolíticos, así como por los centros monogenéticos basálticos. En cambio, el vulcanismo emplazado dentro del Bloque Jalisco es

casi exclusivamente monogenético y de composición basáltico-andesítico. El sector central, entre el rift de Colima y el sistema de fallas Taxco-Querétaro, se desarrolla en el campo volcánico Michoacán-Guanajuato, formado por numerosos centros monogenéticos y pequeños volcanes escudo de composición basáltica o andesítico basáltica. En el sector oriental, al oriente del sistema Taxco-Querétaro, la mayor parte del vulcanismo está emplazado en grandes estratovolcanes, calderas y complejos de domos de composición andesítica a riolítica alineados a lo largo de las estructuras corticales. Los productos más evolucionados de esta porción oriental están representados por las calderas de Acoculco y Los Humeros, que es el principal interés de este trabajo, el centro silíceo de Las Cumbres (Rodríguez-Elizarrarás, 2005), y los domos de Las Derrumbadas (Yáñez y Casique, 1980; Yáñez y García, 1982; Siebe y Verma, 1988; Muñoz-Jáuregui et al., 2019; Chédeville et al., 2019) y Cerro Pizarro (Riggs y Carrasco-Núñez, 2004), además de pequeños anillos de tobas como Tepexitl (Austin-Eriksson et al., 2011; Ross et al., 2017) y el complejo Cerro Pinto (Zimmer et al., 2010) todos ubicados en el estado de Puebla.

## **2.2 Geología de La Caldera de Los Humeros**

La Caldera de Los Humeros tiene una geología muy compleja, la cual ha sido estudiado desde finales de la década de los 70's hasta la actualidad, estos estudios han sido publicados en diferentes artículos, mapas, o reportes técnicos. Diversos trabajos (Cedillo, 2000; Carrasco-Núñez et al., 2017, 2018) han permitido definir cuatro grandes grupos estratigráficos que representan la evolución geológica de la caldera, esto son: el Grupo IV constituido por el Basamento Pre-volcánico, Grupo III o Grupo Pre-Caldérico, Grupo II o el Grupo Caldérico y el Grupo I o el Grupo Post-Caldérico. En la década de los 80' comenzó la perforación de pozos de exploración, obteniendo información que ha permitido definir la geología del subsuelo. La primera base de datos geocronológicos del área que establecía la temporalidad de los eventos eruptivos y explosivos de este campo volcánico fue proporcionada por Ferriz y Mahood (1984).

Los primeros estudios geoquímicos e isotópicos del área fueron elaborados por Verma y López (1982), Verma (1983, 1984, 1985a, 1987), Negendank et al. (1985), entre otros trabajos que incluyeron datos geoquímicos acerca de la geología y estratigrafía

superficial. Entre los trabajos de la geología superficial se encuentran: Yáñez y García, 1982; Ferriz y Mahood, 1984; Ferriz, 1985; Ferriz y Mahood, 1986; López-Hernández, 1995; Carrasco-Núñez y Branney, 2005; Willcox, 2011; Carrasco-Núñez et al., 2012; Dávila y Carrasco-Núñez, 2014; Norini et al., 2015; Carrasco-Núñez et al., 2015. Estudios más recientes de caracterización de pozos (Carrasco-Núñez, 2008; Del Pilar-Martínez, 2015; Acosta-Azua, 2016; Gómez-Castellanos, 2016; Fernández-Maya, 2017; Huerta-Luna, 2018; Jáquez-Domínguez, 2018; Peña-Rodríguez, 2018; Machorro-Breton, 2018) se han enfocado en análisis geoquímicos y petrográficos para correlacionar la estratigrafía del subsuelo con la geología superficial.

Recientes investigaciones muestran la complejidad estratigráfica del subsuelo mediante correlaciones litológicas de algunos pozos seleccionados del CGLH (Carrasco-Núñez et al., 2017a), además trabajos de cartografía a detalle como el de Carrasco-Núñez et al. (2017b) ([Fig. 15](#)). En esta sección se describe en detalle cada uno de los grupos que conforman la evolución geológica de la caldera.

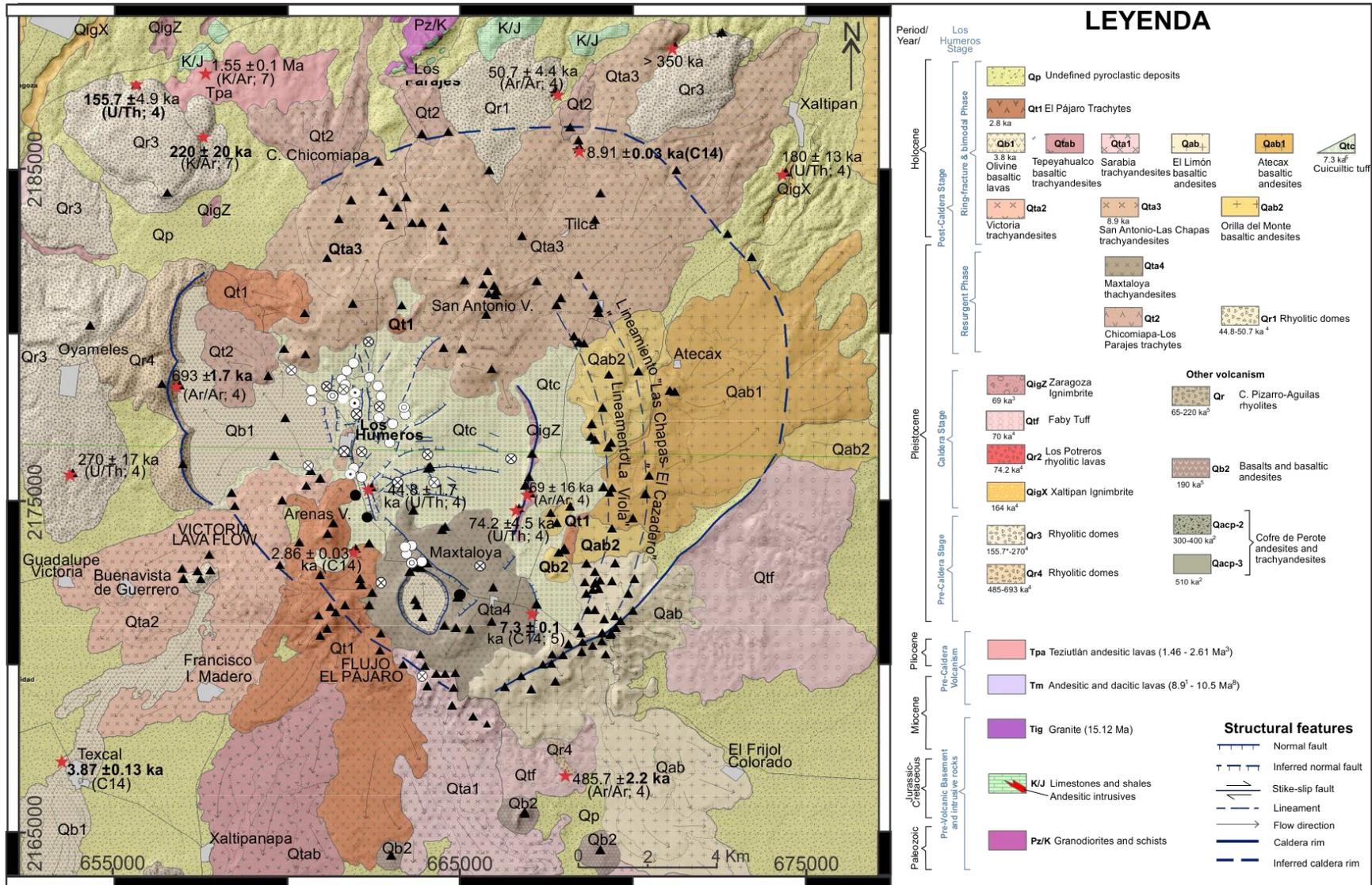


Figura 15. Mapa geológico de la caldera de Los Humeros y campo geotérmico. Modificado de Carrasco-Núñez et al. (2017b).

## 2.3 Basamento regional pre-volcánico

El basamento regional está formado por el Macizo de Teziutlán, un complejo cristalino del Paleozoico-Cretácico, el cual incluye rocas metamórficas e intrusivas principalmente granodioritas, granitos y esquistos en facies de esquistos verdes (Quezadas-Flores, 1961). Se registran afloramientos del Macizo de Teziutlán en las sierras de Chignautla y Tezompan al norte de la Caldera de Los Humeros. Las rocas metamórficas fueron datadas en  $207 \pm 7$  Ma (Pérmico tardío) por el método K/Ar, y las rocas intrusivas entre  $181 \pm 5$  Ma y  $131 \pm 5$  Ma (Triásico tardío- Jurásico Temprano; Yáñez y García, 1982).

El basamento metamórfico e intrusivo está sepultado por una secuencia sedimentaria del Jurásico al Cretácico, que corresponde principalmente a calizas y lutitas fuertemente plegadas pertenecientes a la provincia de la Sierra Madre Oriental (Viniestra-Osorio, 1965). El Jurásico está representado por la formación Cahuizas, compuesta por potentes estratos de areniscas con lentes de lutitas rojas (Carrillo-Bravo, 1961); la formación Tamán, compuesta por dos fases una calcárea y otra arcillosa, y limonitas y dolomitas de la formación Pimienta (López-Ramos, 1979). El Cretácico está conformado por series calcáreas y terrígenas; compuesto por las siguientes formaciones: Tamaulipas inferior y superior, representadas por calizas arcillosas y cristalinas con intercalaciones de pedernal (López-Ramos, 1979). Cambios laterales en las condiciones de depósito originaron la formación de facies arrénciales con fósiles, como la formación Orizaba (Viniestra-Osorio, 1965), mientras que el aporte posterior de sedimentos terrígenos originó variaciones con intercalaciones variadas que dieron lugar a las formaciones Agua Nueva, San Felipe, y Méndez, (Viniestra-Osorio, 1965).

### Intrusivos terciarios

Las rocas sedimentarias del Mesozoico se encuentran intrusionadas por diques de granito y granodioritas fechadas con K/Ar en 14.5 a 31 Ma (Yáñez y García, 1982) y con U/Pb en  $15.12 \pm 0.64$  Ma (Carrasco-Núñez et al., 2017b).

## 2.4 Vulcanismo de Los Humeros

Las etapas volcánicas que forman la estratigrafía del subsuelo de Los Humeros comprenden un total de 7 unidades litoestratigráficas que pueden ser agrupadas en 3 principales grupos: Grupo Pre-caldera, Grupo Caldérico, Grupo Post-caldera (Carrasco-Núñez et al., 2017a).

### Grupo pre-caldérico

Este grupo lo conforma un potente paquete de lavas formado en su mayoría por rocas intermedias en la base, y por vulcanismo silíceo en la cima. En virtud de sus diferentes características y edades, este grupo se dividió en 3 unidades:

#### Unidad 8 – Vulcanismo del Basamento del grupo pre-caldérico

Esta unidad está conformada principalmente andesitas de hornblenda y basaltos, su distribución está limitada, y se ha registrado en muy pocos pozos geotérmicos, en su mayoría en la parte central de la Caldera de los Humeros. Esta unidad representa un vulcanismo totalmente diferente al resto del vulcanismo del grupo pre-caldérico, se correlaciona geoquímicamente con el vulcanismo de Cerro Grande (Gómez-Tuena y Carrasco-Núñez, 2000) fechado entre 8.5 a 11 Ma (Carrasco-Núñez et al., 1997) que también contiene hornblenda, y se ubica al occidente de la caldera

#### Unidad 7- Vulcanismo intermedio del grupo pre-caldérico

Esta unidad se registra en los pozos geotérmicos como un potente paquete de lavas de composición intermedia, dominado por andesitas porfíricas de piroxenos, con escasas andesitas basálticas en la parte basal (Carrasco-Núñez et al., 2017a). Se correlaciona con la formación Teziutlán, que aflora en la cercanía de la ciudad Teziutlán al norte de la CLH. La edad de este vulcanismo por el método de K/Ar es de  $5 \pm 0.7$  y  $3.5 \pm 0.3$  Ma (Yáñez y García, 1980), correspondientes al Plioceno. Sin embargo, posteriormente Ferriz y Mahood (1984) reportaron una edad más joven de  $1.55 \pm 0.1$  Ma, ubicándose en el Pleistoceno.

#### Unidad 6- Vulcanismo de la cima del grupo caldérico.

La distribución de esta unidad está restringida a pocos pozos, lo conforman lavas silíceas, principalmente horizontes de riolitas bandeadas y dacitas que representan eventos efusivos importantes asociados a domos riolíticos aislados, fechados por Ferriz y Mahood (1984) con el método K/Ar en  $0.47 \pm 0.04$  Ma, sin embargo estudios recientes reportados en Carrasco-Núñez et al. (2018) reportan una edad más joven en  $0.693 \pm 0.0019$  Ma ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ).

## **Vulcanismo caldérico**

El vulcanismo caldérico se ha dividido por Ferriz y Mahood (1984) en tres unidades de acuerdo con los eventos explosivos principales que originaron la morfología asimétrica de la caldera, estos eventos principales son la Ignimbrita Xáltipan, La Toba Faby y la Ignimbrita Zaragoza.

### **Unidad 5.- Ignimbrita Xáltipan**

El primer evento explosivo está relacionado con el emplazamiento de la Ignimbrita Xáltipan y la formación de la caldera de los Humeros. La Ignimbrita Xáltipan está compuesta por pómez riolítica rica en sílice, con biotita y, en menor proporciones, pómez riodacítica. La edad reportada con el método de  $\text{U}/\text{Th}-^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  es de  $164 \pm 4.2$  ka (Carrasco-Núñez, 2018), y el volumen es de  $291 \text{ km}^3$  de material, cubriendo un área de  $4,620 \text{ km}^2$  (Cavazos-Álvarez y Carrasco-Núñez, 2019). Esta unidad se puede encontrar en 3 estados de consolidación y soldamiento: densa, mediana, y sin consolidar (sin soldar), la localidad tipo es el pueblo de Xáltipan, localizado en la parte norte de la Caldera, donde se la puede encontrar con un alto grado de soldamiento ([Fig. 16](#)).

### **Unidad 4- Toba Faby**

El segundo evento explosivo de la CLH ocurrió hace  $70 \pm 23$  ka (Carrasco-Núñez et al., 2017), fue definido por Ferriz y Mahood (1984) como una sucesión de 15 capas de depósitos de caídas de pómez de composición andesítica a riolítica, ampliamente distribuidos en la caldera, con preferencia hacia el sector oriental (Willcox, 2011).

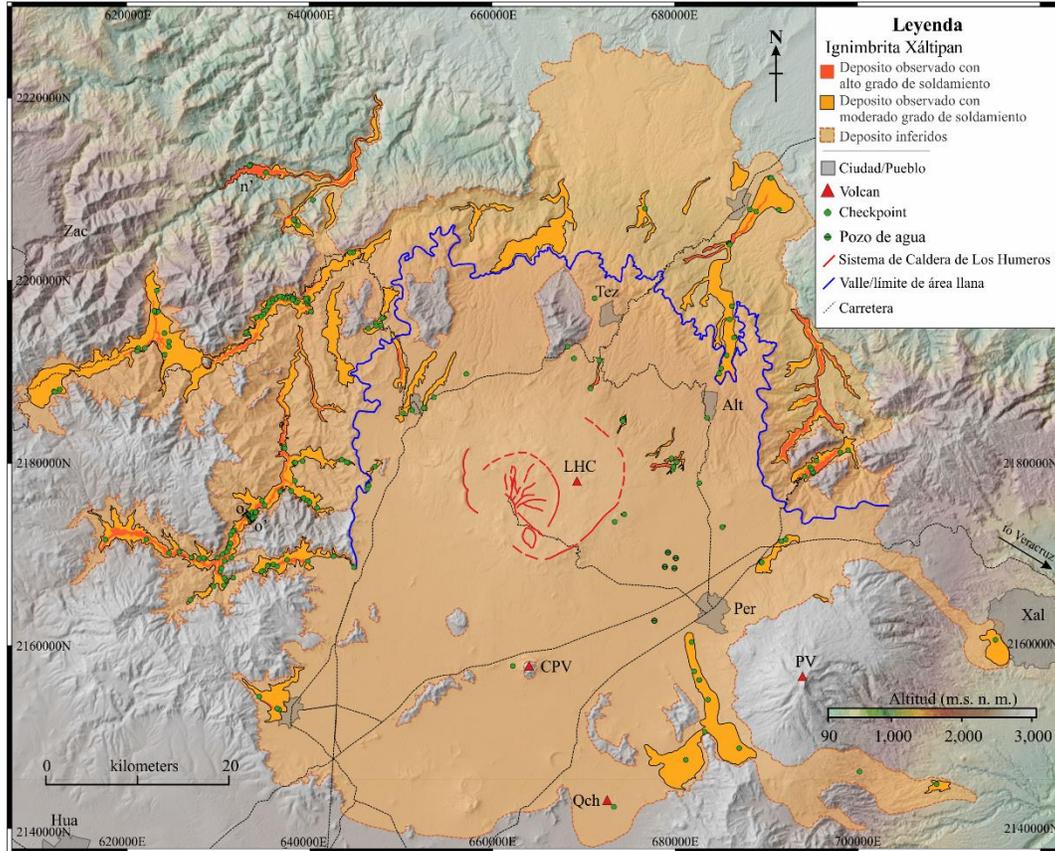


Figura 16. Mapa de la distribución de la Ignimbrita Xáltipan. Modelo de elevación digital graduado en color del área LHVC que muestra la distribución de los depósitos observados (OD) de la ignimbrita de Xáltipan con sus variaciones de litofacies de soldadura (no a moderadamente soldada en amarillo y altamente soldados en naranja), y los depósitos inferidos (ID) (amarillo pálido transparente). Modificado de Cavazos-Álvarez y Carrasco-Núñez (2019).

### Unidad 3- Ignimbrita Zaragoza

Esta ignimbrita es producto de la segunda erupción formadora de caldera de los Hornos, formando la caldera de los Potreros con un diámetro de 10 km, y un volumen de cerca de 15 km<sup>3</sup> de material DRE (Carrasco-Núñez y Branney, 2005). La distribución de esta unidad es amplia alrededor de la caldera, hacia el oeste aflora en la Sierra de Tlaxco y los mayores afloramientos se encuentran sobre el río Apulco, estando ausente dentro de la caldera. La Ignimbrita Zaragoza está compuesta por una secuencia que incluye depósitos piroclásticos tanto en la base como en la cima, además de la ignimbrita intermedia de la secuencia que alcanza hasta 20 m de espesor. La composición de los fragmentos juveniles varía desde pómez riodacítica a escorias andesíticas, y en menor proporción presenta fragmentos líticos heterolitológicos que incluyen riolitas, andesitas, basaltos, tobas soldadas,

granodioritas, calizas y clastos alterados (Carrasco-Núñez y Branney, 2005). Este zoneamiento composicional fue descrito por Ferriz y Mahood (1984) y estudiado en detalle por Carrasco-Núñez y Branney (2005) y Carrasco-Núñez et al. (2012).

### **Vulcanismo post-caldérico**

Este vulcanismo representa la última y más reciente etapa volcánica de la Caldera de Los Humeros. Su distribución es irregular y exhibe variaciones tanto en grosor como en estilo eruptivo, lo que indica que se originó a partir de diferentes fuentes (Carrasco-Núñez et al., 2017a). Está compuesto principalmente flujos de lavas y depósitos de escoria de composición de basáltica a andesita basáltica, así como algunos depósitos de pómez. Este vulcanismo está dividido en dos fases: una fase de resurgencia en el centro de la caldera y una fase de vulcanismo tanto explosivo como efusivo asociado principalmente al fracturamiento anular de la caldera y es de composición bimodal. (Carrasco-Núñez et al., 2017b).

### **Fase de resurgencia**

El vulcanismo de la fase de resurgencia comienza con el emplazamiento de algunos domos riolíticos (Qr1) en el interior de la CLH, al sur del pueblo Los Humeros y está fechada con U-Th en  $44.8 \pm 1.7$  ka y ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ )  $50.7 \pm 6$  ka (Carrasco-Núñez et al., 2017b). Posterior a esta actividad, se emplazan flujos de lavas de composición traquítica conocidas como Chicomiapa-Los parajes, al N-NNO de la CLH. Posteriormente hay registros de erupciones predominantemente subpliniana/pliniana (Willcox, 2011) conocidas como miembro Xoxoctic (Qxm) y descritas como depósitos de caída, con pómez lapilli angular y líticos (Willcox, 2011). Subsecuente al miembro Xoxoctic se emplazan al sur de la CLH las traquiandesitas Maxtaloya y flujos de lavas traquíticos. Usualmente esta unidad se presenta de color rojo debido a la oxidación y probablemente por procesos de autobrechamiento. Como fase final de esta fase se presenta la Ignimbrita Llano, la cual descansa sobre la toba Xoxoctic, y está representada por depósitos de flujo piroclásticos y depósitos de brecha, compuestos por bombas, bloques de escoria y lapilli, cuya estructura puede variar de no soldado a parcialmente soldado (Ferriz y Mahood, 1984; Willcox, 2011; Rojas, 2016). El emplazamiento de la Ignimbrita Llano está asociado al colapso del cráter Xalapazco (Dávila y Carrasco-Núñez, 2014) y tiene una edad  $^{14}\text{C}$  de 28 ka (Rojas, 2016).

## **Vulcanismo anular y fase bimodal**

En este subgrupo se generaron rocas por los conos de escoria basáltica desarrollados a lo largo del borde anular al sur de la CLH. Estos productos incluyen: las lavas intracaldera de San Antonio- Las Chapas (Qta3) datadas por  $^{14}\text{C}$  en  $8910 \pm 30$  años (Carrasco-Núñez et al., 2017b) y el flujo de lava basáltico andesítico Orilla del Monte, las cuales están cubiertas por la Toba Cuicuiltic, una secuencia compuesta por intercalaciones de depósitos de caída de lapilli de composición riolítica y andesítica- basáltica (Ferriz y Mahood, 1984; Willcox, 2011; Dávila y Carrasco-Núñez, 2014). Esta toba tiene una edad menor a 7.3 años AP, obtenida por el fechamiento por radiocarbono de un paleosuelo subyacente a esta unidad (Dávila y Carrasco, 2014). La actividad más reciente comprende de una serie de flujos de lava de composición traquiandesítica y basáltica emitidos en  $3.9 \pm 0.13$  ka (Carrasco-Núñez et al., 2017b), así como también flujos de lava traquíticos emitidos cerca del borde SW de la caldera, fechados en  $2.8 \pm 0.03$  ka (Carrasco-Núñez et al., 2017b).

## **2.5 Estratigrafía del subsuelo**

Por lo que concierne a la geología del subsuelo, Viggiano y Robles (1988) propusieron uno de los primeros esquemas para su configuración geológica, la cual se divide en 4 unidades de acuerdo a sus características litológicas: de la base a la cima se localiza la unidad IV, referida como el “basamento local” compuesto por calizas, hornfels, intrusivos; seguido de la unidad III que se caracteriza por la presencia de andesita de augita, en la parte superior, y la andesita de hornblenda. en la parte inferior; la unidad II infrayace a la anterior y evidencia un importante contraste petrológico formado por ignimbritas vítreas en la base e ignimbritas líticas en la cima y por último la unidad I constituida por andesitas basálticas con intercalaciones de basaltos. Este esquema ha sido la base para trabajos posteriores, los cuales a su vez han agregado subunidades y refinado la geología, hasta llegar al esquema propuesto por Carrasco-Núñez et al. (2017b) el cual presenta una estratigrafía muy detallada de La Caldera de Los Humeros ([Tabla 1](#)).

Tabla 1. Comparación de columnas estratigráficas del subsuelo propuestas por diversos autores a través del tiempo para la región de Los Humeros. Modificado de Fernández-Maya (2017).

Viggiano y Robles (1988)		Cedillo (1997)		Carrasco-Núñez (2008)		Carrasco-Núñez et al. (2017b)		
División	Litología	División	Litología	División	Litología	División	Litología	
I	Andesita de augita y basaltos.	1	Pómez, basaltos y andesitas	Grupo Post-caldérico	Lavas-escorias basálticas, andesítico basálticas y pómez	Etapa post Caldera	Fractura anular y fase bimodal	Depósitos piroclásticos indefinidos
								Traquitas El pájaro (2.8 ka)
Lavas basálticas de olivino (3.8 ka)								
Traquiandesitas basálticas Tepeyahualco								
Traquiandesitas Sarabia								
Andesitas basálticas El Limón								
Andesitas basálticas Atecax								
Toba Cuicuiltic (7.3 ka)								
Traquiandesitas Victoria								
Traquiandesitas San Antonio/ Las Chapas (8.9 ± 0.03 ka)								
II	Ignimbritas vítreas y líticas	2	Tobas líticas	Grupo Caldérico	Superior	Tobas riolíticas líticas vítreas, andesitas y dacitas	Fase de resurgencia	Toba Llano >28 ka
								Lavas riodacitas Maxtaloya
		3	Ignimbritas líticas y vítreas		Principal	Tobas riolíticas vítreas líticas		Miembro Xoxoctic
								Lavas traquíutica Chicomiapa-Los parajes
4	Intercalaciones de andesitas e ignimbritas	Basal	Andesitas y tobas riolíticas	Etapa Caldérico	Ignimbrita Zaragoza (69 ka <sup>3</sup> )			
					Toba Faby (70 ka <sup>4</sup> )			
III	Andesitas de augita en la parte superior; andesitas de hornblenda en la parte inferior. Localmente tobas y basaltos	5	Andesitas de augita	Grupo Pre-Caldérico	Superior	Andesitas, dacitas y riodacitas	Etapa pre-caldera	Domos riolíticos (270 ± 17ka)
								Riolitas (485 ± 2.2Ka)
		6	Toba vítrea Humero		Intermedio	Andesitas de piroxeno basalto y zona de alteración tobáceo		Domos riolíticos (485 ± 2.2 Ka)
8	Basaltos	Lavas andesíticas y dacíticas (8.9 <sup>1</sup> – 10.5 Ma <sup>8</sup> )						
IV	Basamento local: Calizas, hornfels, intrusivos	9	Basamento formado por calizas, calizas metamorizadas e intrusivos	Basamento Pre-volcánico	Calizas metamorizadas, hornfels y skarns, rocas intrusivas (diabasas, granodioritas)	Basamento pre-volcánico e	Granitos (15.12 Ma)	
							Calizas y lutitas, intrusivos andesíticos (Cretácico/Jurásico)	
							Granodioritas y esquistos (Paleozoico/Cretácico)	

Además de estos esquemas, se han realizado trabajos detallados de caracterización litológica de pozos, para la selección de pozos se han basado en el tipo de material y disponibilidad de muestras, alteración hidrotermal, y posición en el capo geotérmico (Carrasco-Núñez et al., 2017a). Se seleccionaron los pozos H5, H8, H10, H19, H25; para cubrir una sección Oeste a Este ([Fig. 17a](#); línea punteada de color azul), de igual manera se seleccionaron los pozos H42, H26, H19 y H20; para cubrir una sección Sur a Norte ([Fig. 17a](#); línea punteada de color verde). A continuación, se describe la geología del subsuelo, a partir de la descripción de algunos pozos representativos:

#### Pozo H-5 (2754 a 854 msnm)

El pozo H-5, localizado en la parte oeste del CGLH ([Fig. 17c](#)), tiene una profundidad de 1900 metros. Gómez-Castellano (2016) describe que el pozo corta el basamento sedimentario, con un espesor de 520 metros y compuesto por calizas, las cuales presentan intrusiones de un dique andesítico, seguido del vulcanismo pre-caldérico que tiene un espesor de 870 metros, y lo integra en la base por basaltos y andesitas basálticas de 180 m de espesor, en la parte central con 400 metros de espesor por intercalaciones de tobas líticas, riolitas, zonas de alteración de aspecto tobáceo y andesitas microlíticas, y en la parte superior, con un espesor de 290 metros, por lavas andesíticas microlíticas a porfídicas de plagioclasa y piroxenos. Sobreyace a estas lavas el vulcanismo caldérico, integrado en la base por 180 metros de una toba lítica/cristalina, la cual se correlaciona con la Ignimbrita Xáltipan, seguido por un paquete de 180 metros de espesor de lavas andesíticas, con intercalación de riolitas, andesitas basálticas y tobas vítreas. Sobreyace el grupo post-caldérico con un espesor de 210 metros, compuesto en la base por lavas de andesita-dacita de 120 metros de espesor, y en la cima se encuentra una serie de intercalaciones de lavas andesíticas y depósitos de caída.

#### Pozo H-19 (2808 a 500 msnm)

Este pozo está localizado en el centro de la CGLH, tiene una profundidad de 2300 metros. Una de las características es que el pozo no corta el basamento sedimentario, la base del pozo lo integra el grupo III conformado por el vulcanismo pre-caldera con un espesor de 1800 metros, compuesto en su mayoría por lavas andesíticas, con algunas intercalaciones en

la base de zonas de alteración, y en la cima por intercalaciones de tobas líticas, y riolitas. Encima de este grupo tenemos el grupo II integrado por el vulcanismo caldérico, el cual tiene un espesor de 320 metros, y está integrado en la base por una toba cristalina-lítica la cual se correlaciona con la Ignimbrita Xáltipan. Estas tobas incluyen paquetes de una toba vítrea alterada, que se correlaciona con la toba Faby, y en la cima de este grupo, por un paquete de tobas vitrolítica, las cuales se correlacionaron con la Ignimbrita Zaragoza. Encima de este grupo se encuentra el grupo I conformado por el vulcanismo post-caldérico, integrado por 180 metros de espesor de lavas andesíticas basálticas, lavas basálticas y depósitos de caídas ([Fig. 17c](#)).

#### Pozo H-25 (2800 a 500 msnm)

El pozo H-25 se localiza en la parte este del CGLH muy cerca del escarpe de Los Potreros ([Fig. 17a](#)). Este pozo no corta el basamento sedimentario, en su base se registra el grupo pre-caldérico, conformado por lavas de diferentes composiciones con un espesor de 1320 metros, en la base de este grupo se registra una intercalación de lavas andesíticas, basálticas y riolíticas, con algunas intercalaciones de zonas de alteración de aspecto tobáceo, en la cima de este grupo tenemos lavas riolíticas con algunas intercalaciones de andesitas, posteriormente encontramos el paquete litológico que corresponde al grupo calderico con un espesor de 200 metros con Ignimbritas en la base de color negro y, en la cima, ignimbritas de color gris claro. Encima de este grupo se encuentra el grupo post-caldérico con un espesor de 300 metros, en la base se encuentran intercalaciones pómez de color blanco, café y gris, y lavas andesíticas porfídicas, en la cima se encuentran vitrófidios, andesitas porfídicas, riolitas, pómez blanca, y pómez gris.

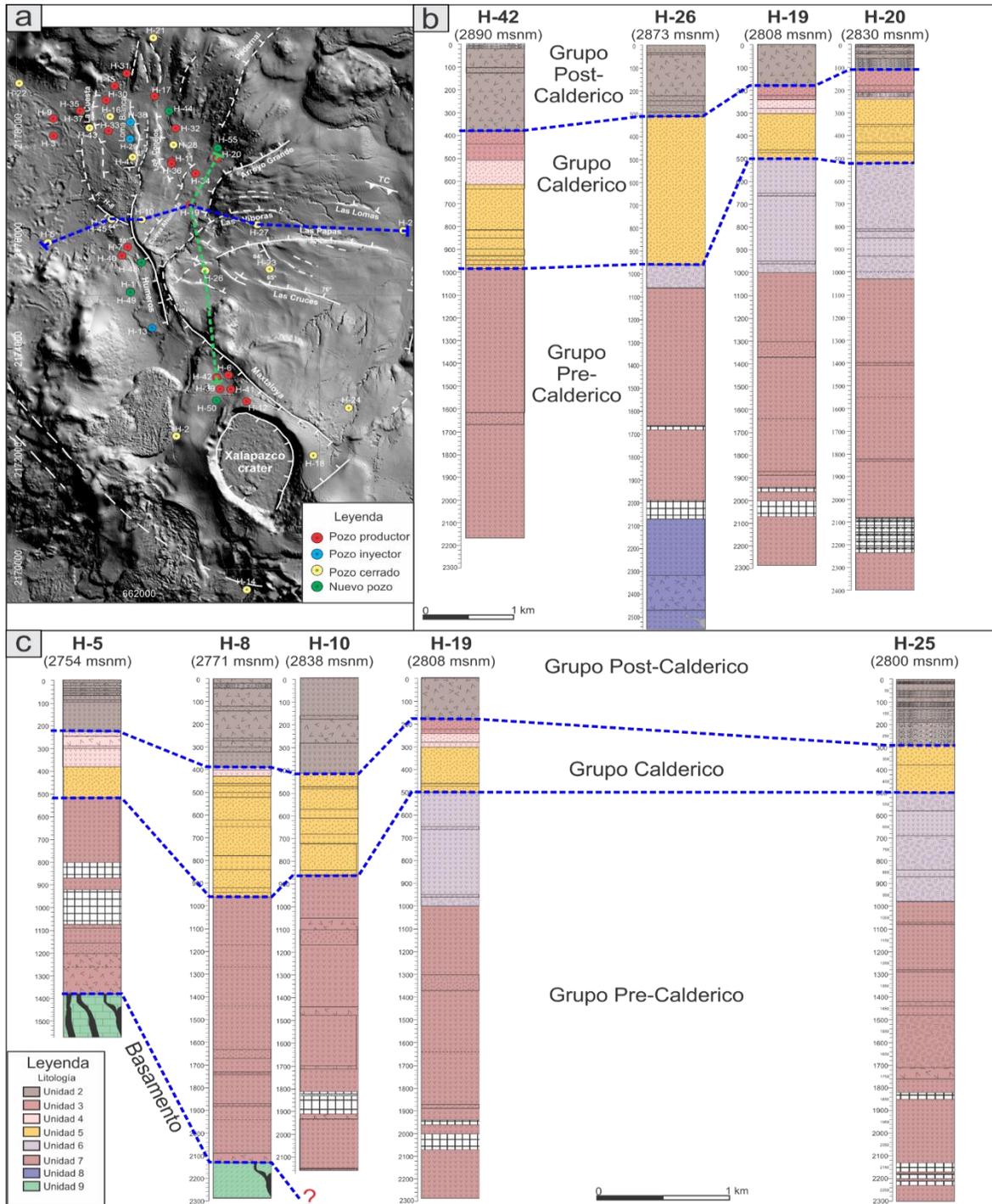


Figura 17. Secciones estratigráficas del subsuelo de Los Humeros, mostrando los principales grupos volcánicos (separados con línea discontinua de color azul). A) DEM del Campo Geotérmico mostrando la distribución de los pozos (la línea punteada azul corresponde a la sección O-E que va del pozo H-5 al H-25; la línea punteada verde corresponde a la sección S-N que va del pozo H-42 al pozo H-20). B) Sección estratigráfica con dirección sur a norte del subsuelo de CGLH, mostrando las columnas litológicas de los Pozos H-42, H-26, H-19 y H-20. B) Sección estratigráfica con orientación oeste a este del subsuelo del CGLH, mostrando las columnas litológicas de los pozos H-5, H-10, H-19 y H-25. Modificado de Carrasco-Núñez et al. (2017a).

## Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se describe la metodología empleada en la recopilación y análisis de información, creación de bases de datos, procesado de datos y el desarrollo del modelo 3D. En el que se expone la extracción de los datos más relevantes de estudios recientes, así como el procesado de estos, y las propiedades del software del modelado geológico Leapfrog Geo. Además de cómo fue integrada la información y las etapas de construcción del modelo 3D.

### 3.1 Generación de las bases de datos

La adquisición de datos se basó en el análisis de la información más relevante de un gran número de documentos como artículos científicos, tesis de licenciatura, maestría o doctorado, mapas, entre otros, además de información proveniente de reportes técnicos (no publicados), varios de estos trabajos han sido descritos previamente en la sección de antecedentes. Para lograr un mejor manejo de la información recolectada, ésta se dividió en tres bases de datos, de acuerdo con los estudios relacionados con su disciplina: geología, geofísica y geotermia ([Fig. 18](#) y [Tabla 2](#)).



Figura 18. Diagrama de generación de base de datos del presente estudio.

#### Base de datos geológicos

Para la creación de la base de datos geológicos se llevó a cabo la recopilación y revisión de la información de estudios previos de la zona. El conjunto de información recopilada se basa en columnas estratigráficas además de mapas geológicos y estructurales, así como reportes de logueo de pozos, como ha sido descrito con anterioridad. La revisión de la información se basó en la estratigráfica propuesta por Carrasco-Núñez et al. (2008, 2017b), la cual separa la litología del subsuelo en 9 unidades ([Tabla 1](#)), posteriormente se llevó a

cabo la correlación estratigráfica de los pozos y las unidades que afloran en la CLH ([Tabla 2](#)).

#### Base de datos geofísicos

La información recopilada en esta base de datos se basa en los estudios descritos previamente en el capítulo de antecedentes de estudios geofísicos. Entre estos estudios más relevante están: el mapa de anomalías magnéticas, el mapa de anomalías de Bouguer, así como los perfiles MT, además de los estudios sísmológicos, como las zonas de atenuaciones, mapas de isoamplitudes, hipocentros de los sismos, mapa de temperatura superficial ([Tabla 2](#)).

#### Base de datos geotérmicos.

Parte de la información compilada se extrajo de reportes de CFE y se basó exclusivamente de registros de pozos de temperatura, pérdida de circulación, y pérdida de presión, además de la producción de vapor en los pozos ([Tabla 2](#)).

Tabla 2. Base de datos para este trabajo.

<b>DISCIPLINA</b>	<b>DATOS</b>	<b>FUENTE(S)</b>
<b>GEOLOGÍA</b>	DEM de la zona 34 x 29 km Mapa geológico y estructural de Los Humeros.	NASA EarthData Carrasco-Núñez et al. (2017); Norini et al. (2015); Del Pilar-Martínez (2015); Acosta-Azúa (2016); Gómez-Castellanos (2016); Peña-Rodríguez (2017); Fernández-Maya (2017); Jáquez-Domínguez (2018); Machorro-Bretón (2018); Huerta-Luna (2018); reportes de CFE.
	Petrografía y geoquímica de pozos.	
<b>GEOFÍSICA</b>	Perfiles de MT Mapa magnetelúricos, Mapa de gravimetría residual	Arzate et al. (2018), Corbo-Camargo et al. (2020)
	Sismicidad, atenuación, isoamplitudes.	Torres-Cuenca (2017); Lermo-Jiménez, en proceso.
<b>GEOTERMIA</b>	Datos de producción del 2000 al 2017.	Datos proporcionados por CFE.
	Datos de isotermas. Datos de presión y pérdida de circulación de pozos.	Datos proporcionados por CFE.

### 3.2 Procesamiento de datos

Para la exportación de los datos al software de modelamiento, se realizaron varias etapas de procesamiento de acuerdo con el tipo de archivo requerido en el software de LeapFrog Geo. Estos documentos pueden ser archivos CSV (del inglés *Comma-Separated Values*) y mapas de distribución.

#### Archivos CSV

Para la interpolación de las superficies de las unidades estratigráfica, el software requiere 3 archivos: *collar*, *survey* y unidades geológicas, para estos archivos se utilizó la información recopilada de pozos geotérmicos, las cuales se explican a continuación.

- Collar: Este archivo contiene los datos de los nombres de cada pozo, coordenadas, elevación topográfica y profundidad.
- Survey: Contiene el nombre de los pozos, su profundidad, la dirección (azimut) y el buzamiento (dip).
- Geología: Corresponde a un archivo que contiene los nombres de los pozos, las profundidades donde comienza y termina el intervalo de cada unidad, y el nombre de la unidad a la que corresponde el intervalo.

Otros archivos CVS que se ingresaron fueron:

- Permeabilidad: Intervalos de zonas permeables obtenida de registros geotérmicos de pozos (temperatura, presión y pérdida de circulación).
- Fracturas. Intervalos de fracturas observadas en la petrografía descrita en trabajos previos.
- Sismos: Ubicación y magnitud de los sismos registrados en el CGLH.

#### Mapas

Una de las mejores maneras de poder visualizar las distribuciones de los datos en una región geográfica es desarrollando mapas de distribución. Estos mapas se crearon a partir de información de producción de pozos geotérmicos y fueron procesados en el programa Surfer, utilizando la herramienta de interpolación de kriging simple. Los mapas creados fueron los siguientes ([Fig. 19](#)):

- Valores máximos de producción.
- Mapa de producción promedio de 5 años

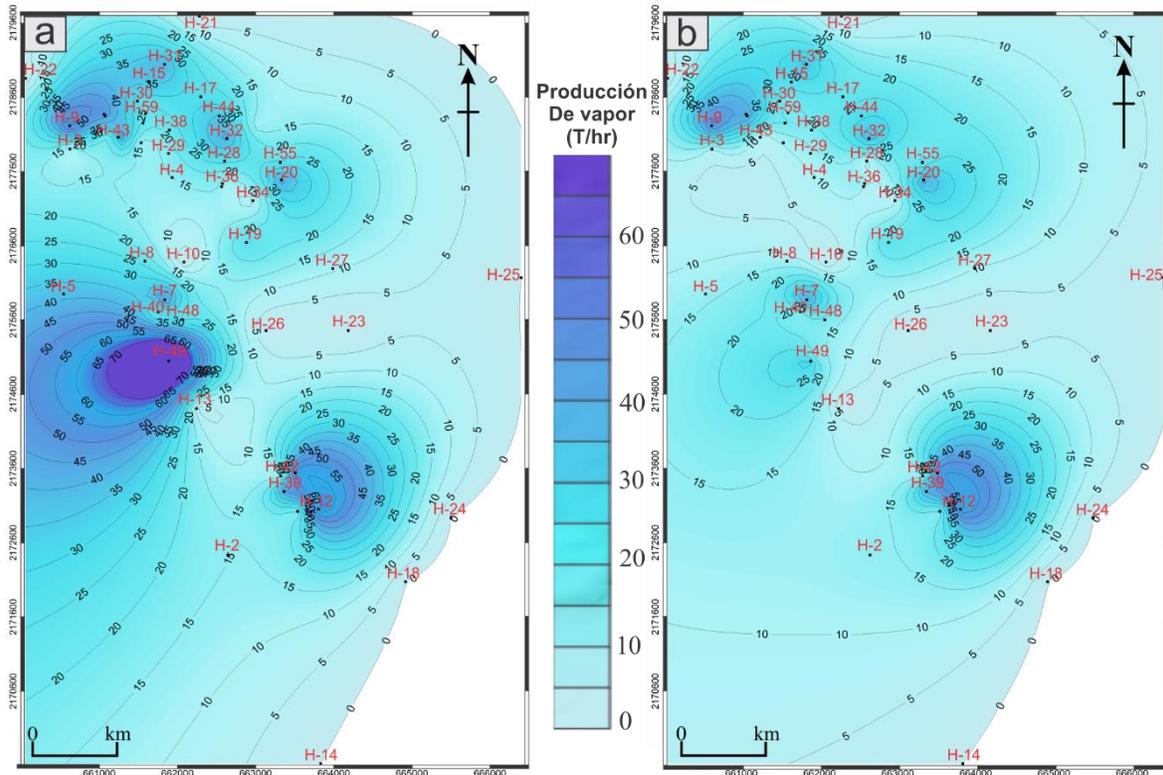


Figura 19. Mapas de producción de vapor. A) Mapa de valores máximos de producción, se puede observar que los pozos que alcanzaron valores superiores a 50 Toneladas por horas fueron el pozo H-49, H-9 y H-12. B) Mapa de valores promedios de producción en los últimos 5 años; en el cual se observa que los pozos con mayor producción de tonelada de vapor son el H-9, H-45, H-32, H-20, H-7, H-39 y H-12. Información proporcionada por CFE.

### 3.3 Consideraciones del software

*Leapfrog Geo* es un software de visualización y modelamiento de datos geológico 3D, desarrollado por ARANZ GEO (*Applied Research Associates Ltd*), además con la contribución geocientíficas de *GNS Science*, se desarrolla como una herramienta a partir de la necesidad de la industria geotérmica de visualizar sistemas geotérmicos en 3D, con el propósito de asistir a un mayor entendimiento de reservorios dinámicos. El software es capaz de manejar información geológica compleja y diversa de datos irregularmente espaciados ([Tabla 3](#)), permitiendo además que los modelos 3D se construyan de manera rápida y que puedan ser actualizables con facilidad.

Los contactos estratigráficos se modelaron utilizando las Funciones de Bases Radiales (FBR). Las FBR son una serie de técnicas de interpolación exacta, en donde la superficie debe pasar por cada valor de muestra medido. Esta metodología fue utilizada por primera vez por Hardy (1971) para la interpolación de datos topográficos dispersos, y la empresa ARANZ se ha encargado de desarrollar su implementación, permitiendo que un geólogo pueda usar millones de puntos de datos para crear una superficie de interpolación suave (Carr et al., 2001; Cowan et al., 2002; Frank et al., 2007; Alcaraz, 2012). Además, la empresa ARANZ amplió la aplicación de las FBR para la creación de superficies de contactos litológicos a partir de datos de pozos complementándola con puntos de datos integrados desde la interpretación geológica.

En las FBR la anisotropía es aplicada para hacer las superficies geológicas consistentes, mediante contactos que son utilizados para dividir el espacio y crear unidades estratigráficas 3D. Muchos tipos de datos pueden ser cargados en el software ([Tabla 3](#)), para apoyar el modelado y mejorar la visualización de características geotérmicas claves (Alcazar et al., 2011).

Tabla 3. Tipos de datos que pueden ser cargados en LeapFrog Geo, propuesto en Alcazar et al. (2011).

<b>Datos geológicos</b>	
Imágenes	Datos SIG (puntos, polilíneas, polígonos)
Datos topográficos	Secciones
Datos de pozos	Datos numéricos
Simulación numérica	Logueo de datos de pozos

De acuerdo con Alcazar y colaboradores (2011), una de las principales ventajas en la aplicación de las funciones implícitas en la generación de modelos tridimensional es que son generalmente menos demandantes en el espacio del disco duro y la memoria de la computadora. La alta velocidad de procesamiento y la capacidad de datos del modelado implícito significa que los modelos de geología 3D se pueden actualizar fácilmente con nuevos datos o se pueden usar para probar ideas en tiempo casi real (Cowan et al. 2002).

Leapfrog Geo rinde reconocimiento de valores de datos medidos o conocidos, como contacto de litología, y puede incorporar conocimiento adicional, como la interpretación geológica. Como consecuencia, los datos subjetivos se pueden guardar por separado de los conocidos, aunque ambos conjuntos de datos se fusionan en el proceso de construcción para

producir un modelo consistente (Alcazar et al., 2011). Los objetos tridimensionales se guardan como funciones continuas y se utilizan para generar superficies con resoluciones definidas por el usuario. El usuario final influye en el modelado modificando parámetros de alto nivel, como la anisotropía. Cuando se agregan o modifican datos, las superficies se reconstruyen rápida y de manera automática.

### 3.4 Desarrollo del modelo

En esta sección, se describe la integración en el software de los datos recopilados y procesados además de las etapas en la construcción del modelo 3D. Los pasos han sido los siguientes:

El primer paso en la creación del modelo geológico en el software LeapFrog Geo es la delimitación de la zona de trabajo para lo cual se integra el modelo digital de elevación (Fig. 20a), posteriormente se importa los archivos geológicos en formato CVS en la herramienta *DrillHole*, estos archivos son *Collar*, *Survey* y *Geología* (Fig. 20b), una vez cargados los archivos se podrá visualizar en 3d los pozos y su posición respecto al *DEM* (Fig. 21). Consecutivamente se importa la información de las demás bases de datos, como los mapas geológicos y estructurales, mapas y perfiles geofísicos, así como mapas de producción, además archivos de datos georreferenciados como son los intervalos de permeabilidad, zonas de fracturamiento, hipocentros de sismos, entre otros.

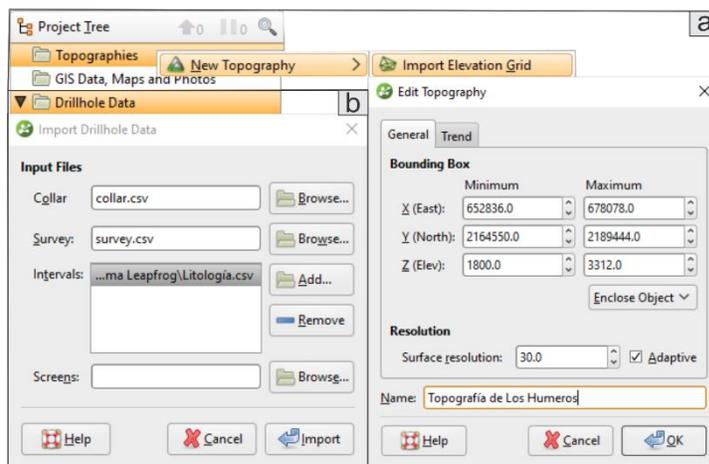


Figura 20. Pantalla del software LeapFrog Geo que muestra: a) los pasos a seguir para la importación del DEM y creación de la topografía del modelo. b) detalles sobre la importación de archivos geológicos al modelo.

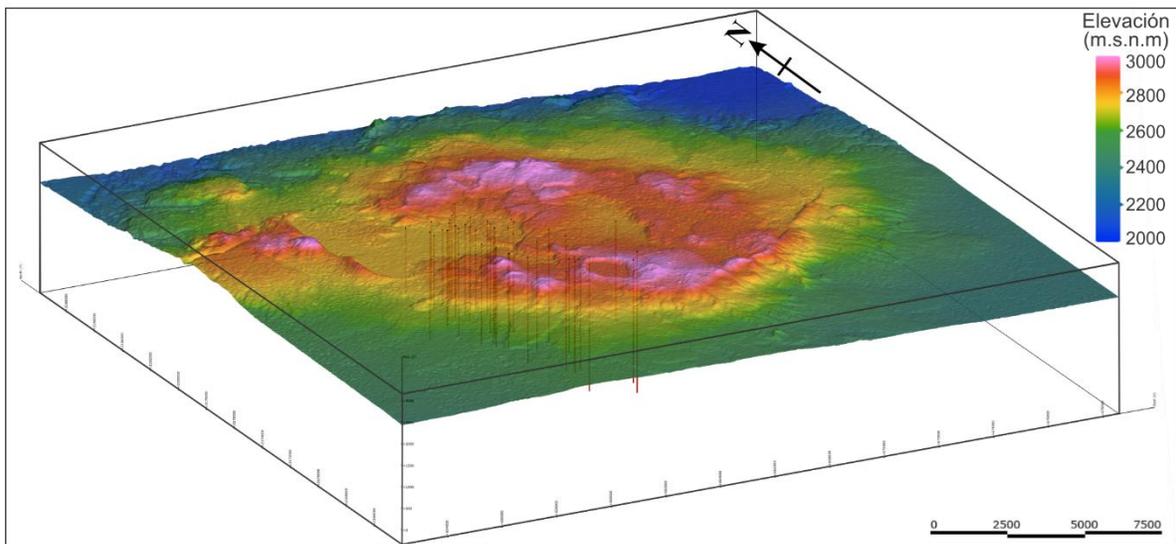


Figura 21. Visualización en 3D del modelo digital de elevación de la Caldera de Los Hornos y sus pozos geotérmicos. Escala vertical x1.5.

Una vez cargados los archivos *Collar*, *Survey* y Geología, el siguiente paso es crear un nuevo modelo geológico 3D, para eso se selecciona la carpeta de *Geological Models* en el árbol de proyecto y se añade un nuevo modelo geológico, se va a abrir una nueva ventana con las configuraciones (Fig. 22a), se selecciona la columna de litología y el área que se desee generar. Posteriormente se añade una nueva secuencia estratigráfica para las unidades geológicas, dando como resultado las superficies de contacto entre cada unidad, las cuales se van a refinar a detalle con el mapa geológico y estructural de Los Hornos (Fig. 22b).

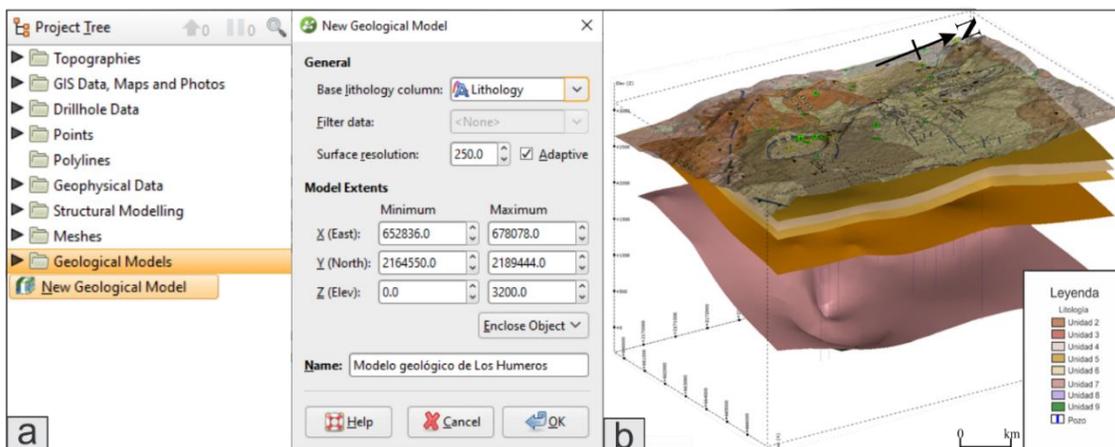


Figura 22. Generación del modelo geológico en el software LeapFrog Geo. a) Pasos a seguir para la creación de un nuevo modelo geológico comenzando con la carpeta de modelo geológico en el árbol de proyectos, posteriormente la herramienta de Nuevo modelo geológico y su ventana de configuración. b) Corte en el área del campo geotérmico donde se puede visualizar las superficies de contacto entre cada litología, además del mapa geológico (modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017b; leyenda en la fig. 15) sobre la topografía. Escala vertical x1.5.

En la etapa de interpolación de las estructuras geológicas, la metodología es la siguiente: en el menú del modelo geológico se encuentra la herramienta de *Fault System*, la cual se utiliza para la creación de sistemas de fallas (Fig. 23a), ya sea que los datos de la falla estén en un archivo o se pueden crear los datos por medio de polilíneas utilizando los mapas geológicos-estructurales (Fig. 23b), así como otras secciones como perfiles geofísicos (Fig. 23c), las fallas solo serán proyectadas en el modelo final.

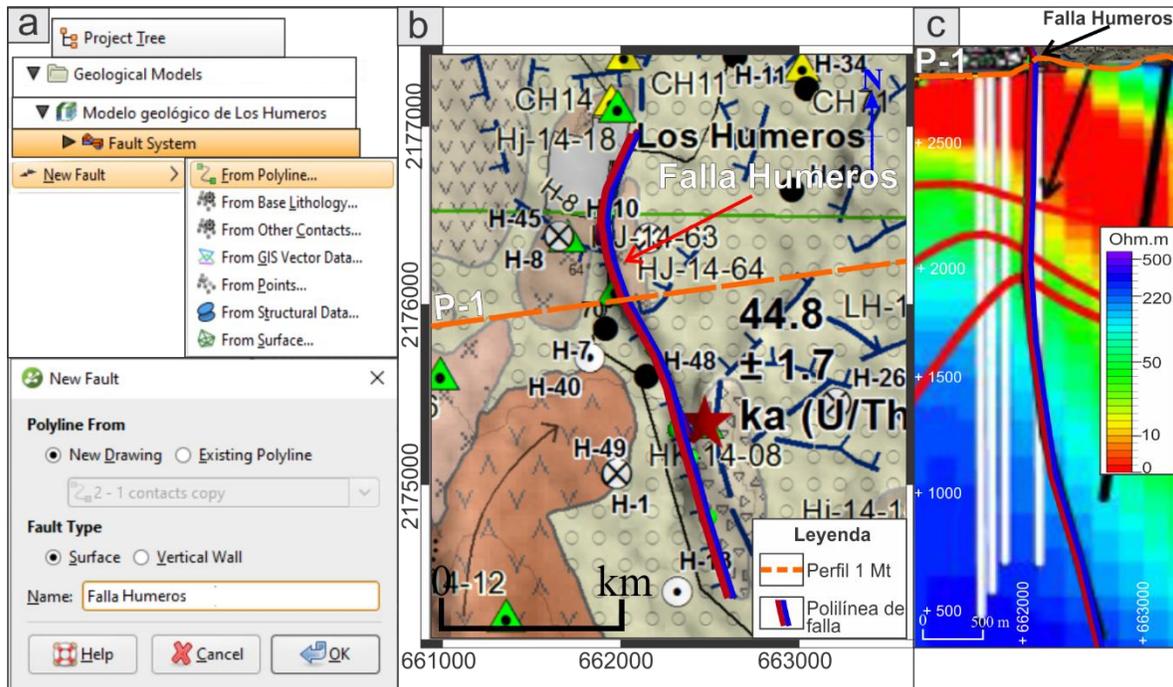


Figura 23. Etapa de interpolación de estructuras geológicas. a) Procedimiento para crear una falla en LeapFrog a partir de una polilínea. b) Trazo de polilínea de la falla Humeros en el mapa geológico (modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017b; leyenda en la fig. 15). c) Trazo a profundidad de la polilínea de la falla Humeros en el perfil 1 Mt. Escala vertical x1.5.

Para la interpolación de las isotermas y zonas permeables se crea un modelo numérico para cada uno de los parámetros, para eso se utiliza la herramienta de interpolación de función de bases radiales, consecuente se abre la ventana de configuración para el nuevo modelo numérico, en el cual se van a agregar los archivos numéricos, así como el volumen y la resolución del modelo. (Fig. 24).

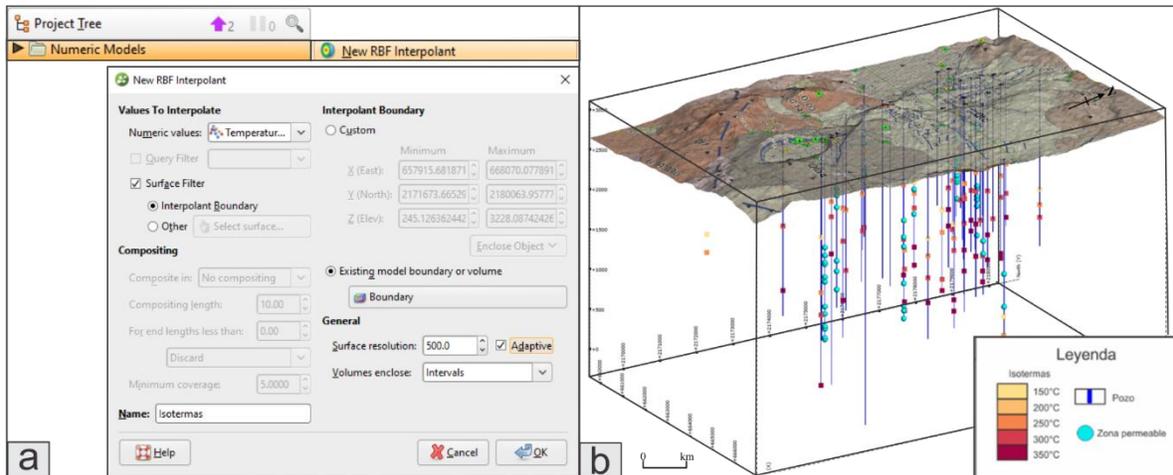


Figura 24. Procesado de datos de isotermas y permeabilidad. a) Pasos para la creación de modelos numéricos. b) Vista en 3D del mapa geológico de Los Humeros (modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017b; leyenda en la [fig. 15](#)) sobre el DEM. Se puede apreciar la proyección de los pozos se registró datos de temperatura (cuadros) y zonas permeables (círculos de color azul). Escala vertical x1.5. Datos proporcionados por CFE.

## Capítulo 4. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados del análisis, procesamiento y la interpolación de los datos adquiridos. Las etapas de interpolación fueron explicadas en el capítulo 3, los cuales dieron lugar a diferentes cuerpos tridimensionales ([Tabla 4](#)) además de visualizar datos en 3D como puntos, mapas y secciones. En esta sección se explica que elementos contempla el modelo tridimensional.

Tabla 4. Tipos de datos cargados en el modelo resultante.

Disciplina	Cuerpo tridimensional interpolado	Datos visualizados en 3D	Mapas visualizados en 3D
Geología	Modelo de elevación Digital Unidades geológicas de la 9 a la 2 Fallas estructurales	Intervalos de unidades geológicas en pozos	Mapa geológico de Los Humeros
Geofísica	Temperaturas superficiales	Sismicidad Zonas de atenuación	Mapas de Anomalías magnéticas, anomalías de Bouguer. Perfiles Magnetotéluricos Mapas de isoamplitudes a 0.7 y 1.1
Geotermia	Permeabilidad  Isotermas 150°C, 200°C, 250°C, 300°C y 350°C	Zonas de fracturamiento Intervalos de isotermas	Mapa de producción de vapor en el CGLH.

## 4.1 Modelo Geológico

En esta sección se presenta el resultado de la modelación geológica 3D, creado a partir de la interpolación de los diversos datos geológicos ya mencionados en la [tabla 4](#), y conformado por las unidades geológicas y el modelo estructural.

### Unidades geológicas.

Unidad 9. Corresponde al basamento sedimentario conformado por calizas, lutitas, rocas sedimentarias e intrusivos andesíticos; se interpoló a partir de la presencia de esta unidad en algunos pozos geotérmicos y por afloramientos localizados alrededor de la caldera de Los Humeros, tal como se puede apreciar en las figuras 25c y 25d, además que se puede visualizar un afloramiento superficial en el norte de la Caldera. En la figura 25C se visualiza el corte en la sección A-A' en donde se aprecia la configuración en los pozos H-5, H-10, H-27 y H-25, de los cuales solo el H-5 tiene la presencia de esta unidad. En la figura 25d se visualiza la sección B-B' donde se puede observar un interpolado en la dirección sur a norte, la configuración está dada por los pozos H-14, H-18, H-24, H-23, y H-27, el pozo H-14 está localizado en sur del campo geotérmico, mientras que el pozo H-21 se sitúa al norte del campo, el pozo H-24 presenta la mayor profundidad de la cima de esta unidad con una profundidad a 320 metros por debajo del nivel del mar, mientras el pozo H-14 presenta la menor profundidad de la cima a 1500 m s. n. m.

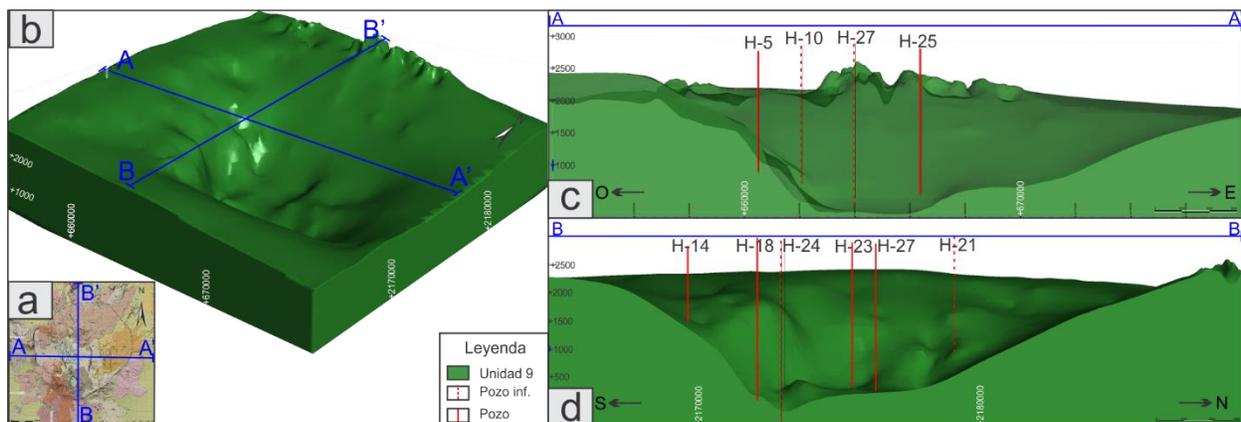


Figura 25. Configuración geológica de la unidad 9 (basamento sedimentario). A) Mapa geológico de Los Humeros (modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017b; leyenda en la [fig. 15](#)), el cual limita el área de interpolado 3D. Se muestran los trazos de los perfiles A-A' (orientado O-E) y B-B' (orientado S-N). B) Configuración 3D de la unidad 9. Escala vertical x4. C) Corte transversal con dirección O-E en la traza A-A', en donde se puede apreciar los pozos que configuran la unidad en el centro de la Caldera de Los Humeros. D) Corte transversal en la traza B-B', se visualizan los pozos que configuran la cima de la unidad en el centro de la Caldera, además del afloramiento que configura la unidad al norte. Escala vertical x2.

Unidad 8. Corresponde a la litología de andesitas de hornblenda y lavas dacíticas fechadas en (8.9 a 10.5 Ma). Se tiene registros de esta unidad solo en el centro de la caldera, debido a que lo cortan algunos pozos, esta unidad se correlaciona geoquímicamente con rocas del centro volcánico Cerro Grande (Carrasco-Núñez et al., 2017a). En la [figura 26](#) se observa la configuración espacial de esta unidad además de las secciones A-A' y B-B'. En la figura 26c se observa un corte al modelo en la sección A-A', en donde se puede apreciar la configuración en el centro del campo geotérmico, estando ausente en los pozos H-5 y H-25; sin embargo, algunos pozos ubicados al centro del campo si la registran (H-40, H-26 y H-27). En la figura 26d se observa el perfil que corresponde a la sección B-B' el cual tiene una orientación sur-norte, los pozos que limitan esta unidad en el sur son el H-18 y H-24 y en el norte el H-21 los cuales no registran esta unidad., en la parte central del campo geotérmico los pozos que tienen registro son el H-23 y H-27.

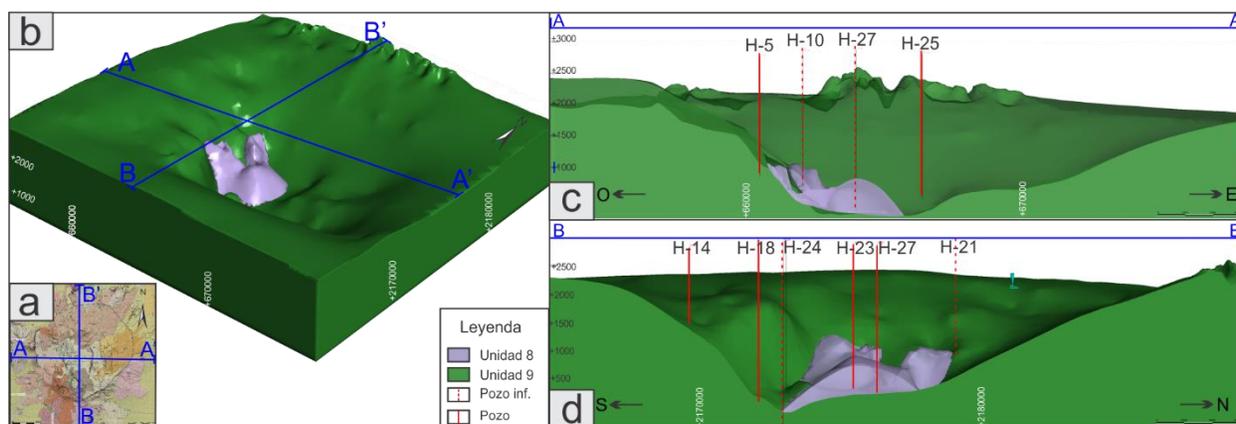


Figura 26. Configuración geológica de la unidad 8 (andesitas de hornblendas). A) Mapa geológico de Los Hornos (modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017b; leyenda en la [fig. 15](#)), el cual limita el área de interpolado 3D. Se muestran los trazos de los perfiles A-A' (orientado O-E) y B-B' (orientado S-N). B) Configuración 3D de la unidad 8 la cual se observa localizada al centro del campo geotérmico. Escala vertical x4. C) Corte en la traza A-A' se visualiza la ausencia de esta unidad en algunos pozos, por lo cual se delimita la unidad en el Oeste por el pozo H-5 y en el Este por el pozo H-25. D) Corte en la traza B-B', en el cual se plasma la configuración de esta unidad, los pozos H-24 y H-18 no presentan esta unidad y la delimitan al sur, mientras que en el norte en este corte se puede observar la ausencia de la unidad en el pozo H-21. Escala vertical x2.

Unidad 7. Corresponde a las lavas pre-caldéricas, principalmente andesitas intermedias, dominadas por andesitas porfídicas de piroxenos, las cuales se correlacionan con la andesita Teziutlán (Carrasco-Núñez et al., 2017a). Se tiene registro de esta unidad en todos los pozos presentando un potente espesor en el centro de la caldera ([Fig. 27](#)). En la figura 27c se visualiza un corte transversal en el modelo con dirección oeste a este, en el cual se observa la configuración litológica en pozos de esta unidad, hacia el oeste se observa que tiene propensión a reducir el espesor (H-5), en el centro de la caldera se visualiza diferentes

espesores, con una disminución relevante en el pozo H-27, mientras en el este se observa una tendencia a aumentar (H-25). En la figura 27d se muestra el corte en la sección B-B'; en esta sección se puede observar que el espesor más potente se encuentra en los pozos H-18 y H-24 con un poco más de 2 km de espesor reportados, mientras que los pozos con menos espesor son el H-14 y el H-27. En el sur tiende a disminuir el espesor en el pozo H-14, mientras que se observa la misma tendencia al norte con el pozo H-21 y además de que se visualizan los afloramientos que se localizan al norte.

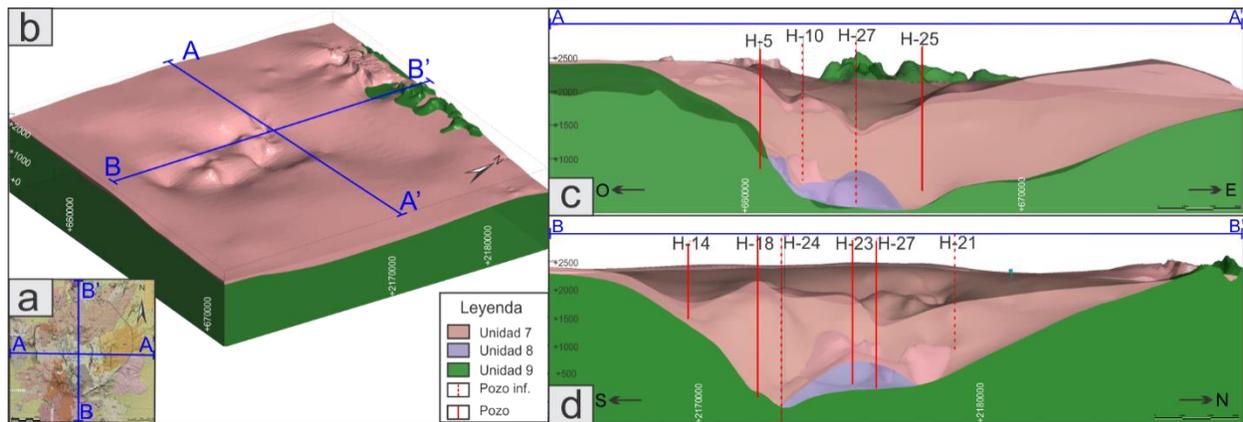


Figura 27. Configuración geológica de la unidad 7 (andesitas Teziutlán). A) Mapa geológico de Los Humeros (modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017b; leyenda en la [fig.15](#)), el cual limita el área de interpolado 3D. Se muestran los trazos de los perfiles A-A' (orientado O-E) y B-B' (orientado S-N). B) Configuración 3D de la unidad 7, en el cual se visualiza afloramientos al noroeste de la caldera. Escala vertical x4. C) Corte transversal con dirección O-E, se aprecia la configuración de los pozos, el espesor tiende a disminuir hacia el oeste (pozo H-5) mientras que en el centro de la Caldera se observa diferentes espesores, con una disminución considerable en el pozo H-27, mientras que hacia el este (pozo H-25) los espesores tienden a aumentar. D) Corte en la traza B-B', se visualizan configuración litológica de los pozos en la dirección sur-norte, al sur lo configura el pozo H-14 el cual registra un espesor de 100 m, se observa muchas irregularidad con un aumento considerable en el pozo H-18 y H-24, mientras el norte la configuración está dada principalmente por el pozo H-21 y los afloramientos al noroeste de la caldera Escala vertical x2.

Unidad 6. Está conformada por lavas silíceas principalmente riolitas pre-caldera que se encuentran registradas en pocos pozos ([Fig. 28](#)), además para este trabajo añadimos los afloramientos de riolitas pre-Xáltipan localizadas en el escarpe de los Oyameles y al noreste de la Caldera (Qr3 y Qr4; Carrasco-Núñez et al., 2017b) ([Fig. 28b](#)), en la sección A-A' ([Fig. 28c](#)) en el lado oeste se observa el corte en el escape de los Oyameles de esta unidad, hacia el centro en los pozos H-27 y H-25 tienen registros de esta litología, en la sección B-B' se puede observar la presencia de esta unidad en los pozos H-24 y H-27 ([Fig. 28d](#)).

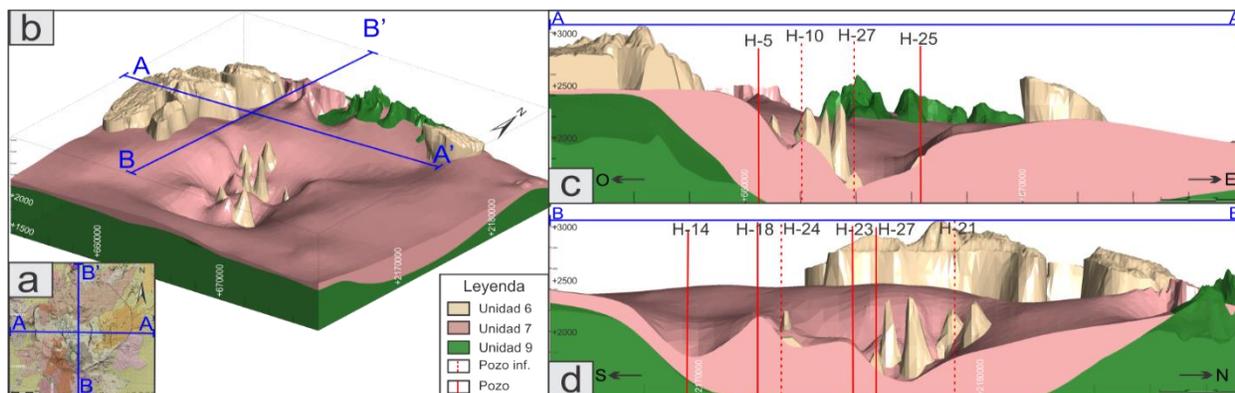


Figura 28. Configuración geológica de la unidad 6 (riolitas pre-calderas). A) Mapa geológico (modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017b; leyenda en la [fig. 15](#)) se muestran los trazos de los perfiles A-A' y B-B'. B) Configuración 3D de la unidad 6 el cual se observa los afloramientos al oeste y noreste además de la presencia en los pozos. Escala vertical x4. C) Corte en el perfil A-A' hacia el oeste se observa el corte en el afloramiento; en el campo geotérmico se observa la ausencia en la mayoría de los pozos a excepción del H-27 y H-25 D) Corte en el perfil B-B', se observa la presencia de esta unidad en el en el pozo H-24. Escala vertical x3.

Unidad 5. Está relacionada con el primer colapso de la caldera y el emplazamiento de la Ignimbrita Xáltipan. Se tiene registro de esta unidad en todos los pozos en el campo geotérmico y algunos afloramientos afuera de la caldera localizados principalmente al noreste ([Fig. 29](#)). Hacia el lado oeste en el corte de la traza A-A' se observa una disminución del espesor dado por el pozo H-5 ([Fig. 29c](#)), el espesor va aumentando al centro de la caldera y esto se observa en el pozo H-27 con un espesor de 430 metros, para el lado este se observa un espesor constante dada por el pozo H-25 y algunas afloramientos al este ([Fig. 29c](#)). En la sección B-B' se observa una disminución en el espesor al sur de la caldera dada por el pozo H-14, mientras que al norte del campo geotérmico se observa un aumento en el espesor dado por los pozos H-23, H-27 y H-21 ([Fig. 29c](#)).

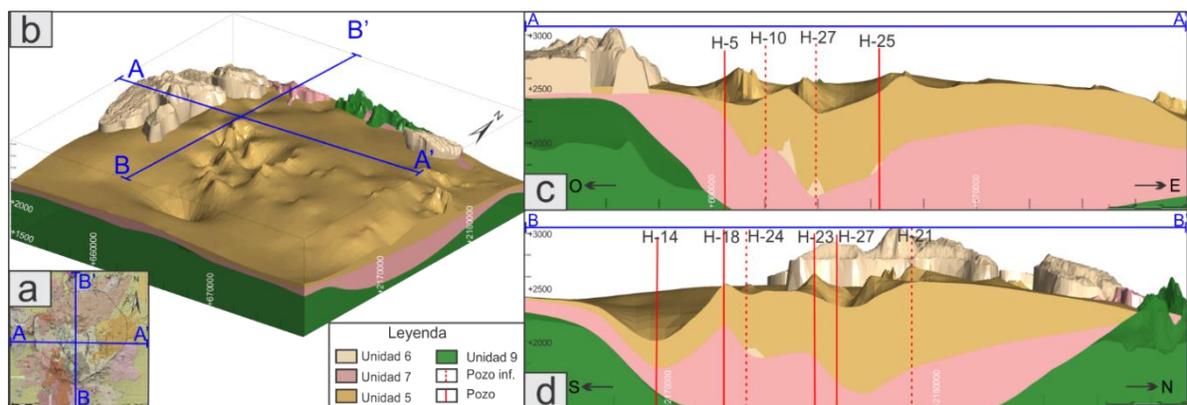


Figura 29. Configuración geológica de la unidad 5 (ignimbrita Xáltipan). A) Mapa geológico de Los Humeros (modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017b; leyenda en la [fig. 15](#)) se muestran los trazos de los perfiles A-A' y B-B' (línea de color azul). B) Configuración 3D de la unidad 5 se observa su distribución muy irregular al centro de la Caldera y algunos afloramientos al este. Escala vertical x4. C) Corte en la sección A-A' hacia el

lado oeste se observa espesores de 120 metros (H-5), mientras que al centro de la caldera los espesores van aumentando en este corte hasta 430 m (H-27), entre tanto hacia el lado este el espesor se mantiene constante (H-25). D) Corte en la sección B-B', muestra una variación del espesor de esta unidad, dada al sur con el pozo H-14 que reportan espesores de 200 m mientras que al centro de la caldera por los pozos H-27 hacia el H-21 se observa un aumento considerable de espesor de hasta 430 m. Escala vertical x3.

Unidad 4. Esta unidad está asociada a una potente secuencia de caída piroclástica de composición predominantemente riolítica (Ferriz y Mahood, 1985), se encuentra distribuida ampliamente en torno a la caldera, aunque emplazada de manera preferencial hacia su sector oriental (Carrasco-Núñez, 2008) (Fig. 30). Diversos autores la han identificado por métodos geoquímicos lo que ha permitido posibles correlaciones entre pozos (Carrasco-Núñez, 2008; 2012; Del Pilar, 2015; Gómez, 2016; Fernandez, 2016). En el corte en la sección A-A' la configuración en el lado oeste se da por el registro de esta unidad en el pozo H-5, mientras tanto la configuración de esta unidad en el lado este de la caldera se da por la presencia de esta unidad en el pozo H-25 además de algunos afloramientos localizado en el sureste del límite de la caldera (Fig. 30c). Por otra parte, en el corte de la sección B, se observa un aumento en el espesor al sur de la caldera dado por el pozo H-14 y por algunos afloramientos localizados al sur de la caldera (30d).

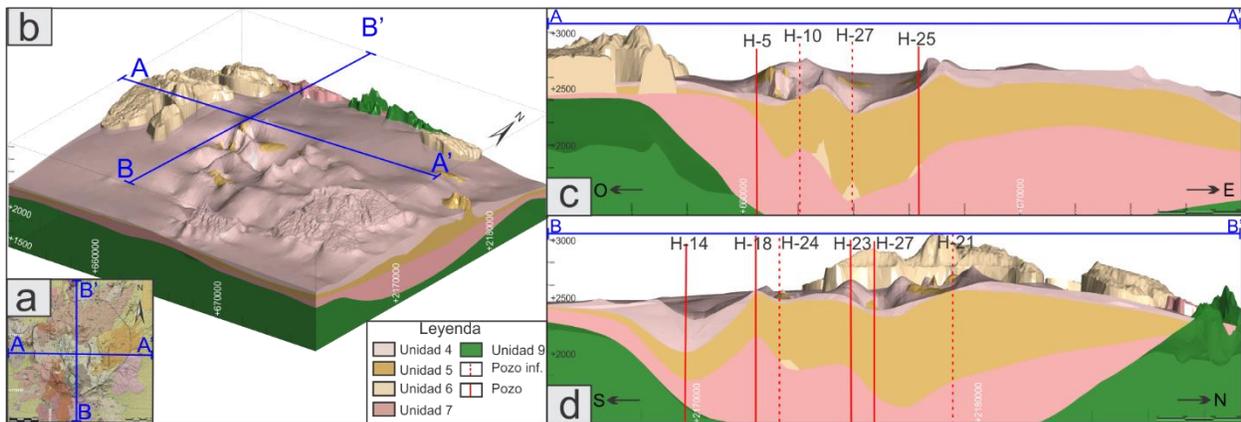


Figura 30. Configuración geológica de la unidad 4 (toba Faby). A) Mapa geológico de Los Humeros (modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017b; leyenda en la 5) se muestran los trazos de los perfiles A-A' y B-B' (línea de color azul). B) Configuración 3D de la unidad 5 y su distribución en la CLH, se observan afloramientos al sureste de la caldera. Escala vertical x4. C) Corte en la sección A-A' se aprecia que en el lado oeste del campo geotérmico tiene registro en el pozo H-5, hacia el centro de la caldera los pozos que pasan cerca de este corte (H-10 y H-27) no tiene registro de la unidad, mientras que en el lado este se observa un aumento de espesor dado por el pozo H-25 y un afloramiento que corta la sección afuera de la Caldera de Los Humeros. D) Corte en la sección B-B' se observa la ausencia de esta unidad adentro del campo geotérmico, sin embargo, hacia el sur se visualiza un aumento de espesor dado por el pozo H-14. Escala vertical x3.

Unidad 3. Está relacionada al segundo evento explosivo el cual originó la formación de la caldera de Los Potreros y al emplazamiento de la Ignimbrita Zaragoza con un volumen estimado de 15 km<sup>3</sup> (Carrasco-Núñez y Branney, 2005). Esta unidad tiene una distribución radial en torno en la caldera (Fig. 31), sin embargo, en el campo geotérmico tiene una distribución irregular y solo algunos pozos la han podido correlacionar con geoquímica (Carrasco-Núñez, 2008; 2017; Del Pilar, 2015; Acosta-Azuara, 2016). En el corte de la sección A-A' la configuración del lado oeste está dada por algunos afloramientos al noroeste de la CLH, en el campo geotérmico se observa la usencia de esta unidad en los pozos H-5 y H-10, en el centro del campo el pozo H-27 registra un espesor de 520 m de esta unidad, hacia el lado este la configuración está dada por el pozo H-25 y afloramientos en el escarpe de Los Potreros (Fig. 31c). En el corte en la sección B-B' se observa que el espesor en el CGLH se mantiene constante a excepción en el sur donde el pozo H-14 no hay registro de esta unidad, la configuración al norte está controlada por algunos afloramientos localizados en el noreste del Caldera (Fig. 31d)

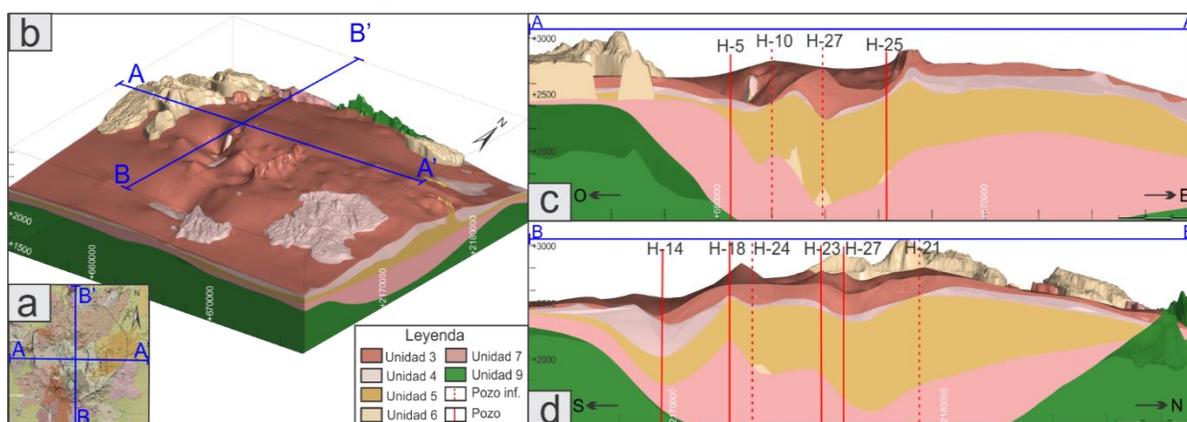


Figura 31. Configuración geológica de la unidad 3 (ignimbrita Zaragoza). Mapa geológico de Los Humeros (modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017b; leyenda en la fig. 15) se muestran los trazos de los perfiles A-A' y B-B' (línea de color azul). B) Configuración 3D de la unidad y su distribución se puede observar algunos afloramientos al noroeste y este del campo geotérmico. Escala vertical x4. C) Corte en la sección A-A' se visualiza la distribución irregular del espesor de la unidad y la ausencia de la misma en algunos pozos geotérmicos localizados en sector occidental del CGH (H-5 y H-10), en el centro de la caldera se observa un aumento de espesor dado por el pozo H-27 (520 m) después vuelva reducir su espesor hacia el pozo H-25 y sigue su configuración en el este con afloramiento en el escarpe de los potreros. D) Corte en la sección B-B se visualiza su configuración al sur de la caldera con muy poco espesor y la usencia de esta unidad dado por el pozo H-14, mientras que al centro de la caldera varios pozos cerca de la traza lo reportan (H-18,H-24, H-23, H-27 y H-21) con un espesor aproximado de 100 a 200 m, la configuración sigue al norte dado por unos afloramientos al noroeste de la caldera. Escala vertical x3.

Unidad 2. En esta unidad pertenece al grupo post-caldérico y contrasta con el grupo Calderico porque esta unidad se agrupan todas las lavas y depósitos piroclásticos recientes, las cuales exhiben fuertes variaciones laterales (Fig. 32), tanto en grosor como en estilo eruptivo, lo que indica que tenían diferentes fuentes (Carrasco-Núñez et al., 2017a). La configuración de la base de esta unidad se registra en las descripciones petrográfica de los pozos geotérmicos, el este del CGLH su configuración está dada por los pozos H-5 y H-10 (Fig. 32c) los cuales registran potentes espesores (220 a 400 m) principalmente de lavas intermedias (Peña- Rodríguez, 2017; Gómez- Castellano, 2016), al este del CGLH está configurada por el pozo H-25 el cual presenta un espesor de 300 m ( Fig. 32c). Al sur de la caldera la configuración está dada principalmente el pozo H-14 con 610 m de espesor lo cual indica la relativa cercanía de las bocas eruptivas de donde se sugiere provienen estos depósitos, mientras que al norte de la caldera se localiza el pozo H-21 dando un espesor de 120 m (Fig. 31d).

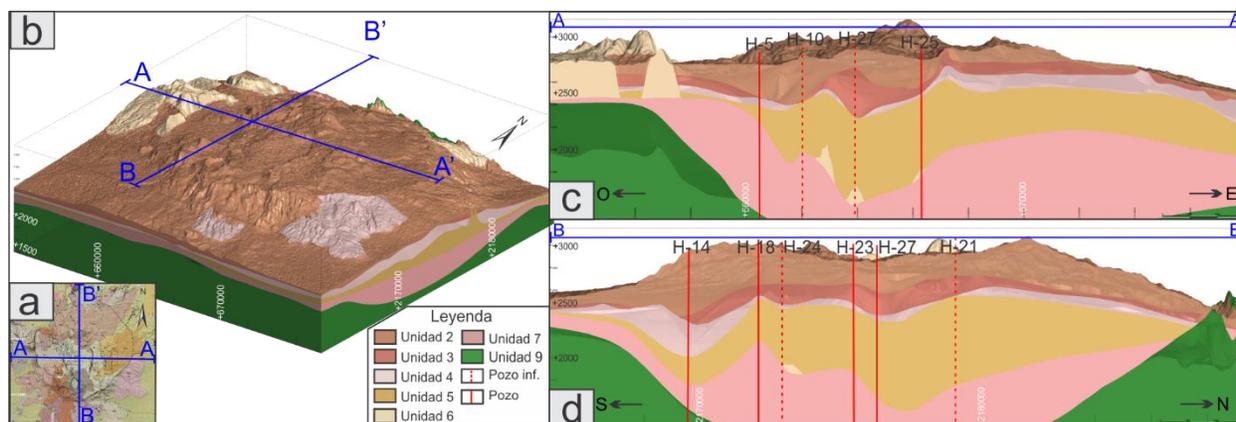


Figura 32. Configuración geológica de la unidad 2 (vulcanismo post-caldérico). Mapa geológico de Los Hornos (modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017b; leyenda en la fig. 15) se muestran los trazos de los perfiles A-A' y B-B' (línea de color azul). B) Configuración 3D de la unidad 2 y su distribución, se observa que al sur del CGLH una disminución de elevación de la topografía posiblemente dada por las depositaciones de lavas basálticas relacionadas con bocas eruptivas. Escala vertical x4. C) Corte en la sección A-A' se observa la configuración de esta unidad, en el lado este principalmente dado por el pozo H-5 y H-10 donde muestran espesores de 200 a 400 m. En el lado oeste del CGLH tiene registro el pozo H-25 con 300m de espesor. D) Corte en la sección B-B' se visualiza su configuración al sur de la caldera dada principalmente por el pozo H-14 con un espesor de 600 m, en los pozos del centro del CGLH que están cerca del corte mantienen un espesor constante ( $\approx 120$  m), y al norte del campo geotérmico está configurado por el pozo H-21 con un espesor de 120 m. Escala vertical x3.

## Modelo estructural de la caldera de Los Humeros.

Se interpolaron las principales fallas de la Caldera de Los Humeros con base en el mapa geológico de La Caldera de Los Humeros (Fig.15; Carrasco-Núñez et al., 2017b), secciones estructurales (Norini et al., 2015), y perfiles Magnetelúricos 2D (Corbo-Camargo et al., 2020). El resultado fue el modelo estructural 3D de Los Humeros el cual consiste en la proyección de las siguientes fallas: se tiene dos principales fallas anulares asociadas a los colapsos de La Caldera de Los Humeros, la primera falla anular es el escarpe de Los Humeros es la más grande con un diámetro de 17 por 18 km la cual delimita la caldera, la segunda falla anular es el escarpe de Los Potreros está asociada al segundo colapso y tiene un diámetro aproximado de 10 km (Fig. 33). Al interior de la caldera de Los Potreros encontramos los siguientes sistemas de fallas: el primero de NW-SE formado por las fallas Los Humeros, Maxtaloya, La Cuesta, Los Conejos, Falla H-8; el segundo sistema de NE-SW conformado por las fallas Arrollo Grande y Pedernales; y el tercer sistema con dirección E-W integrado por las fallas Las Víboras, Las Papas, Las Cruces (Fig. 33).

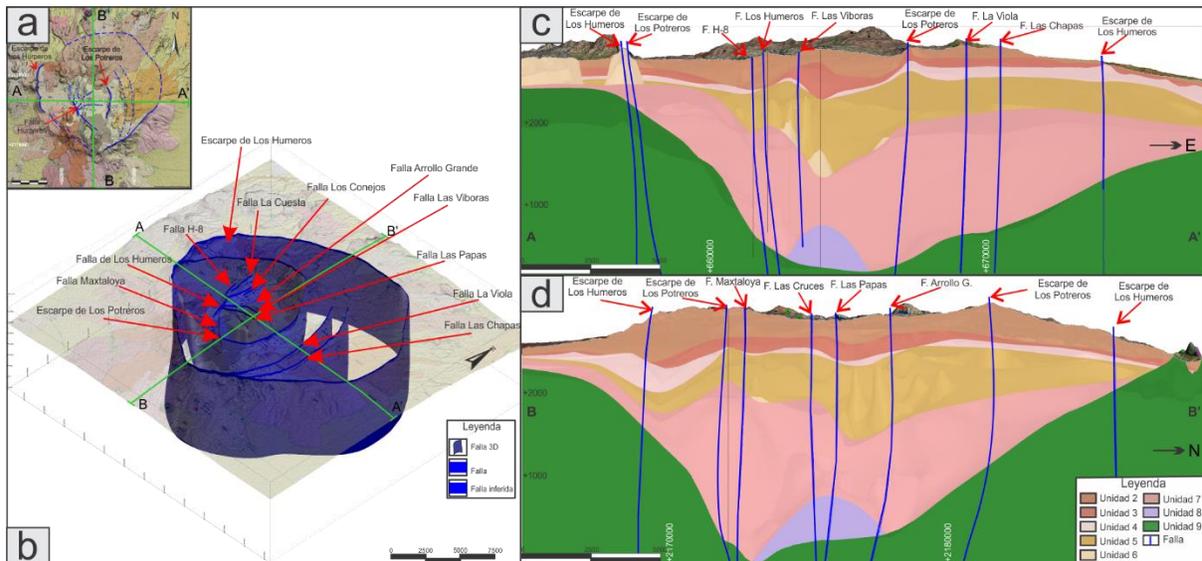


Figura 33. Modelo estructural de la Caldera de Los Humeros. a) Mapa geológico de Los Humeros (modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017b; leyenda en la fig. 15) con las principales estructuras geológicas. b) Perspectiva 3D las principales estructuras geológicas de los Humeros. c) Corte en la sección A-A' del modelo geológico, se visualizan las principales fallas que dominan en el campo geotérmico: Falla H-8, F. Humeros y Las Víboras. d) Corte en la sección B-B' del modelo geológico y la visualización de las principales estructuras. Escala vertical x4.

## 4.2 Modelo Geofísico

La visualización tridimensional de la información geofísica cobra gran relevancia al compararla entre sí y con la información geológica y geotérmica. Algunos de los principales estudios geofísicos (Arzate et al., 2018; Corbo-Camargo et al., 2020; Lermo, 2015; Torres-Cuenca, 2017) se cargaron en el software LeapFrog Geo dando como resultado el modelo

Geofísico. A continuación, se presenta el resultado de la visualización 3D de los estudios gravimétricos, magnéticos, magnetelúricos y sísmicos, que más adelante se utilizarán para una interpretación conjunta con el modelo geológico-estructural 3D y los demás datos relevantes.

Los estudios de gravimetría se utilizan durante la exploración geotérmica para definir la variación de densidad lateral relacionada con el cuerpo magmático profundo, que puede representar la fuente de calor (Manzella y Pipan, 2009). Las anomalías de gravedad positivas por lo regular están relacionadas con altas densidades asociadas con intrusiones plutónicas y diques, depositación de silicatos de actividad hidrotermal, mientras que las anomalías de gravedad negativas generalmente están asociadas a valores de densidad bajos causados por altas porosidades o partes muy fracturadas de una roca, o depositación de minerales de alteración producidos por la circulación de agua (Pipan et al., 2010). Arzate y colaboradores (2018) realizaron estudios gravimétricos con el fin de correlacionar las anomalías gravimétricas con la geología y las principales estructuras de la Caldera de Los Humeros, se generó el mapa de la anomalía residual de Bouguer con valores que van desde -11 mGal a +12 mGal, el cual muestra un mínimo gravimétrico radial de -11 mGal (anomalía de color azul) localizado en el centro de la Caldera ([Fig. 11a](#) y [34d](#)). Además, también se incorporaron levantamientos geomagnéticos, los cuales son una herramienta útil en la prospección geotérmica en reservorios volcánicos de alta entalpia dado que una de las propiedades de las rocas es la susceptibilidad magnética. Las rocas volcánicas desmagnetizadas generalmente están asociadas a la existencia de una masa rocosa caliente en la corteza, asimismo las altas susceptibilidades pueden estar asociadas a diques. En sistemas geotérmicos la circulación de fluidos hidrotermales puede provocar la disminución de la susceptibilidad magnéticas en las rocas volcánicas (Pipan et al., 2010). El resultado fue un mapa reducido al polo ([Fig. 34c](#)) el cual resalta una anomalía de alta susceptibilidad magnética en el sector oriental de la Caldera de Los Humeros. Se integraron los dos mapas en el modelo 3D y los mapas se sobrepusieron al DEM de 30 m para poder observar las características estructurales más importantes.

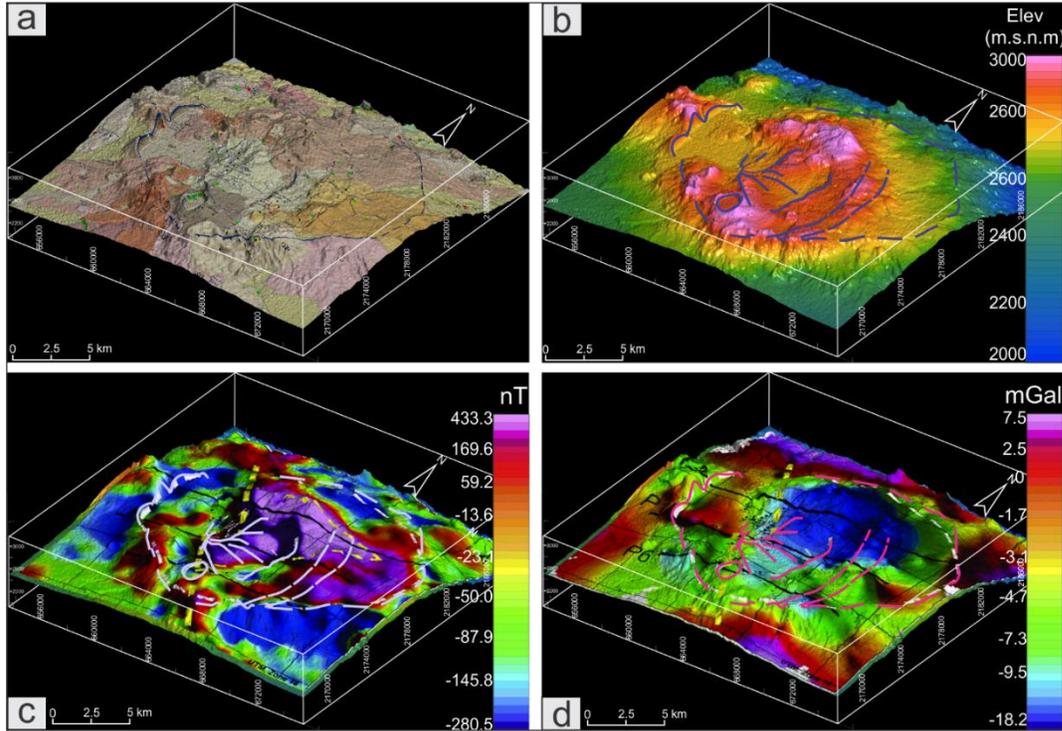


Figura 34. Visualización 3D de mapas geofísicos sobrepuestos en un DEM de La Caldera e Los Humeros. a) Mapa geológico de Los Humeros sobre el DEM (modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017b; leyenda en la [fig. 15](#)). b) Modelo de elevación digital de Los Humeros, con elevaciones de 2000 a 3000 m, las zonas con mayor elevación se localizan en el cráter de Xalapazco, al norte del CGLH y en el este en el escarpe de Los Humeros en Oyameles (las líneas de color azul indican las principales estructuras de geológicas). c) Mapa reducido a polos sobre el DEM de Los Humeros, presentan anomalías de -280 a 433.3 nT (líneas de color blanco indican las principales estructuras geológicas). d) Anomalía de residual de Bouguer sobrepuesto en el DEM de Los Humeros, las anomalías magnéticas van desde -18.2 a 7.5 mGal, presentando una anomalía negativa de forma radial norte de la CLH (líneas rosas indican las principales estructuras de Los Humeros. Mapas geofísicos modificado de Arzate et al. (2018). Escala vertical x4.

Además, se integraron en el modelo 6 perfiles magnetoteléuricos realizados por Arzate et al. (2018) y Corbo-Camargo et al. (2020) a partir de 83 sondeos magnetoteléuricos ([Fig. 10 y 35](#)). El método magnetoteléurico (MT), es una técnica geofísica de fuente natural, que mide variaciones en el campo electromagnético natural de la Tierra producidos por la ionosfera terrestre causados principalmente por el sol que caracteriza la resistividad eléctrica del subsuelo (Vozoff, 1991). La resistividad de las rocas varía de acuerdo con el tipo de roca juntamente con la saturación de agua y salinidad de esta, distribución de poros, temperatura y el grado de mineralización (Spichak et al., 2007). Una de las características de la resistividad eléctrica de sistemas geotérmicos volcánicos es la respuesta de resistividades muy bajas asociadas a una capa de minerales arcillosos de alteración que recubren un

yacimiento geotérmico (Cumming, 2009; Pellerin et al., 1996). Por otra parte, el aumento de resistividades en sistemas geotérmicos se ha asociado a minerales de alteración hidrotermal (alteración propilítica) producto del aumento de la temperatura (Árnason et al., 2010a). Se cargaron en el modelo 3D los 6 perfiles MT (Fig. 35), en el cual se puede observar mejor las interpretaciones de las resistividades mencionadas por Arzate et al. (2018) y Corbo-Camargo et al. (2020). La resistividad de los perfiles muestra una zona de baja resistividad (9 a 15 ohm-m) a la cual asocian a minerales arcillosos (esmectita), generalmente conocida como roca sello. Por otra parte, por el arreglo de las resistividades se pudo proyectar en el subsuelo las principales estructuras geológicas (escarpe de Los Humeros, Potrereros, Falla Humeros, Maxtaloya) además de que se infirieron otras fallas que no tienen evidencia en la superficie.

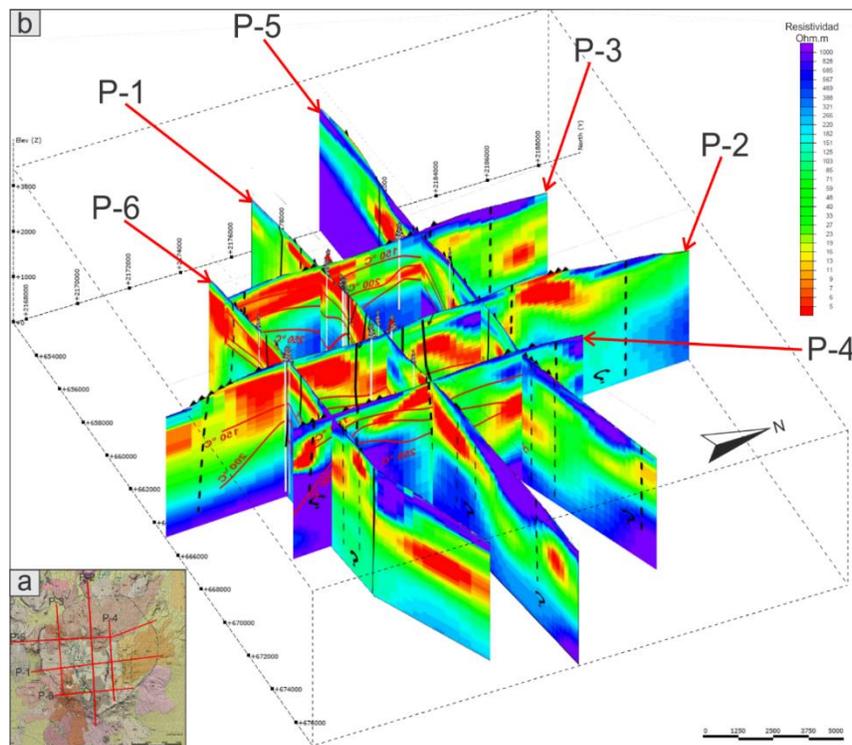


Figura 35. Visualización 3D de perfiles Magnetotéluricos realizados en La Caldera de Los Humeros (modificado de Corbo-Camargo et al., 2020). A) Mapa geológico de Los Humeros (modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017b; leyenda en la fig. 15) con las trazas de los perfiles MT's. B) Visualización en 3D de Los perfiles MTs, se observa resistividades bajas (5 a 8 ohm-m; color rojo) muy someras principalmente en el cruce del P-6 con P-2, P-1 con P-3 y P-4, en los pozos cercanos (H-5 y H-10 en el cruce P-1 con P-3; y H-50 en el cruce P-6 con P-2) presentan hematita en el registro petrográfico en profundidades someras (10 a 400 m), esta mineralogía pudiera estar relacionada al ascenso de fluido hidrotermal. De igual manera se observa 6 cuerpos resistivos (>300 Ohm.m) a profundidades de ~1 y 2 km, de los principales cuerpos son los que se localizan en el cruce del P-1 con P-3 y P-4, principalmente el que se localiza con el cruce P-1 y P-3, la cual hay pozos geotérmicos cerca, los cuales a esa profundidad tienen registros de mineralogía asociada a alteración propilítica y temperaturas mayores a >250°C. Escala vertical x4.

Por otra parte, también se han utilizado métodos sísmicos en la exploración geotérmica particularmente son empleados para definir la configuración estructural, además de forma directa en la caracterización del reservorio ya que los parámetros de propagación elástica y frecuencia de onda se puede correlacionar con la litología, fracturamiento, temperatura, presión y saturación. En la sísmica pasiva, los microsismos están frecuentemente relacionados con los principales sistemas de convención hidrotermal, porque están ubicados en zonas sísmicas activas y porque la circulación de fluidos mejora la fractura por cizallamiento. La ubicación precisa de estos sismos puede proporcionar datos útiles para localizar fallas activas y zonas de fractura que puedan canalizar agua caliente hacia la superficie (Mazotti et al., 2002).

Se integraron en el modelo tridimensional los trabajos de actividad sísmica principalmente el de Lermo (2015) y Torres-Cuenca (2017). El resultado de la integración de estos datos en el modelo 3D fue el siguiente: se integró los 250 sismos registrados desde 1994 al 2016, a los cuales se les asignó un color de acuerdo a su registro por intervalos de años para observar cómo va cambiando de zona la sismicidad a través del tiempo (Fig. 36). Se observan principalmente dos zonas importante de concentración de la sismicidad, una localizada al norte del campo geotérmico entre las fallas La cuesta y la falla Humeros donde se concentran principalmente sismos registrados de 1999 a 2005 (Fig. 36; esfera color rojo y rosa) y algunos sismos más recientes, la otra zona se localiza entre las fallas Las víboras y Las Papas donde se concentran principalmente sismos del 2006 al 2016 (Fig. 36; esferas color azul y naranja), La sismicidad en la primera zona descrita algunos autores (Lermo (2015) la asocian a la actividad de los pozos inyectores H-38 y H-29, algo que se puede visualizar bien en el modelo es el aumento de profundidad de los hipocentros en los últimos 10 años (Fig. 36b). Se integró al modelo las 4 zonas de atenuación sísmica propuestas por Torres-Cuenca (2015), a partir de un análisis de 90 sismos y sus trayectorias de viaje para obtener las áreas donde la señal sufre alteración (Fig. 36; elipsoides de color verde), además se integraron los mapas de isoamplitudes 0.35, 0.65 y 1.1 Hz, y el mapa de temperatura superficial propuesto por Jiménez-Méndez (Tesis de maestría en proceso) en el cual se puede observar la variación de temperatura en un parte del CGLH la cual va de 0 a 60°C, particularmente se distinguen dos zonas donde la temperatura es mayor a 40°C una esta localizada cerca de la falla Humeros y la otra zona esta al norte de la falla de Los Conejos. Por otra parte la zona de temperaturas

superficiales menores de 40°C se localiza hacia la falla la cuesta, y se puede observar que en esa zona a profundidad se localiza la mayor concentración de sismos.

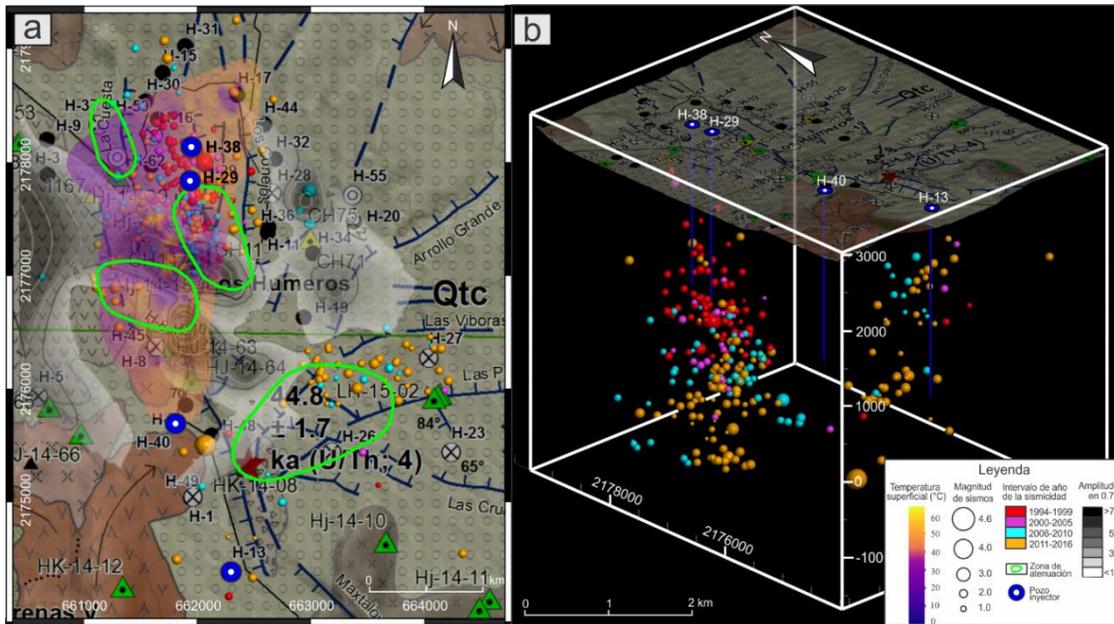


Figura 36. Visualización 3D de estudios sísmicos realizados en el Campo Geotérmico de Los Humeros. a) Corte del mapa geológico de Los Humeros (modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017b) se visualiza la distribución en planta de los sismos registrados del año 1994 al 2016, se puede apreciar una concentración de los sismos registrados en periodo 1994-1999 (esferas color rojas) y del 2000-2005 (esferas color rosa) entre la falla La Cuesta y la Falla Humeros, otra concentración de hipocentros se localiza entre la falla Las Víboras y Las Papas principalmente sismos registrados del 2006-2010 (esferas color azul) y 2011-2016 (esferas color naranja), los dos sismos de mayor magnitud (sismos de magnitud 4.6 y 4.0) se localizan muy cerca de la Falla Humeros y de los pozos inyector H-40 y H-38. Además, se puede observar las zonas de atenuación (elipsoides de color verde) propuestas por Lermo (2015), la distribución de la temperatura superficial y la zona de amplitudes en 0.65 Hz propuestas por Torres-Cuenca (2017). b) Se muestra la ubicación epicentral en el subsuelo de los sismos en 3d. Escala vertical x1.

### 4.3 Modelo Geotérmico

El modelo geotérmico se llevó a cabo mediante datos de registros de pozos realizados en el desarrollo de los pozos, estos registros son: temperatura estabilizada, presión y pérdida de circulación, además se integran datos de monitoreo de vapor y salmuera de los pozos, esta información obtenida es clave porque nos dan información sobre estructuras geológicas y propiedades petrofísica que junto con los datos geológicos y geofísicos ayudan a definir y caracterizar el sistema geotérmico. Estos datos fueron procesados y el resultado fueron los siguientes:

La interpolación 3D de las isotermas se llevó a cabo en el software de modelamiento geológico LeapFrog Geo utilizando la función de interpolación de Base radial (FBR) y los datos de los registros de temperaturas estabilizadas de 52 pozos geotérmicos principalmente las profundidades de las isotermas aumentando cada 50°C, el resultado fue la interpolación 3D de las isotermas a partir de las temperaturas a 150°C, 200°C, 250°C, 300°C y 350°C (Fig. 37). Se identifican tres zonas donde hay un ascenso de profundidad (Fig. 37; secciones A, B, y C) principalmente relacionadas a zonas productoras: la primera se localiza al norte del CGLH desde el pozo H-9 hacia el pozo H-55, se registra la isoterma 350°C y es donde se concentra la producción de vapor (Fig. 37b); la segunda zona está localizada entre los pozos H-7, 48 y H-1 localizados muy cerca de la falla de Los Humeros, esta zona registra anomalías de isotermas de hasta 350°C a una profundidad de 2600 m (Fig. 37c); la tercera zona se localiza al norte del Xalapazco principalmente en los pozos H-12, H-50 y H-39 en donde se puede apreciar una disminución de profundidad de las isotermas 150, 200, 250 y 300°C esta última localizada a una profundidad de 2000 m (Fig. 37d).

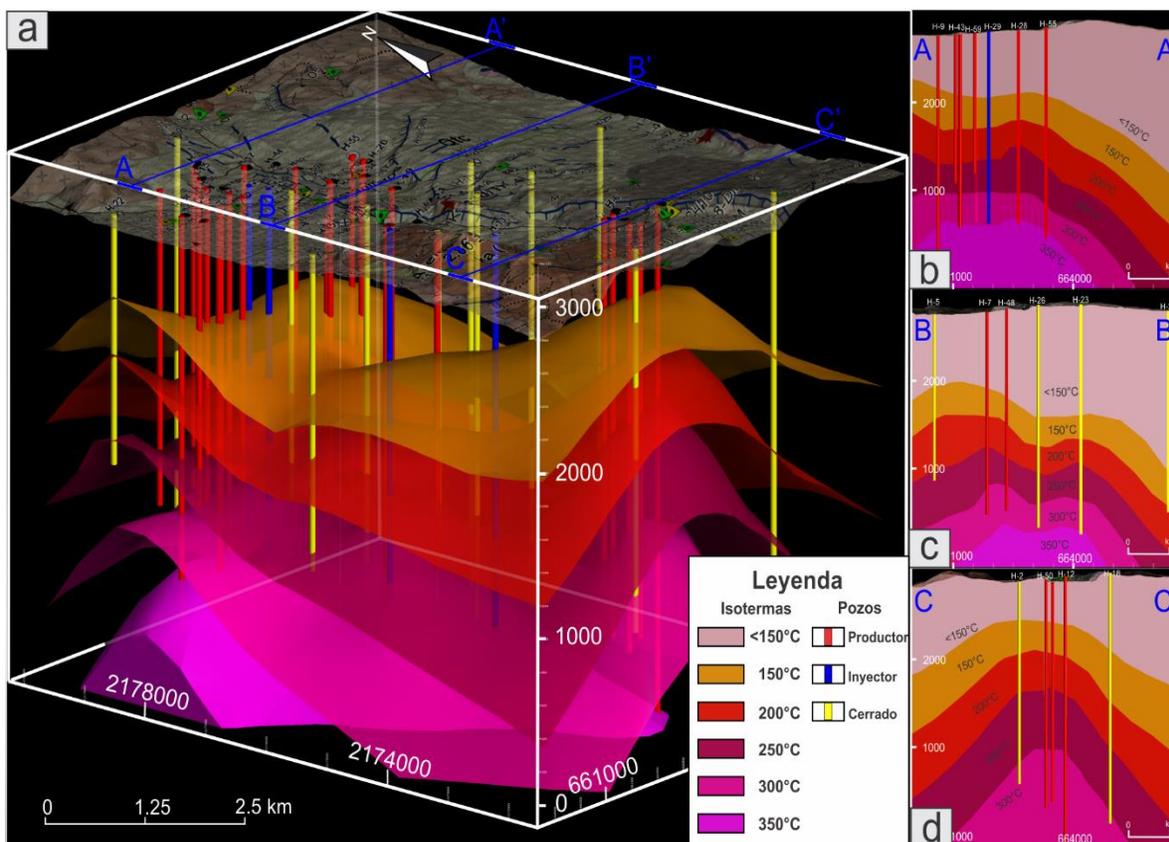


Figura 37. Visualización 3D de isotermas del CGLH. a) Distribución 3D de las isotermas de 150°C, 200°C, 250°C, 300°C y 350°C, se visualiza el mapa geológico de Los Humeros (Leyenda en Fig. 15; modificado de

Carrasco-Núñez et al., 2017b) sobre el DEM con la ubicación y proyección de pozos los cuales están categorizados por su status; productor (rojo), inyector (azul) y cerrado (color amarillo); se puede visualizar que la isoterma 350°C se localiza principalmente al noroeste del CGLH, al norte del Xalapazco se observa como disminuye las isotermas de profundidad. b) Corte vertical en la sección A-A', se observa la distribución de isotermas desde el pozo H-9 al H-55; se visualiza que la mayoría de los pozos son productores y tienen registro de la isoterma de 350°C a excepción del pozo H-28 que es inyector, también se observa que el pozo H-55 un aumento de profundidad de las isotermas. c) Corte vertical en la sección B-B' se visualiza al este el pozo H-5 que está cerrado y solo registrando temperaturas hasta 250°C, hacia el centro del CGLH se localiza los pozos H-7 y H-48 productores y alcanzando isotermas de 300°C separado por la Falla Humeros hacia el este se localizan los pozos H-26 y H-23 pozos con estatus cerrados los cuales registran un aumento de profundidades de las isotermas, y al este del CGLH se visualiza el pozo H-25 el cual solo tiene registro de isotermas de 200°C a una profundidad de 2300 m. d) Corte vertical en la sección C-C' se puede observar una disminución de profundidad de las isotermas registrados en los pozos productores H-50, H-39 y H-12, registrando isotermas de hasta 300°C a una profundidad aproximada de 1800 m, mientras que los pozos a los extremos (H-12 y H-24) registran un aumento de profundidad de las isotermas. Información proporcionada por CFE.

La localización de zonas con posible permeabilidad se llevó a cabo por medio del desarrollo de un modelo numérico el cual integró datos de registros de pozos como pérdida de circulación y presión además de información petrográfica como el fracturamiento, el resultado fue una distribución de zonas con posible permeabilidad 3D (Fig. 38). Se pudo localizar 2 zonas con intervalos grandes de posibles zonas permeables, la primera se ubica al norte del CGLH dada principalmente por los pozos H-43 y H-29 (Fig. 38c). La segunda zona se localiza al norte del Xalapazco (Fig. 38d) configurada principalmente por los pozos H-50 y H-12.

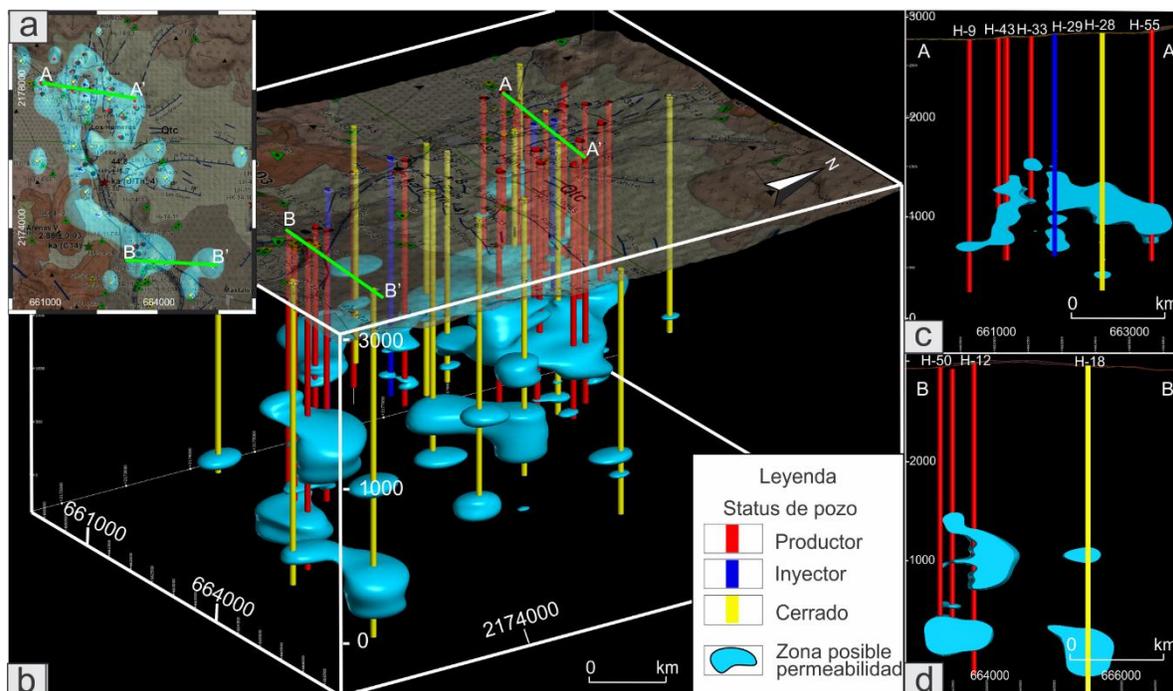


Figura 38. Visualización en 3D de zonas posibles de permeabilidad. a) Mapa geológico de Los Humeros (Leyenda en [Fig. 15](#); modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017b) mostrando la distribución de la interpolación de las zonas con posible permeabilidad. b) Modelo en 3D de la distribución de permeabilidad en el Campo Geotérmico de Los Humeros, se puede visualizar dos principales zonas una ubicada al norte del CG en la sección A-A') y otra localizada al sur del CGLH en la sección B-B', además se puede visualizar los pozos y su estatus. c) Corte vertical en la traza A-A', en el cual se pasa por los siguientes pozos H-9, H-43, H-33, H-29, H-28 y H-55. Información proporcionada por CFE.

Adicionalmente se integraron dos mapas de producción de vapor del CGLH al modelo geotérmico ([Fig. 39](#)), estos mapas son: El mapa de los valores más altos de producción de vapor en pozos: en cual se destacan mayor producción el pozo H-9 (50 T/hr) localizado al noroeste del campo geotérmico, el pozo H-49 localizado en la parte centro-oriental (>60 T/hr), y el pozo H-12 (60 T/hr) localizado al norte del Xalapazco ([Fig. 39a](#)). El mapa de los valores promedio de producción de vapor en pozos: en cual si se compara con el mapa de los valores más altos se visualiza una disminución de producción de vapor en algunos pozos principalmente en el pozo H-49 (25 T/hr), H-9 (45 T/hr) y el H-12 (55T/hr) ([Fig. 39b](#)).

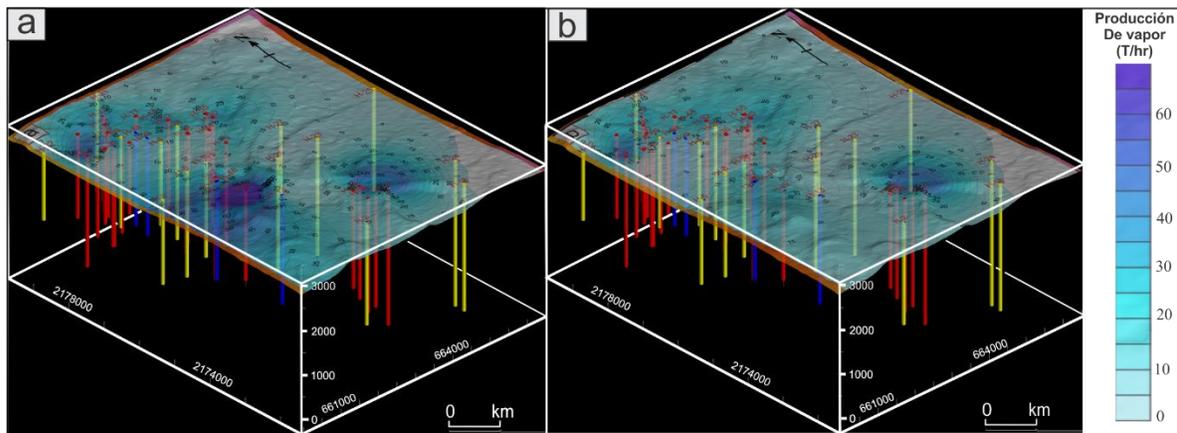


Figura 39. Mapas de producción de vapor. a) Mapa de producción de vapor de valores máximos registrados de los pozos, se puede visualizar 3 zonas, una al noroeste dada por el pozo H-12, otra en la parte centro-oriental dada por el pozo H-49 y presenta el valor máximo de producción registrada con más de 70 T/hr y en el sur por el pozo H-12. b) Mapa de producción de vapor de valores promedios, al norte del CGLH se visualiza una franja de producción dada por los pozos H-9, H-37, H-32, H-20, en la parte centro-oriental se observa otra franja dada por los pozos H-7 y H-49, mientras que al norte del Xalapazco se observa un anomalía de producción de vapor dada principalmente por el pozo H-12. Escala x1. Información proporcionada por CFE.

## Capítulo 5. Discusión

### 5.1 Representación del modelado geológico-estructural en el subsuelo

La configuración del subsuelo se presenta en el subcapítulo 4.1 (Figs. 25 a 33). La geología fue modelada principalmente por datos de pozos y muestras de superficie, sin embargo, fue necesario emplear puntos de control para restringir los contactos entre las unidades y estructuras geológicas claves en el modelo. La confiabilidad del modelo está determinada por la distancia de los datos interpolados, la incertidumbre aumentará cuando los datos de interpolación se localicen a una mayor distancia, por ejemplo, en la [figura 25d](#), para la configuración 3D de la unidad 9 en el pozo H-21, se tiene registro de esta a una profundidad de 2000 m, la incertidumbre de la interpolación va hacer menor en los pozos cercanos en este caso el pozo H-27 en comparación a la configuración del pozo H-21 con los afloramientos del basamento al norte de la caldera que va a tener una mayor incertidumbre dado que hay una mayor distancia configurada sin datos.

#### *Análisis en la configuración de los contactos en la Caldera de Los Humeros*

Una de las principales características de la configuración del grupo pre-caldérico está dado por la unidad 9 que resalta una depresión localizada al centro de la Caldera y está cubierta por las unidades 8 y 7 ([Fig. 25a](#)). Otra particularidad de este grupo es su cima irregular, que se aprecia muy bien en el corte O-E ([Figs. 30c](#) y [31c](#)) en cual se visualiza que la cima aumenta de profundidad al centro de la Caldera, mientras que en el corte S-N se visualiza un aumento de profundidad de manera escalonada hacia el norte del CGLH hasta llegar al pozo H-21 donde empieza a disminuir su profundidad. De acuerdo con Carrasco-Núñez et al. (2015) esta caldera tipo *piecemeal-trapdoor* se formó a través del tiempo debido a los dos eventos principales de la formación de la caldera que dieron al emplazamiento de la ignimbrita Xáltipan y al toba Faby, además de varias erupciones y el régimen de estrés regional; ésta configuración en esta zona al noreste del campo geotérmico dio lugar al emplazamiento de potentes espesores del grupo Caldérico que se compone principalmente de depósitos de flujos piroclásticos y, en menor cantidad, de depósitos de caída y lavas

intermedias. Lo cual se correlaciona con los estudios gravimétricos realizados por Arzate et al. (2018), en donde propone que los valores mínimos de gravedad en el mapa de anomalías de Bouguer ([Figs. 11a y 34d](#)) se correlaciona con el material piroclástico dominante que rellena las estructuras caldéricas.

Para el modelación de fallas, se tomó en cuenta el mapa geológico de Los Humeros (Carrasco-Núñez et al., 2017b; [Fig. 15](#)) y los perfiles MT (Corbo-Camargo et al., 2020; [Fig. 35](#)). También se consideró la paleogeografía de las bases de los grupos caldérico y post-caldérico, observando una cierta correlación en los cambios de pendiente de la cima, los cuales se correlacionaban con algunas anomalías resistivas de los perfiles MTs ([Figs. 33 y 35](#)), permitiendo así trazar las fallas a profundidad, sin embargo las fallas son proyectadas, no modifican el modelo geológico 3D ni la superficie, por lo que no se van a observar desplazamientos marcados en los estratos.

## **5.2 Caracterización e interpretación del sistema geotérmico de Los Humeros**

En esta sección se describen las características más relevantes de los resultados obtenidos, además se indican las correlaciones entre los diferentes estudios, lo que proporciona las bases para una caracterización posterior del sistema geotérmico. Se aborda cada elemento del sistema geotérmico y se analizan las correlaciones de los datos visualizados en el modelo 3D.

### **Roca del reservorio**

La roca del reservorio o roca almacenadora comprende rocas que poseen excelentes condiciones de porosidad y permeabilidad para permitir que los fluidos hidrotermales fluyan libremente a través de ella, tanto como la permeabilidad y la porosidad pueden ser primarias o secundarias o una mezcla de las dos, esto va a depender del tipo de roca y las condiciones de su entorno.

Diversos estudios petrográficos y geoquímicos efectuados en diversos pozos dentro del CGLH así como afloramientos en superficie han permitido definir la roca reservorio,

conformada principalmente por la unidad “7” que se correlaciona con la Andesita “Teziutlán” y la unidad “8” con la Andesita de hornblenda “Alseseca” y “Cerro Grande” (Fig. 41 y 42) (Carrasco-Núñez, 2008; Gutiérrez-Negrín e Izquierdo-Montalvo, 2010; Del Pilar, 2015; Acosta-Azúa, 2016; Gómez-Castellanos, 2016; Carrasco-Núñez et al., 2017a y 2017b; Fernández-Maya, 2017; Peña-Rodríguez, 2018; Jáquez-Domínguez; 2018; Huerta-Luna, 2018; Machorro-Bretón, 2018). Estos estudios están respaldados por los informes presentados por personal de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de registros de pozos donde en los cuales se presentan pérdidas de circulación, presión y disminución de temperatura en los intervalos correspondientes a las unidades 7 y 8.

Cabe mencionar que no todas las zonas permeables inferidas por los registros de pozos coinciden con zonas fracturadas reportadas en estudios petrográficos (Fig. 40), por lo que en este caso la permeabilidad podría atribuirse a un proceso primario como la microporosidad, tal como ha sido propuesto en estudios recientes (Arteaga y Carrasco-Núñez, 2017; Cid et al., 2017; Carrasco-Núñez et al., 2017c). Utilizando la información mencionada, se modelaron diferentes zonas permeables en 3D (Fig. 38), aunque la mayoría de la roca de reservorio se localiza en las unidades antes mencionadas (unidades 7 y 8). También se pueden localizar dos zonas importantes en la producción de vapor que se ubican en rocas del basamento sedimentario en los pozos H-9 y H-12 (Fig. 42) lo que se correlaciona con los estudios realizados por Prol-Ledesma (1998), en el cual, con base en datos isotópicos de carbón y azufre, se propone que en algunas zonas los fluidos hidrotermales interactúan fuertemente con rocas sedimentarias del basamento. Las distribuciones de las zonas permeables no parecen seguir un intervalo de profundidad en estas unidades, por el contrario, se presenta de manera aleatoria; esto debido a que presentan variaciones texturales, con diversos grados de vesicularidad, fracturamiento y contenido de minerales de alteración, lo cual coincide con lo descrito anteriormente por Gutiérrez-Negrín e Izquierdo-Montalvo (2010), quienes plantean que el reservorio está sujeto a una serie de procesos recurrentes de autosellamiento e hidrofracturamiento provocado por el movimiento de fluidos.

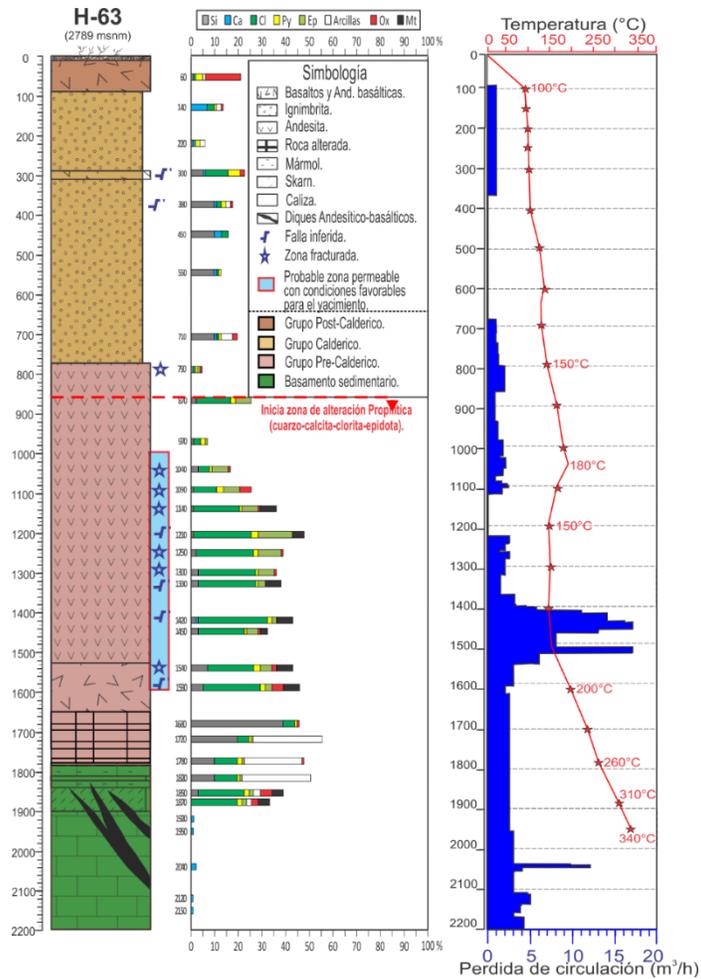


Figura 40. Correlación de petrografía del pozo H-63 con el registro de temperatura y la pérdida de circulación. Columna petrográfica del pozo H-63 (Izquierda) con su porcentaje de minerales de alteración hidrotermal; a la derecha encuentra el registro de temperatura y pérdida de circulación. Se puede observar una disminución de la temperatura a una profundidad de 1100 m de profundidad, la cual se correlaciona con una zona de roca fracturada reportada en la petrografía y un aumento en minerales de alteración hidrotermal. A la profundidad de 1430 se reporta una zona de falla en la descripción petrográfica la cual coincide con intervalos de pérdida de circulación-. Columna tomada y modificada de Machorro (2018).

Es importante mencionar la posible relación entre zonas con grandes intervalos de permeabilidad con las zonas de atenuación sísmica reportadas por Torres-Cuenca (2017) y Lermo et al. (reporte inédito CeMieGeo; 2018) (Fig. 41 y 42). Esta correlación concuerda con lo descrito por estos autores que asocian las zonas anómalas de baja amplitud con posibles zonas de alta temperatura, porosas, fracturadas o alteradas. Además, se puede visualizar la posible asociación de la permeabilidad con las fallas, esto es importante porque las altas tasas de producción de proyectos geotérmicos a nivel mundial se relacionan usualmente a zonas de fallas activas (Caine et al., 1996). Las fallas pueden ser rutas de migración de fluidos, particularmente en las llamadas “zonas dañadas”, en tanto que al centro de esta tienden a ser impermeables.

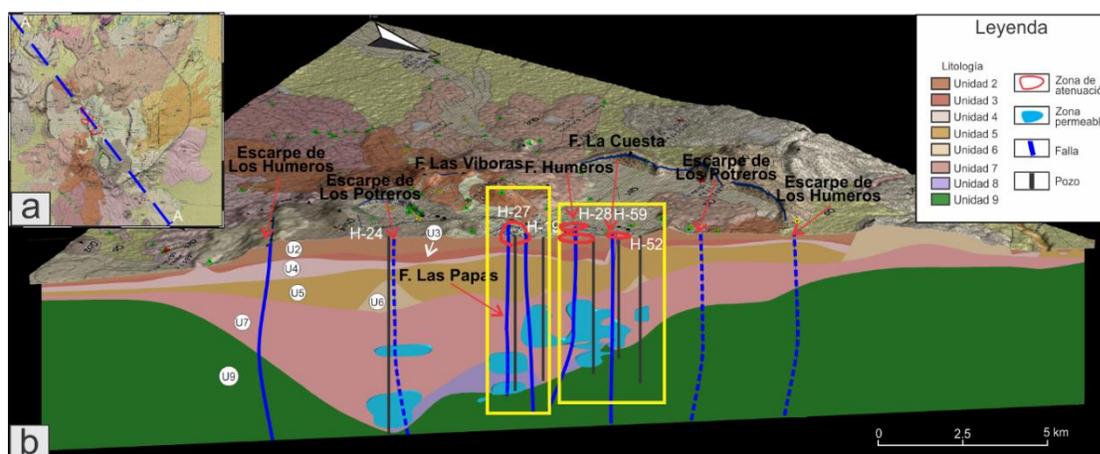


Figura 41. Correlación de zonas de atenuación con zonas permeables y fallas. a) Mapa geológico de Los Humeros (Leyenda en Fig. 15; modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017b) mostrando la dirección de la traza A-A' (SE-NW). B) Corte transversal del modelo geológico 3D en la traza A-A' mostrando las principales fallas, algunos pozos (H-24, H-27, H-19, H-28, H-59 y H-52), las zonas permeables (zonas azules) y las zonas de atenuación sísmica (elipses rojas; Torres-Cuenca, 2017; Lermo et al., 2018, reporte inédito CeMIEGeo). Los rectángulos de color amarillo muestran la correlación entre las fallas, zonas permeables y zonas de atenuación. Escala vertical x2.

En la figura 42. b se puede observar una correlación de la sismicidad con el pozo inyector H-38, y su relación con la zona de atenuación sísmica con intervalos permeables en el pozo H-16. En la figura. 42. c se visualiza la correlación entre algunas estructuras geológicas (Falla Los Humeros, Las Víboras y Las Papas; líneas continuas de color azul) con las zonas permeables y las isotermas, se puede apreciar que hacia el centro del perfil muy cerca de la falla Las Víboras disminuye las isotermas y hay un aumento de zonas permeables además que coincide con la zona de atenuación sísmica y sismicidad, los pozos productores que se encuentran en esta sección (H-40 y H-7) tiene isotermas de hasta 300°C en

comparación con el H-5 que no alcanza esas temperaturas. En la figura 42. d se aprecia las siguientes correlaciones: se observa un aumento de zonas permeables y temperaturas en los pozos H-50 y H-12 que son pozos productores, mientras que en el pozo H-24 hay una disminución de la temperatura y tiene intervalos con poco espesor de zonas permeables.

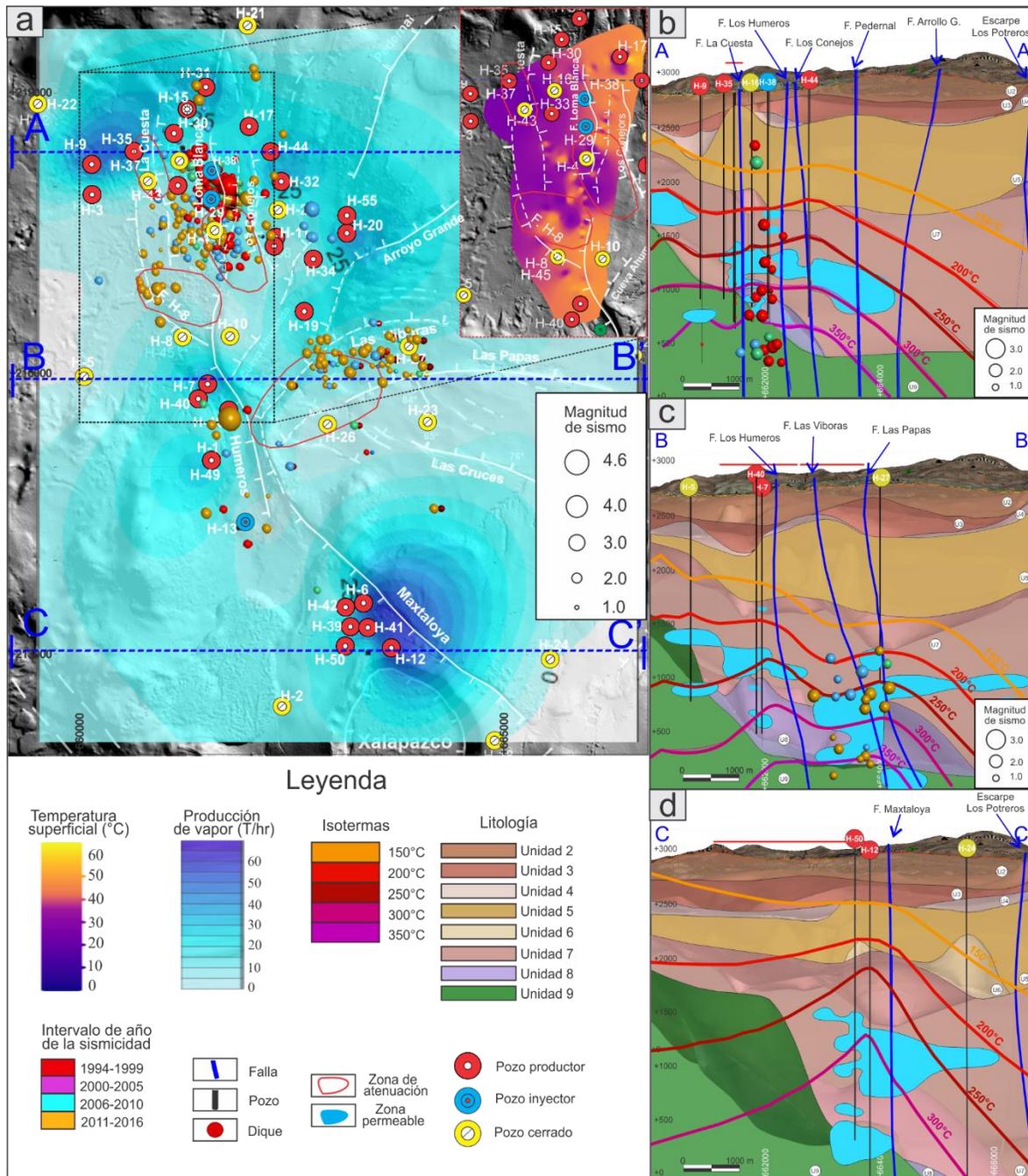


Figura 42. Correlación de parámetros en el modelo resultante 3D. a) Vista en planta del DEM del CGLH con sobreposición del mapa de producción de vapor con la localización de los pozos geotérmico y las principales estructuras geológicas, además de las zonas de atenuación sísmica (óvalos de color rojo) y la distribución en la

superficie de sismos (Torres, 2017; Lermo et al., 2018, reporte inédito CeMIEGeo); además de las ubicaciones de las trazas A, B y C (línea punteada de color azul), también se observa un acercamiento a la zona norte del campo geotérmico en donde se puede apreciar el mapa de la temperatura de superficie (Jiménez, MSc en proceso). b) Corte en el modelo geológico y acercamiento de la traza A-A'; se observan algunos pozos (línea vertical color negra) así como isotermas, sismos, zonas permeables y fallas. c) Corte en el modelo geológico y acercamiento en la sección B-B' con los demás parámetros antes mencionados. d) Corte en el modelo geológico y acercamiento en la traza C-C' con los demás parámetros antes mencionados. Escala vertical x2.

## **Roca Sello**

La capa sello es un componente fundamental del sistema geotérmico, está integrada por una roca de muy baja o nula permeabilidad. En el modelo geotérmico convencional de Los Hornos propuesto por Cedillo (2000) se designa a la ignimbrita Xáltipan como la roca sello del sistema geotérmico. La cual ha sido caracterizada principalmente a partir de las descripciones de pozos reportando diferentes espesores, así como variados grados de consolidación y soldamiento en diferentes niveles estratigráficos (Acosta-Azúa, 2015; Carrasco-Núñez et al., 2017b; Fernández-Maya, 2017; Huerta-Luna, 2018; Jáquez-Domínguez, 2018; Peña-Rodríguez, 2018).

Estudios recientes sobre la arquitectura de la ignimbrita Xáltipan (Cavazos-Álvarez y Carrasco-Núñez, 2019) exponen variaciones importantes del soldamiento de la misma, controlados por el emplazamiento en la paleogeografía. Estas variaciones de soldamiento afectan su permeabilidad, siendo más permeables en zonas donde la ignimbrita tiene un espesor reducido, y altamente impermeable en zonas de mayor espesor. Estas variaciones de permeabilidad se ven reflejadas en el flujo de calor ([Fig. 42](#); b, c y d), en algunas zonas donde aumenta las zonas permeables la isoterma de 150°C se presenta cerca del contacto de la base de la ignimbrita Xáltipan ([Figs. 42c](#) y [43a](#)), mientras que en otras ocasiones se registra en diferentes intervalos de profundidad dentro de la ignimbrita Xáltipan y las demás unidades del grupo Caldérico ([Fig. 42](#); b y d). Algunos autores (Caldewell et al., 1986; Essen y Peacor, 1995) han expuesto que la interacción de la capa sello con los fluidos hidrotermales produce una capa de alteración arcillosa sobre un rango de temperaturas de 150°C a 300°C, la cual está relacionada a bajas resistividades (<10 Ohm.m). La base de la unidad 5 (ignimbrita Xáltipan) presenta una correlación parcial con estas anomalías de baja resistividades (5 a 10 Ohm.m) relacionadas a la capa sello. De igual manera, una correlación importante de mencionar es la poca de pérdida de circulación o presión registrada en pozos (reportes

internos de CFE) en intervalos de profundidades que se correlacionan con unidades del grupo Caldérico; esto se puede observar en la ausencia de la distribución de las zonas permeables en la ignimbrita Xáltipan ([Figs. 42 y 43](#)).

En la figura 43.a se aprecia la relación entre el aumento de resistividades y aumento de las temperaturas, esto se puede identificar en la anomalía de alta resistividad ( $>200$  Ohm.m) localizada a la izquierda del perfil 1 entre la falla Mal País y la Falla Humeros, en donde los pozos H-40, H-7 y H-10 alcanzan temperaturas de hasta  $300^{\circ}\text{C}$ . Además de la presencia de minerales de alteración propilítica (clorita, epidota, piritita; Peña-Rodríguez, 2017) a profundidades de 1400 m. Esto se puede asociar que las anomalías de altas resistividades ( $>200$  Ohm.m) son el resultado de cuerpos propilíticos generalmente formado por el ascenso de fluido hidrotermal, coincide con el modelo conceptual propuesto por Corbo-Camargo et al. (2020). También se visualiza una correlación semi-parcial de la base de la unidad 5 (Ignimbrita Xáltipan) con anomalías de baja resistividades (5 a 10 Ohm.m) relacionadas a la capa sello. Esto se observa principalmente en los pozos H-5, H-27 y H-25. De igual manera que se nota la ausencia de zonas permeables lo que evidencia lo propuesto por Cedillo (2000) a la ignimbrita Xáltipan como la roca sello del sistema geotérmico. Estudios recientes Cavazos-Álvarez et al. (2020) propone varias litofacies, principalmente la litofacie basal la cual se caracteriza con alto grado de soldamiento y pobre permeabilidad.

En el perfil 2 de la figura 43.b, se observa cierta relación entre la isoterma de  $150^{\circ}\text{C}$  con anomalías de baja resistividad (5 a 10 Ohm.m). Sin embargo, en este perfil estas propiedades tienen una correlación imparcial con la base de la ignimbrita Xáltipan. Además, se puede distinguir que algunas estructuras geológicas (F. Maxtaloya, F. Arrollo Grande, F. Los Potreros; línea punteada color azul) pudieran estar controlando el ascenso de flujo hidrotermal y producir zonas propilíticas que se ven reflejadas en anomalías de alta resistividades ( $>200$  Ohm.m).

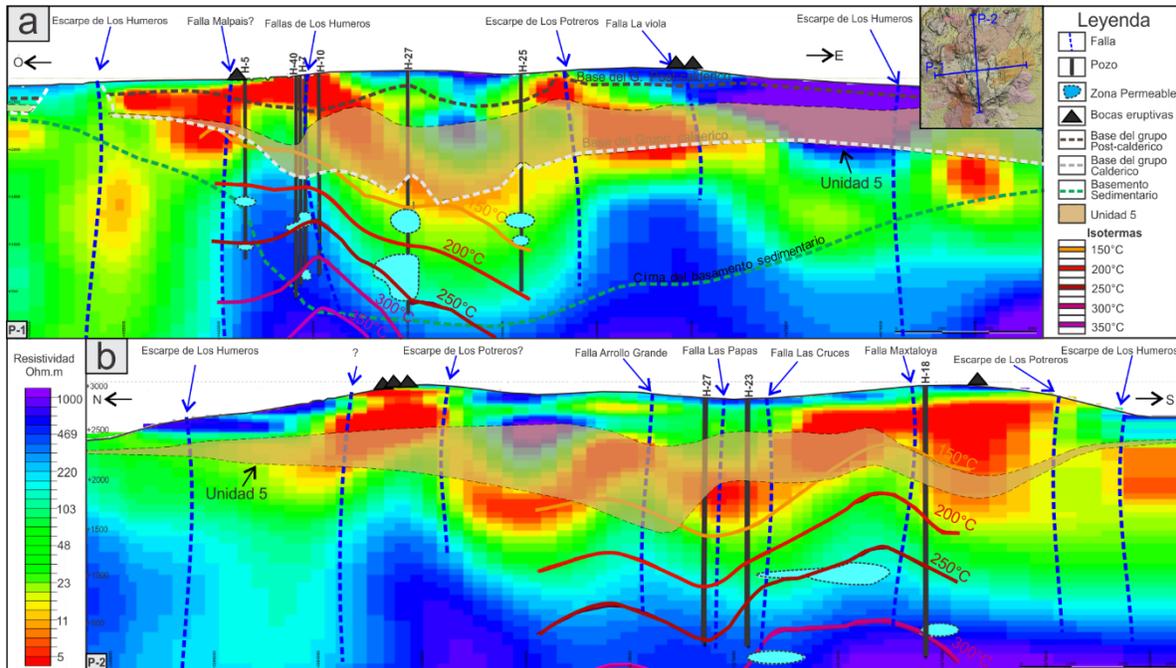


Figura 43. Correlación de isotermas, resistividades y estructuras geológicas en la CLH. a) Perfil 1 magnetotelúrico el cual se puede visualizar los pozos que pasan en el corte, así como las isotermas en el campo geotérmico, los contactos de los grupos caldericos y la unidad 5 además de la proyección de las principales estructuras geológicas. b) Perfil 2 MT, perfil orientado norte a sur, donde se puede visualizar el perfil con los demás parámetros antes mencionados. Escala vertical x2.

## Fuente de calor

Diversos autores han propuesto una gran cámara magmática como el origen de la fuente de calor del yacimiento geotérmico de Los Humeros. Verma (1985; 1997) fue uno de los primeros en proponer que la fuente de calor es una cámara magmática somera estratificada, la cual alimenta el sistema geotérmico a través de dos principales conductos, esta hipótesis se mantuvo en actualizaciones del modelo conceptual posteriores (Viggiano y Robles, 1988; Arellano et al., 1999, 2000, 2003; Cedillo, 2000), hasta que Gutiérrez-Negrín e Izquierdo-Montalvo (2010) proponen varias zonas de alimentación del sistema geotérmico. Posteriormente, Creón et al. (2018), basados en investigaciones de inclusiones fluidas en silicatos (*Silicate melt inclusions: SMI*) proponen la existencia de varios reservorios magmáticos alojados a diferentes niveles someros de la corteza, dentro de un rango entre 5 y 13 km; estos datos concuerdan con el modelo termal propuesto por Verma (1985; 1997) y los resultados de geobarometría (Ferriz y Mahood, 1987), los cuales localizan una cámara magmática entre 4 y 10 km de profundidad. Estudios recientes de termobarometría realizados

por Lucci et al. (2020) proponen, en contraste, un complejo sistema de pequeños conductos (“tuberías”) magmáticas alojados por debajo de La Caldera de Los Humeros y que alimenta el vulcanismo post-caldérico de Los Humeros ([Fig. 43](#)).

En el modelo resultante se observa un aumento en las isothermas en pozos que están cerca algunas estructuras geológicas ([Figs. 42](#) y [43](#); Falla Maxtaloya, Los Humeros, La Cuesta, Los Conejos, Pedernal y Arrollo G.). Además, en la comparación de las isothermas con los perfiles magnetelúricos ([Fig. 43](#)), se visualiza una correlación del aumento resistividades (>200 Ohm.m) con el aumento de la temperatura (200°C, 250°C, 300°C y 350°C) y la presencia de minerales de alteración propilítica (clorita, epidota, piritita). Esto se relaciona con lo expuesto por diversos autores (White and Hedenquist, 1990; Gunderson et al., 2000) donde consideran que la mineralogía predominante dentro del reservorio se relaciona con el incremento de temperatura que caracteriza la transición de alteración de sub-propilítica a propilítica lo que resulta en un aumento de resistividad, lo cual coincide con los cuerpos propilíticos propuestos por Corbo-Camargo et al. (2020).

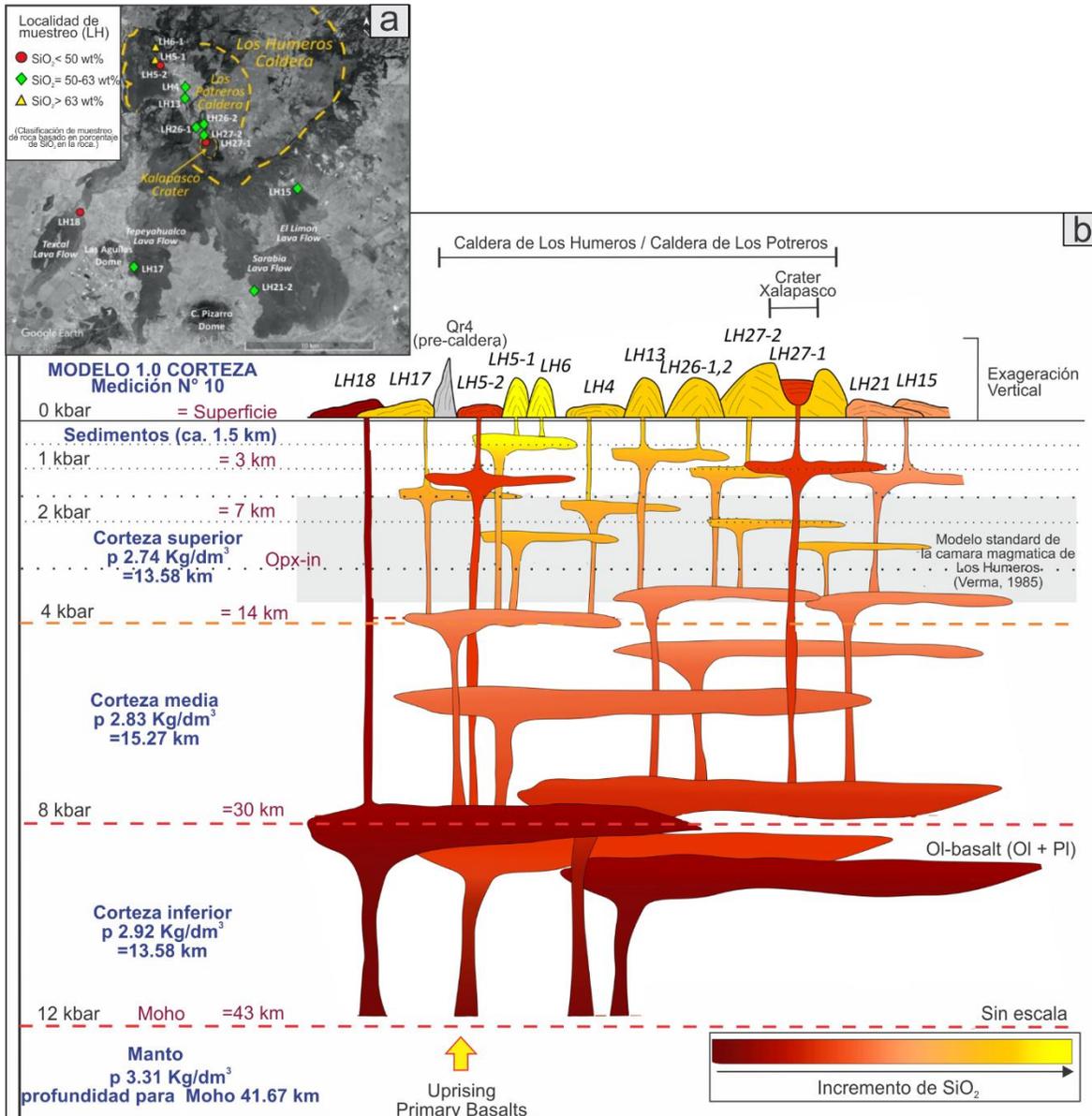


Figura 44. Representación esquemática del sistema de “plomaría”(plumbing) magmática que alimenta la actividad post-caldérica de Los Hornos, derivada de las estimaciones de presión-temperatura obtenidas de modelos de termobarometría mineral-líquido. (a) Imagen satelital del CVLH (Imagen Landsat de Google Earth Pro, 2018, Digital Globe; cortesía de Google) con localización de muestras seleccionadas para la aplicación de los modelos de termobarometría. b) El modelo conceptual se integra con la estructura cortical del área de estudio según se deriva de la medida No. 10 del Modelo global Crust 1.0 (Davies, 2013). El campo sombreado en gris indica la profundidad y el grosor del modelo conceptual clásico propuesto por Verma (1985a, b) de una única cámara magmática. Modificada de Lucci et al. (2020).

### 5.3 Modelo conceptual geotérmico

A partir de la caracterización e interpretación del sistema geotérmico de Los Humeros se propone el siguiente modelo conceptual:

Se ha identificado que la roca reservorio se localiza principalmente en dos unidades del grupo pre-caldérico que corresponden a la unidad “7” y la unidad “8” ([Fig. 45](#); u7 y u8; zonas de color azul claro). No obstante hay evidencias de algunos pozos (H-12 y H-9) con alta producción de vapor ([Figs. 19, 39, 42a, 46](#); >50 t/hr) el reservorio se localiza en el basamento sedimentario ([Fig. 45](#); u9).

De acuerdo con la evidencia petrográfica de fracturamiento principalmente en las unidades 7 y 8, y registros geofísicos de pozo, la permeabilidad del reservorio pudiera ser secundaria controlada principalmente por estructuras geológicas. Aunque estudios recientes de microtomografía proponen que la microporosidad primaria tiene un papel importante en la migración de los fluidos en el sistema geotérmico (Arteaga y Carrasco-Núñez, 2017; Cid, 2017; Carrasco-Núñez et al., 2017c). Por lo que la permeabilidad del reservorio pudiera ser una combinación de ambas permeabilidades (primarias y secundarias).

La roca sello, por su parte, es un componente importante en cualquier sistema geotérmico porque impide el ascenso a la superficie de fluidos geotérmicos. Cedillo (2000) propone un paquete piroclástico como un horizonte homogéneo semiconfinante correlacionable con la Ignimbrita Xáltipan, que actúa como un acuitardo continuo en el sistema geotérmico. Conforme a las interpretaciones en este trabajo, de igual manera se propone que la roca sello la conforma principalmente la ignimbrita Xáltipan que se agrupa en la unidad 5 ([Fig. 42](#): b, c y d; y [Fig. 45](#)). Sin embargo, la ignimbrita Xáltipan como roca sello presenta una efectividad variada debido a diferentes grados de consolidación (litofacies), que afecta sus propiedades de porosidad, permeabilidad y grado de alteración (Cavazos-Álvarez y Carrasco-Núñez et al., 2020b; Fernández-Maya, 2017; Jáquez-Domínguez, 2018; Machorro-Bretón, 2018). Estudios de resistividad ([Fig. 43](#)), relacionan a la ignimbrita Xáltipan parcialmente con bajas resistividades (<10 Ohm.m) asociadas a posibles zonas de alteración argílica (ilita-esmectita), que probablemente corresponden a la roca sello (Corbo-Camargo et al., 2020). Esto no se manifiesta en todos los perfiles

magnetelúricos en donde se localiza una continuidad lateral de las resistividades con la ignimbrita Xáltipan. Posiblemente se deba por que la distribución del espesor es muy irregular.

Otro componente importante es la fuente de calor de larga duración, que permita suministrar temperatura suficiente para calentar fluidos. Estudios recientes proponen la existencia de un sistema de varios reservorios magmáticos alojados a diferentes niveles someros de la corteza, dentro de un rango entre 5 y 13 km (Creón et al., 2018) o aún más complejo con niveles de alimentación más someros y profundos (Lucci et al., 2020), contrariamente a lo que se había considerado en los modelos previos de una sola cámara magmática. En el trabajo, no se alcanzan esas profundidades por lo cual no se modelaron las cámaras magmáticas, sin embargo, se modelan las isotermas, lo que permite ubicar zonas importantes en el ascenso del flujo de calor que alimentan el sistema geotérmico. Se observan 3 zonas principales donde hay un aumento considerable de la temperatura a profundidad: la primera ubicada al norte del Xalapazco principalmente en el pozo H-12, la segunda ubicada en el pozo H-7, y la tercera zona en el pozo H-9 al pozo H-55, considerando que el ascenso de flujo de calor se puede asociar principalmente a las estructuras que se localizan cerca de estas zonas ( [Figs. 37; 42; 45](#)).

En lo que respecta a la recarga del acuífero, no es completamente claro como ocurre ese proceso con los datos existentes. No obstante, tomando en cuenta ciertas consideraciones como la posición y estructura del basamento calcáreo que aflora en el sector occidental fuera de la caldera de los Humeros (Fitz et al., 2017) y los patrones estructurales identificados recientemente (Norini et al., 2019). Se podría considerar que existe una contribución importante de agua externa derivada principalmente de la precipitación al W-NW de la caldera, donde se localizan afloramientos del basamento sedimentarios que permiten una alta infiltración hacia el sistema geotérmico. Esta hipótesis ha sido reforzada por algunos datos isotópicos (reporte interno GEMEX, 2019), aunque hay que considerar que también existe una recarga al interior de la caldera a través de algunas fallas, y además de que los pozos inyectoros juegan un papel importante en la recarga del acuífero.

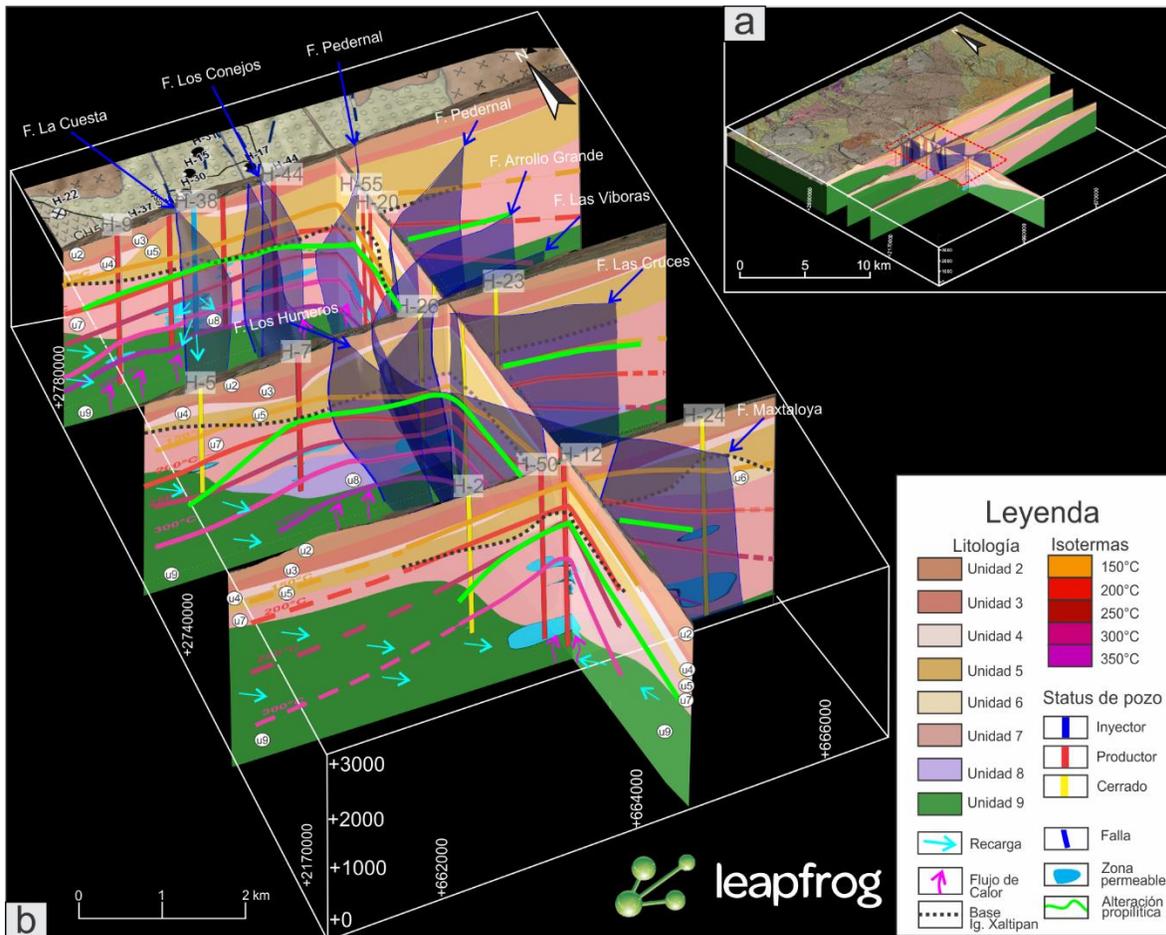


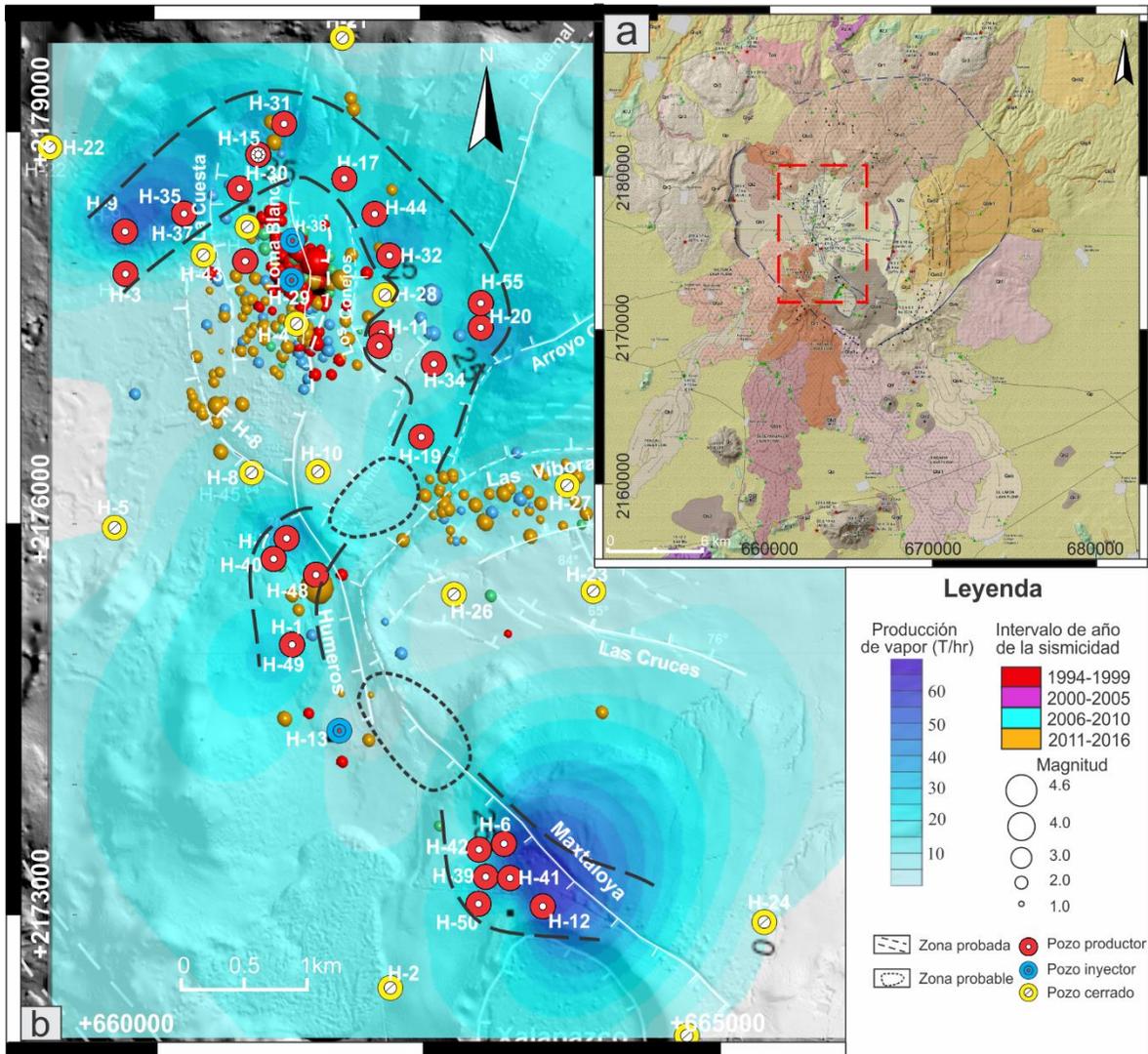
Figura 45. Modelo geotérmico 3D de Los Hornos. a) Modelo tridimensional de la Caldera de Los Hornos indicando la localización del campo geotérmico (rectángulo de color rojo). b) Modelo conceptual geotérmico de Los Hornos mostrando tres principales secciones (A, B y C) en las cuales se pueden visualizar las unidades geológicas, el principal sistema de fallas en 3D, la distribución de isotermas (datos inferidos líneas punteadas), la localización de zonas permeables, así como la capa de alteración propilitica, zonas de ascenso de flujo de calor, zonas de recarga, y la distribución de la base de la ignimbrita Xáltipan que de acuerdo con Cavazos-Álvarez y Carrasco-Núñez (2020b) se considera como la roca sello parcialmente. Escala vertical x1.5.

## 5.4 Evaluación de zonas con posible potencial geotérmico

A continuación, se presenta un análisis a detalle de algunas correlaciones del modelo tridimensional resultado de este trabajo, con el fin de proponer nuevas zonas de prospección que ayuden a la mejora de producción de vapor en el CGLH.

Una de las correlaciones de suma importancia fue la relación que existe en el Campo Geotérmico de Los Hornos entre la producción de vapor y la sismicidad. En zonas donde

se concentran la sismicidad los pozos cercanos a esa área suelen no tener una buena producción de vapor para ser considerados rentables y se encuentran cerrados, son dos zonas en donde se observa esta correlación, una localizada entre la falla H-8 hacia la falla Los Conejos y la otra zona entre las fallas Las Cruces y Las Víboras ([Fig. 46b](#)). En la primera, la baja producción de vapor observada pudiera posiblemente estar ocasionada a los dos pozos inyectoros (H-29 y H-38; círculos azules) que se localizan en esa zona; mientras que en la segunda zona presentan sismos recientes (2006 a 2016) y se visualiza un aumento de profundidad de las isotermas ([Figs., 42c y 43](#)), posiblemente debido a eso no haya condiciones adecuadas para una mayor producción de vapor. Delimitando estas zonas se localizan 3 franjas con buen nivel de producción de vapor ([Fig. 46](#)), además de que coinciden con un aumento en profundidad de temperatura ([Fig. 37](#)) y con amplios intervalos de zonas permeables ([Figs. 38; 41; 42](#)). La primera franja se localiza al norte del CGLH conformando un arco que rodea de manera parcial a la parte central del campo geotérmico, la cual va desde el pozo H-3 al H-31, en dirección general NE, y de ahí al H-20, siguiendo una orientación hacia el SE, en donde se dirige hacia el SW, hacia el pozo H-19. La segunda es una franja corta que va del pozo H-7 hacia el H-49, mientras que la tercera franja se ubica en el sector sur del campo, del pozo H-41 al H-12. Se observa que entre dichas franjas existen interrupciones con huecos en donde no se han realizado perforaciones de pozos geotérmicos, ni siquiera de tipo exploratorio. Realizando una extrapolación de las condiciones geotérmicas favorables para las franjas 1 y 2, se puede proponer que entre ellas pudieran presentarse igualmente condiciones favorables, además de tomar en cuenta que en esa zona (ver trazo punteado en [fig. 46](#)) se observa la continuidad de algunas estructuras cuyo fracturamiento asociado pudieran funcionar como líneas de conducción del fluido geotérmico (observando poca actividad sísmica), y por tanto, interesante para explorar en mayor detalle desde el punto de vista geotérmico. No se descarta la posibilidad de una segunda zona ubicada entre las franjas 2 y 3, que también pudiera ser interesante de explorar, considerando la continuidad estructural del sistema Maxtaloya ([Fig. 46](#)).



## Capítulo 6. Conclusiones

El modelo 3D presentado en este estudio brinda una imagen amplia de la geología y del sistema geotérmico de La Caldera de Los Humeros. La integración y visualización espacial de los datos es de suma importancia para realizar correlaciones que permitan realizar un análisis detallado sobre los parámetros y condiciones que intervienen en la conformación del modelo geotérmico-magmático conceptual de la Caldera de Los Humeros. Este es un trabajo que se puede actualizar fácilmente conforme vayan saliendo nuevos datos de La Caldera de Los Humeros, y así la geología y el sistema geotérmico estarán en constante actualización, para a la hora de tomar decisiones para futuras acciones de prospección geotérmica.

Para el desarrollo del modelo 3D, se empleó una metodología muy particular que involucró la recopilación y análisis exhaustivo de la mayor cantidad de datos disponibles de los estudios previos (geología, geofísica y geotermia), los cuales se estandarizaron los formatos para dar paso a la creación de las bases de datos, que alimentaron los diversos mapas y gráficos tridimensionales generados. Uno de los logros más importantes de esta tesis fue la obtención de un modelo 3D que permite visualizar la configuración de la geología del subsuelo, a partir de la información de 53 registros litológicos de pozos geotérmicos, considerando 9 unidades litológica, según la propuesta de Carrasco-Núñez et al. (2017b), además en algunos pozos que contaban con descripción petrográficas más detalladas que se utilizaron para la creación de archivos de fracturamiento y la zona de alteración propilítica. Este modelo fue el integrador de toda la información geofísica (mapas de anomalías de Bouguer, anomalías magnéticas, perfiles magnetotéluricos, sismicidad, y zonas de atenuación sísmicas), y geotérmica (registros de pozos geofísicos, permeabilidad, temperatura, producción de vapor).

En lo que respecta al desarrollo del modelo geotérmico tridimensional de La Caldera de Los Humeros (mediante el uso de una licencia académica del Software de LeapFrog Geo), se hicieron comparaciones de los diferentes parámetros analizados, permitiendo analizar posibles patrones de correlación e interpretación de los diferentes elementos geológicos, geofísicos y geotérmicos. Derivado de ese trabajo, se destacan algunas correlaciones, las

más importantes se describen a continuación: 1) se encontró una correlación de las zonas de atenuación sísmica (Torres-Cuenca, 2017) con grandes intervalos de zonas permeables localizadas en las andesitas Teziutlán: el aumento de temperatura y zonas permeables se localizan cerca de estructuras geológicas; 2) la correlación parcial de la base de la ignimbrita Xáltipan con resistividades bajas y con la casi nula ausencia de zonas permeables; 3) el cambio en el tiempo de la sismicidad y su relación con la producción de vapor.

Como resultado final de este trabajo, se propone un modelo conceptual en el cual se analizan los componentes fundamentales del sistema geotérmico y se proponen algunas zonas de interés con posibles potenciales geotérmicos. El modelo geotérmico conceptual propuesto en este trabajo está conformado por una roca reservorio que se localiza principalmente en andesitas fracturadas de la unidad 7 y 8, y en menor proporción en rocas carbonatadas metamorfozadas localizadas en la cima de la unidad 9, la permeabilidad principalmente está asociada a fracturas ligadas a zonas dañadas por fallas, sin embargo, también se relaciona a microporosidad primarias y secundarias de la roca. Se propone principalmente a la ignimbrita Xáltipan como la roca sello del yacimiento geotérmico ya que presenta muy bajas permeabilidades, sin embargo, es importante señalar que esta unidad presenta una efectividad variada en función de la heterogeneidad encontrada en sus litofacies que muestran diferentes grados de consolidación, lo cual afecta sus propiedades de porosidad, permeabilidad y grado de alteración. Se propone que el yacimiento geotérmico está alimentado principalmente por 3 diferentes zonas donde se observa un aumento considerable de las temperaturas la primera ubicada al norte del Xalapazco principalmente en el pozo H-12, la segunda ubicada en el pozo H-7, y la tercera zona en el pozo H-9 al pozo H-55, considerando que el ascenso de flujo de calor se puede asociar principalmente a las estructuras que se localizan cerca de estas zonas ( [Figs. 37; 42; 45](#)).

## Bibliografía

- Acosta Azúa, R.I., 2016. Caracterización petrográfica y geoquímica de una sección del subsuelo en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla: caso de estudio del pozo H-20. Tesis de Licenciatura en Geociencias. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. 138 pp.
- Alcaraz S, Lane R, Spragg K, Milicich S, Sepulveda F, Bignall, G. 2011, January. 3D geological modelling using new Leapfrog Geothermal software. In Proceedings of 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA.
- Aragón, A.A., Arellano, G.V., Izquierdo, M.G., García, G.A., Barragán, R.M., Verma, M.P., Pizano, A., 2000. Comportamiento de los índices de calentamiento en el yacimiento geotérmico de los Humeros, Puebla, México. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía* 16, 2.
- Aragon, A & Arellano, V. & Garcia-Gutierrez, Alfonso & Barragán, Rosa & Lzquierdo, C & Verma, Mahendra. 2003. A Comparative Analysis of Heating Indices of Wells in Los Humeros , Puebla, Mexico.
- Arellano, V.M., A. García, R.M. Barragán, G. Izquierdo, A. Aragón y A. Pizano, 1999. Modelo conceptual del estado inicial del campo geotérmico de Los Humeros, Pue., México. *Geotermia*, Vol. 15, No. 2, pp. 111-120.
- Arellano, V. M., García, A., Barragán, R. M., Izquierdo, G., Aragón, A., Nieva, D., 2003. An updated conceptual model of the Los Humeros geothermal reservoir (Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 124 (1), p. 67–88.
- Arellano, V.M., García-Gutiérrez, A., Barragán, R.M., Izquierdo, G., Aragón, A., Pizano, A., 2000. A Conceptual Model of the Los Humeros , (México), Geothermal Reservoir in Its Natural State . *World Geotherm. Congr.* 2000 15, p. 2503–2509.
- Arteaga Martínez, D., Carrasco Núñez, G., 2017. Caracterización de la porosidad y permeabilidad de un yacimiento geotérmico a través del análisis multiescalar usando microtomografía de Rayos X, caso de estudio del campo geotérmico de Los Humeros. Cartel presentado en: Reunión Anual 2017, Unión Geofísica Mexicana, A.C., Puerto Vallarta, Jalisco, México, 2017.
- Árnason, K., Eysteinnsson, H., Hersir, G.P., 2010. Joint 1D inversion of TEM and MT data and 3D inversion of MT data in the Hengill area, SW Iceland. *Geothermics* 39, 13–34.
- Arzate, J., Corbo-Camargo, F., Carrasco, G., Hernández, J., Yutis, V., 2017. The los humeros (México) geothermal field model deduced from new geophysical and geological data. *Geothermics* 71 (Supplement C), p. 200–211.
- Austin-Erickson, A., Ort, M.H., Carrasco-Núñez, G., 2011, Rhyolitic phreatomagmatism explored: Tepexitl tuff ring (Eastern Mexican Volcanic Belt): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201, p. 325-341.
- Bjorlykke, K. 2010. Petroleum geoscience: From sedimentary environments to rock physics. Springer Science & Business Media.

- Calcagno, Philippe , Evanno, Gwladys , Trumpy, Eugenio , Gutiérrez-Negrín, Luis , Macías, J. , Carrasco-Núñez, Gerardo , Liotta, Domenico. 2018. Preliminary 3-D geological models of Los Humeros and Acoculco geothermal fields (Mexico) – H2020 GEMex Project. *Advances in Geosciences*. 45. 321-333. 10.5194/adgeo-45-321-2018.
- Calcagno, Philippe , Evanno, Gwladys , Trumpy, Eugenio , Gutiérrez-Negrín, Luis , Macías, J. , Carrasco-Núñez, Gerardo , Liotta, Domenico. 2019. Updating the 3D Geomodels of Los Humeros and Acoculco Geothermal Systems (Mexico) - H2020 GEMex Project. fhal-02268392.
- Caine, J.S., Evans, J.P., & Forster, C.B. 1996. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24 (11), p.1025-1028.
- Caldwell, T.G., Bibby, H.M., Brown, C., 2004. The magnetotelluric phase tensor, *Geophys J. Int.* 158, 457–469.
- Carr, J.C., Beatson, R.K., Cherrie J.B., Mitchell, T.J., Fright, W.R., McCallum, B.R. and Evans, T.R. 2001. Reconstruction and representation of 3-D Objects with radial basis functions. *SIGGRAPH Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, p. 67–76.
- Carrasco-Núñez G., López-Martínez, M., Hernández, J., Vargas, V. 2017a. Subsurface stratigraphy and its correlation with the surficial geology at Los Humeros geothermal field, Eastern Trans-Mexican: *Geothermics*, v. 67, p. 1-17.
- Carrasco-Núñez, G. y Branney, M.J., 2005. Progressive assembly of a massive layer of ignimbrite with normal-to-reverse compositional zoning: The Zaragoza ignimbrite of central Mexico: *Bulletin of Volcanology*, v. 68, p. 3-20.
- Carrasco-Núñez, G., Gómez-Tuena, A., Lozano Carrasco-Núñez, G., Gómez-Tuena, A., Lozano, V.L., 1997. Geologic map of Cerro Grande volcano and surrounding area, Central Mexico. *Geological Society of America Map and Chart Series MCH 081*. 10 p., V.L., 1997. Geologic map of Cerro Grande volcano and surrounding area, Central Mexico. *Geological Society of America Map and Chart Series MCH 081*. 10 p.
- Carrasco-Núñez, G., Gómez-Tuena, A., López, M., Vargas, V., Aranda-Gómez, J.J., Cedillo, F. y Origel, G., 2008. Estudio de estratigrafía volcánica de la secuencia andesítica del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla: *Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad. Informe Interno DEX-HT-19-08*.
- Carrasco Núñez, G., Arzate Flores, J., Berna Uruchurtu, J.P., Carrera Hernández, J.J., Cedillo Rodríguez, F., Dávila Harris, P., Hernández Rojas, J., Hurwitz, S., Lermo Samaniego, J.F., Levresse Gilles, P.R., López Quiroz, P., Manea, V.C., Norini, G., Santoyo Gutiérrez, E.R., Willcox, C., 2015. A new geothermal exploration program at Los Humeros volcanic and geothermal field (Eastern Mexican Volcanic Belt), in: *Proceedings World Geothermal Congress. Melbourne, Australia*, p. 10.
- Carrasco-Núñez, G., Hernandez, J., De Leon, L., Davila, P., Norini, G., Bernal, J. P., López, P. 2017b. Geologic map of Los Humeros volcanic complex and geothermal field, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Terra Digitalis*, 1(2), p. 1–11.
- Carrasco-Núñez, G., Bernal, J. P., Dávila, P., Jicha, B., Giordano, G., and Hernández, J. 2018. Reappraisal of Los Humeros volcanic complex by new U/Th zircon and 40Ar/39Ar

- dating: Implications for greater geothermal potential, *Geochem. Geophys. Geosy.*, 19, 132–149, <https://doi.org/10.1002/2017GC007044>.
- Carrasco-Núñez, G., Mc Curry, M., Branney, M.J., Norry, M. y Willcox, C., 2012. Complex magma mixing, mingling and withdrawal associated with an intra-Plinian ignimbrite eruption at a large silicic caldera volcano: Los Humeros of central Mexico: *Geological Society of America*, v. 124, p. 1793-1809.
  - Carrasco-Núñez, G., Richter, K., Chesley, J., Siebert, L. y Aranda-Gómez, J.J., 2005. Contemporaneous eruption of calc-alkaline and alkaline lavas in a continental arc (Eastern Mexican Volcanic Belt): chemically heterogeneous but isotopically homogeneous source: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 150, p. 423-440.
  - Carrasco, G., Cid, H., and Ortega, D., 2017. “Effect of microporosity on the permeability of geothermal systems, case study of Los Humeros geothermal fie”, p. 18504.
  - Carrillo-Bravo, J., 1961. "Geología del Anticlinorio Huizachal -Peregrina al NW de Ciudad Victoria, Tamaulipas", *Bol. Asoc. Mex. Geol. Petroleros*, Vol. XIII, Nos. 1 y 2, pp. 1-98.
  - Castillo-Roman, J. & Verma, Surendra & Andaverde, J.. 1991. Modelling of temperature under the Los Humeros Caldera, Puebla, Mexico, in terms of magma chamber depth. *Geofisica Internacional*. 30. 149-172.
  - Cavazos, Jaime & Carrasco-Núñez, Gerardo. 2019. Effective mapping of large ignimbrites by using a GIS-based methodology; case of the Xáltipan ignimbrite from Los Humeros caldera, Mexico. *Terra Digitalis*. 3. 10.22201/igg.25940694.2019.2.65.
  - Cavazos, Jaime & Carrasco-Núñez, Gerardo & Davila-Harris, Pablo & Peña, Daniela & Jáquez, Adrián & Arteaga, Dante. 2020. Facies Xáltipan. *Journal of South American Earth Sciences*.
  - Cedillo, F., 2000. Hydrogeologic model of the geothermal reservoirs from Los Humeros. In: *Proceedings World Geothermal Congress 2000*. Puebla, México Kyushu – Tohoku Japan. pp. 1639–1644.
  - Chédeville C, Guilbaud M-N, Siebe C., 2020. Stratigraphy and radiocarbon ages of late-Holocene Las Derrumbadas rhyolitic domes and surrounding vents in the Serdán-Oriental basin (Mexico): Implications for archeology, biology, and hazard assessment. *The Holocene*.;30(3):402-419. doi:10.1177/0959683619887417
  - Cid, H.E., Carrasco-Núñez, G., Manea, V.C., 2017. Improved method for effective rock microporosity estimation using X-ray microtomography. *Micron* 97, 11–21. doi:10.1016/j.micron.2017.01.003
  - Corbo-Camargo, Fernando & Arzate-Flores, Jorge & Emilia, Fregoso & Norini, Gianluca & Carrasco-Núñez, Gerardo & Yutsis, Vsevolod & Herrera, Juan & Hernández, Javier. 2020. Shallow structure of Los Humeros (LH) caldera and geothermal reservoir from magnetotellurics and potential field data. *Geophysical Journal International*. 1. 666-675. 10.1093/gji/ggaa338.
  - Cowan, E.J., Beatson, R.K., Fright, W.R., McLennan, T.J. and Mitchell, T.J. 2002. Rapid geological modelling. *Applied Structural Geology for Mineral Exploration and Mining*. International Symposium, Kalgoorlie, 23-25.

- Creon, Laura, Levresse, Gilles, Remusat, Laurent, Bureau, Helene, Carrasco-Núñez, Gerardo. 2018. New method for initial composition determination of crystallized silicate melt inclusions. *Chemical Geology*. 483. 10.1016/j.chemgeo.2018.02.038.
- Cumming, W. and Mackie, R. 2009. "MT Survey for Resource Assessment and Environmental Mitigation at the Glass Mountain KGRA," California Energy Commission, GRDA Report, Geothermal Resources Development Account.
- Dávila-Harris, P., Carrasco-Núñez, G., 2014. An unusual syn-eruptive bimodal eruption: the holocene cuicuiltic member at los humeros caldera, Mexico. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 271, 24–42.
- Del Pilar Martínez, A., 2015. Caracterización petrográfica y geoquímica de una sección del subsuelo en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla: el caso del pozo H-42. Tesis de Licenciatura en Ingeniería en Geología. Universidad Autónoma de Guerrero. 119 pp.
- Demant, A., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista*, v. 2, p. 172-187.
- Demant, A., 1982. Interpretación geodinámica del volcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista*, v. 5, p. 217-222.
- Essene, E.J. and Peacor, D.R. 1995. Clay mineral thermometry - A critical perspective. *Clays and Clay Minerals*, 43, p. 540-553.
- Fernández, S., A. Uribe, J.C. Flores y R. Gómez, 1996. Estudio sismológico en el área del temblor de Xalapa de 1920. *Memorias del VII Simposium de Geofísica y Exploración*, Veracruz, Ver. pp. 365-370.
- Fernández Maya, F.O., 2017. Caracterización petrográfica y geoquímica del pozo H-26 en el campo geotérmico de los Humeros, Puebla. Tesis de Licenciatura en Ingeniería en Geociencias, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. 87 p.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G. y Carrasco-Núñez, G., 1999. Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in Central Mexico; from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt: *Geology*, v. 27-4, p. 303-306.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M., 2012. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics* 522–523, 122–149.
- Ferriz, H., 1985, Zoneamiento composicional y mineralógico en los productos eruptivos del centro volcánico de los humeros, Puebla, México: *Geofísica Internacional*, 24(1), 97-157.
- Ferriz, H.Y., Mahood, G., 1984. Eruption rates and compositional trends at los humeros volcanic center, Puebla, Mexico. *J. Geophys. Res.* 89 (B10), 8511–8524.
- Ferriz, H., Mahood, A.G., 1986, Volcanismo riolítico en el Eje Neovolcánico Mexicano: *Geofísica Internacional*, 25(1), 117-156

- Frank, T., Tertois, A.L. and Mallet, J.L. (2007) 3-Dreconstruction of complex geological interfaces from irregularly distributed and noisy point data. *Computers & Geosciences*, 33, 932-943.
- Fitz-Díaz, E., Lawton, T.F., Juárez-Arriaga, E., Chávez-Cabello, G., 2017. The CretaceousPaleogene Mexican orogen: structure, basin development, magmatism and tectonics. *Earth-Sci. Rev.* 183, 56–84.
- García-Gutiérrez, Alfonso. 2009. Estado térmico inicial del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. *Geotermia*, v. 22, p. 59-70.
- Gómez Castellanos, E., 2016. Caracterización petrográfica y geoquímica de una sección del subsuelo del Campo Geotérmico de los Humeros, Puebla: caso de estudio del Pozo H-5. Tesis de Licenciatura en Ingeniería en Geociencias. Tecnológico Nacional de México. 182 pp.
- Gómez-Tuena, A., Carrasco-Núñez, G., 2000. Cerro grande volcano: the evolution of a Miocene stratocone in the early trans-Mexican volcanic belt. *Tectonophysics* 318, 249–280.
- Gunderson, R.P., Ganefianto, N., Riedel, K.L., Sirad-Azwar, L., Suleiman, S. 2000. Exploration Results in the Sarulla Block, North Sumatra, Indonesia, *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Gutiérrez-Negrín, E., Izquierdo-Montalvo, G., 2010. Review and update of the main features of the Los Humeros geothermal field. In: *Proceedings World Geothermal Congress*. Mexico, Bali, Indonesia. April 2010.
- Gutiérrez-Negrín, Luis. 2019. Current status of geothermal-electric production in Mexico. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 249.012017. 10.1088/1755-1315/249/1/012017.
- Hardy, R. L. 1971. Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces, *J. Geophys. Res.*, 76 (8), 1905– 1915, doi:10.1029/JB076i008p01905.
- Herrera Casseres, Juan Camilo. 2018. "Modelado magnetotérmico tridimensional del campo geotérmico de los humeros". (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Huerta Luna, G., 2018. Caracterización geológica y geoquímica de subsuelo del campo geotérmico Los Humeros, Puebla, México: caso de estudio, Pozo H-50. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Geológica. Instituto Politécnico Nacional. 132 p.
- Huttler, Gerald W., 2020. *Proceedings World Geothermal Congress 2020 Reykjavik, Iceland, April 26 – May 2, 2020 1 Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report*.
- Jáquez Domínguez, J.A., 2018. Caracterización petrográfica y geoquímica del Pozo H-59 del Campo Geotérmico “Los Humeros”, Puebla. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Geológica. Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica Ciencias De La Tierra. 120 p.
- Lermo, J., Guerrero, J., Soto, J., Machorro, G., 1999a. Procesado e interpretación de datos sísmicos de la red sísmológica del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.

- Lermo, J., Soto, J., y Flores, J. 1999b. Procesado de datos sísmicos de la red del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Informe Técnico Final del Instituto de Ingeniería, UNAM a la CFE-Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos.
- Lermo, J., Hurtado, J., Soto, J., y Flores, J. 2000. Análisis de la sismicidad del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Informe Técnico Final del Instituto de Ingeniería, UNAM a la CFE-Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos.
- Lermo, J., Soto, J., Lorenzo, C., Mijares, C., y Flores, J. 2002. Estudio de la sismicidad del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla Fase III. Comisión Federal de Electricidad. Gerencia de proyectos termoeléctricos-Departamento de Exploración. Informe Técnico: DEX-HU-02/2003.
- Lermo, J., Lorenzo, C., Espirita, G., y Antayhua, Y. 2005. Sismicidad en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Instrumentación y operación de la Red Sismológica. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Termoeléctricos-Departamento de Exploración. Informe Técnico: GF-HU-01-05
- Lermo, J. 2015. Monitoreo sísmico del campo geotérmico utilizando la red sísmica de Los Humeros (RSHU). Segundo Informe. CEMIE-GEO.
- López-Hernández, A., 1995. Estudio regional volcánico y estructural del campo geotérmico de Los Humeros, Pue., México. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía* 11 (1), 17–36.
- López-Ramos, E., 1979. *Geología de México*. Tomo II, 2da. Ed., México, D. F. p. 111-120.
- Lorenzo, C. 2002. Reporte de la actividad sísmica registrada en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla durante el periodo enero 2001-abril 2002. Informe Interno. Gerencia de Proyectos Termoeléctricos Residencia de Estudios, C.F.E. 20p.
- Lorenzo, C. 2004. Reporte de la actividad sísmica registrada en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla durante el periodo enero 2002-noviembre 2003. Informe Interno. Gerencia de Proyectos Termoeléctricos-Residencia de Estudios, CFE.
- Lucci, F., Carrasco-Núñez, G., Rossetti, F., Theye, T., White, J. C., Urbani, S., Azizi, H., Asahara, Y., and Giordano, G., 2020. Anatomy of the magmatic plumbing system of Los Humeros Caldera (Mexico): implications for geothermal systems, *Solid Earth*, 11, 125–159, <https://doi.org/10.5194/se-11-125-2020>.
- Machorro Bretón, J.O., 2018. Caracterización petrográfica y geoquímica de una sección del subsuelo del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla: caso de estudio del Pozo H-63. Tesis de Licenciatura en Ingeniería geológica. Instituto Politécnico Nacional. 116 p.
- Manzella, A., and Pipan, M., 2009: Geothermal exploration technologies; Geophysical tools. Paper presented at the School on Geothermics, organised by ICTP, ICS-UNIDO and IAEA, Trieste, Italy.
- Mazzotti, S., H. Dragert, R. D. Hyndman, M. M. Miller, and J. A. Henton. 2002. GPS deformation in a region of high crustal seismicity: N. Cascadia forearc, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 198, 41–48.

- Mooser, F., 1972, The Mexican Volcanic Belt, structure and Tectonics: *Geof.Int.* 12(2), 55-70, México.
- Muñoz-Jáuregui, J. A, Guzmán-Cervantes, C. S., Garduño-Monroy, V. H., Jiménez-Haro, A. & Layer, P. 2019. Geomorphology of Las Derrumbadas dome complex, Puebla Mexico, *Journal of Maps*, 15:2, 601-610, DOI: 10.1080/17445647.2019.1650839.
- Negendank J F W, Emmermann R, Krawczyk R, Mooser F, Tobschall H, Werle D, 1985. Geological and geochemical investigations on the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geof Internac*, 24: 477-575.
- Norini, G., Gropelli, G., Sulpizio, R., Carrasco-Núñez, G., Davila-Harris, P., Pellicioli, C., Zucca, F., De Franco, R., 2015. Structural analysis and thermal remote sensing of the Los Humeros Volcanic Complex: implications for volcano structure and geothermal exploration. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 301, 221–237.
- Pellerin, L., and Hohmann, G. W., 1990, Transient electromagnetic inversion: A remedy for magnetotelluric static shifts: *Geophysics*, 55, 1242-1250.
- Peña Rodríguez, D., 2018. Caracterización petrográfica y geoquímica de una sección del subsuelo del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla: caso de estudio del pozo H10. tesis de licenciatura en Ingeniería en Geociencias, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. 90 p.
- Pipan, M., Forte, E., Del Ben, A., Nava-Alonzo, H.F., Giudetti G. and S. Supriyanto, 2010. Seismic and electromagnetic study of reservoir properties for geothermal application. *Proc. World. Geoth. Congr.*, 2010. Bali, Indonesia, April 2010.
- Ponce, L., Rodríguez, C., 1977. Microearthquake activity associated to los humeros caldera, Mexico: preliminary survey. *Int. Geophys.* 17–4, 461–478.
- Prol-Ledesma, R.M., 1998. Pre- and post-exploitation variations in hydrothermal activity in Los Humeros geothermal field, Mexico. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 83, 313–333.
- Quezadas-Flores, A., 1961. Las rocas del basamento de la cuenca Tampico-Mizantla: México, D.F., bachelor thesis. *Fac. Ing., UNAM* 72 p.
- Riggs, N.R., Carrasco-Núñez, G., 2004, Evolution of a complex, isolated dome system, Cerro Pizarro, central Mexico: *Bulletin of Volcanology*, 66, 322-335.
- Rodríguez Elizarrarás, Sergio. 2005. Geology of Las Cumbres Volcanic Complex, Puebla and Veracruz states, Mexico. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, ISSN 1026-8774, Vol. 22, N°. 2, 2005, pags. 181-198. 22.
- Rojas, E., 2016. Litoestratigrafía, petrografía, y geoquímica de la Toba Llano, y surelación con el cráter El Xalapazco. *Caldera De Los Humeros, Puebla.* MSc. Thesis. IPYCYT, México.
- Ross, P., Carrasco Núñez, G. & Hayman, P 2017. Felsic maar-diatreme volcanoes: a review. *Bulletin of Volcanology* 79, 20. <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1097-1>.
- Schlumberger. (s.f.). Signature Quartz Gauges, HPHT High-Resolution Pressure Measurement Schlumberger. Recuperado 5 marzo, 2019, de [https://www.slb.com/services/characterization/testing/downhole\\_pressure\\_measure/signature\\_quartz\\_gauges.aspx](https://www.slb.com/services/characterization/testing/downhole_pressure_measure/signature_quartz_gauges.aspx).

- Siebe, C. and Verma, S.P. 1988. Major element geochemistry and tectonic setting of Las Derrumbadas rhyolitic domes, Puebla, Mexico. *Chemie der Erde – Geochemistry*. *Chem. Erde* 48 (1988), pp. 177-189.
- Spichak, V.V., Zakharova, O.K., and Rybin, A.K. 2007: On the possibility of realization of contact-free electromagnetic geothermometer, *Dokl. Russian Academy of Sci.* 417A(9), (2007a), 1370-1374.
- Torres-Cuenca, Rogelio 2007. Uso de técnicas de vibración ambiental para caracterizar el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Cd. Mx., México.
- Ussher, G., Harvey, C., Johnstone, R., Anderson, E., 2000. Understanding the resistivities observed in geothermal systems. *Proc. World Geotherm. Congr.* 1915–1920.
- Velazquez Juarez, Daniel Arturo. 2019. “Modelación geológica-geofísica con uso de métodos potenciales de la estructura interna de La Caldera de Los Humeros, Puebla”. (Tesis de Maestría). Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.
- Verma, S.P. y López, M., 1982. Geochemistry of Los Humeros caldera, Puebla, Mexico: *Bulletin of Volcanology*, v. 45-1, p. 63-79.
- Verma, S.P., 1983. Magma genesis and chamber processes at Los Humeros caldera, México— Nd and Sr isotope data: *Nature*, v. 301, p. 52–55.
- Verma, S.P., 1984. Alkali and alkaline earth element geochemistry of Los Humeros caldera, Puebla, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 20, p. 21-40.
- Verma, S.P., 1985a. On the magma chamber characteristics as inferred from surface geology and geochemistry: examples from Mexican geothermal áreas: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 41, p. 207–214.
- Verma, S.P., 1985b. Heat source in Los Humeros geothermal area, Puebla, Mexico: *Geothermal Resources Council*, v. 9-1, p. 521-525.
- Verma, S.P., 1987. Mexican volcanic belt: present state of knowledge and unsolved problems: *Geofísica Internacional*, v. 26-2, p. 309-340.
- Viggiano, J.C. y Robles, J., 1988. Mineralogía hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue.: sus usos como indicador de temperatura y del régimen hidrológico: *Revista Mexicana de Geoenergía*, v. 4, p. 15-28.
- Viniegra, F., 1965. Geología del Macizo de Teziutlán y la Cuenca Cenozoica de Veracruz: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, v. 17, p. 101-163.
- Vozoff, K., 1991. "THE MAGNETOTELLURIC METHOD", *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 2, Application, Parts A and B*, Misac N. Nabighian (Soc. Explor. Geophys.)
- Willcox, C.P., 2011. Eruptive, Magmatic and Structural Evolution of a large Explosive Caldera Volcano: Los Humeros, Central Mexico: Tesis de Doctorado, Universidad de Leicester, UK, 321 pp.
- White, Noel & Hedenquist, Jeffrey. 1995. Epithermal gold deposits. Styles, characteristics and exploration. *Society of Economic Geologists, Newsletter*. 23. 1, 9-13.

- Yáñez García, C. y Casique Vásquez, J., 1980. Informe geológico del proyecto geotérmico Los Humeros-Las Derrumbadas. México, D.F. CFE. (Inédito).
- Yáñez, C. y García, S., 1982. Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz: Comisión Federal de Electricidad (CFE) México, v. 29, 98 pp.
- Zimmer, B.W., Riggs, N.R., Carrasco-Núñez, G., 2010. Evolution of tuff ring dome complex: the case study of Cerro Pinto, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: Bulletin of Volcanology, 72, 1223-1240.

## Anexos

- Archivo Collar.csv

Hold ID	East	North	Elev	Z_topography	Depth
H-1	661906	2175064	2828	2815.99	1850
H-2	662646	2172435	2896	2897.99	2304
H-3	660611	2177914	2741	2748.3	1860
H-4	661931	2177517	2816	2818.73	1884
H-5	660519	2175966	2758	2749.74	1905
H-6	663508	2173545	2894	2900.45	2541
H-7	661838	2175871	2782	2786.22	2340
H-8	661567	2176391	2778	2776.82	2338
H-9	660618	2178216	2752	2748.61	2500
H-10	662067	2176382	2829	2840.69	2158
H-11	662574	2177436	2812	2809.03	2465
H-12	663803	2173053	2960	2957.32	3104
H-13	662244	2174406	2835	2829.73	2385
H-14	663832	2169627	2835	2818.3	1360
H-15	661638	2178804	2792	2792.67	1970
H-16	661557	2178250	2783	2780.04	2048
H-17	662298	2178606	2813	2799.57	2170
H-18	664916	2172077	3002	2999.46	2862
H-19	662867	2176653	2812	2808.03	2270
H-20	663315	2177505	2844	2824.58	2402
H-21	662279	2179691	2871	2879.39	2220
H-22	660055	2178853	2763	2748.06	1500
H-23	664184	2175459	2869	2860.34	2620
H-24	665497	2172938	2922	2921.63	3270
H-25	666383	2176186	2799	2819	2300
H-26	663117	2175453	2540	2864.17	2546
H-27	663986	2176292	2866	2862.13	2600
H-28	662590	2177750	2819	2806.05	2570

H-29D	661884	2177843	2807	2799.49	2200
H-30	661488	2178547	2787	2782.84	1910
H-31	661832	2179041	2810	2812.01	1920
H-32	662631	2178043	2818	2802.16	2200
H-33	661535	2177983	2773	2777.96	1602
H-34	662956	2177222	2813	2804.43	1800
H-35	661050	2178373	2770	2773.4	1700
H-36	662557	2177403	2813	2808.86	1800
H-37	661067	2178338	2769	2773.81	1800
H-38	661877	2178164	2795	2791.88	2210
H-39	663480	2173065	2890	2919.99	2500
H-40	661736	2175724	2795	2785.79	2230
H-41	663538	2173285	2895	2897.97	2220

Hold ID	East	North	Elev	Z_topography	Depth
H-42	663300	2173505	2896	2887.22	2800
H-43	661240	2178060	2772	2778.26	2200
H-49	661876	2175057	2816	2817.33	2200
H-50	663540	2173032	2932	2932.22	2580
H-52	661011	2178905	2797	2779.2	1900
H-55	663319	2177691	2850	2826.02	2700
H-56	662238	2174382	2600	2828.94	2380
H-58	662555	2177456	2600	2809.7	2500
H-59	661582	2178401	2777	2779.49	2160
H-63	661241	2178065	2772	2778.58	2200

- Archivo Survey.csv

Hold ID	Depth	Dip	Azimuth	Hold ID	Depth	Dip	Azimuth
H-1	1850	90	0	H-52	1900	90	0
H-2	2304	90	0	H-55	2700	90	0
H-3	1860	90	0	H-55	2380	90	0
H-4	1884	90	0	H-58	2500	90	0
H-5	1905	90	0	H-59	2160	90	0
H-6	2541	90	0	H-63	2200	90	0
H-7	2340	90	0	H-52	1900	90	0
H-8	2338	90	0	H-55	2700	90	0
H-9	2500	90	0	H-55	2380	90	0
H-10	2158	90	0	H-58	2500	90	0
H-11	2465	90	0	H-59	2160	90	0
H-12	3104	90	0	H-63	2200	90	0
H-13	2385	90	0				
H-14	1360	90	0				
H-15	1970	90	0				
H-16	2048	90	0				
H-17	2170	90	0				
H-18	2862	90	0				
H-19	2270	90	0				
H-20	2402	90	0				
H-21	2220	90	0				
H-22	1500	90	0				
H-23	2620	90	0				
H-24	3270	90	0				
H-25	2300	90	0				
H-26	2546	90	0				
H-27	2600	90	0				
H-28	2570	90	0				
H-29D	2200	90	0				
H-30	1910	90	0				
H-31	1920	90	0				
H-32	2200	90	0				
H-33	1602	90	0				
H-34	1800	90	0				
H-35	1700	90	0				
H-36	1800	90	0				
H-37	1800	90	0				
H-38	2210	90	0				
H-39	2500	90	0				
H-40	2230	90	0				
H-41	2220	90	0				
H-42	2800	90	0				
H-43	2200	90	0				
H-49	2200	90	0				
H-50	2580	90	0				

- Archivo Geología.csv

Hold ID	From	To	Unit	Hold ID	From	To	Unit
H-1	0	340	2	H-8	2130	2338	9
H-1	340	690	4	H-9	0	250	2
H-1	690	1050	5	H-9	250	320	3
H-1	1050	1850	7	H-9	320	590	4
H-2	0	300	2	H-9	590	790	5
H-2	300	510	4	H-9	790	1730	7
H-2	510	750	5	H-9	1730	2500	9
H-2	750	1120	7	H-10	0	410	2
H-2	1120	2304	9	H-10	410	860	5
H-3	0	430	2	H-10	860	2158	7
H-3	430	500	3	H-11	0	170	2
H-3	500	570	5	H-11	170	230	3
H-3	570	570	6	H-11	230	890	5
H-3	570	1610	7	H-11	890	920	6
H-3	1610	1860	9	H-11	920	1050	7
H-4	0	170	2	H-11	1050	2440	8
H-4	170	370	3	H-11	2440	2465	9
H-4	370	390	4	H-12	0	350	2
H-4	390	1050	5	H-12	350	740	3
H-4	1055	1884	7	H-12	740	850	4
H-5	0	220	2	H-12	850	920	5
H-5	220	380	4	H-12	920	2720	7
H-5	380	520	5	H-12	2720	3104	9
H-5	520	1380	7	H-13	0	390	2
H-5	1380	1905	9	H-13	390	1040	5
H-6	0	350	2	H-13	1040	1970	7
H-6	350	510	4	H-13	1970	2370	8
H-6	510	975	5	H-13	2370	2385	9
H-6	975	2470	7	H-14	0	610	2
H-6	2470	2541	9	H-14	610	1010	3
H-7	0	310	2	H-14	1010	1210	5
H-7	310	380	3	H-14	1210	1310	7
H-7	380	410	4	H-14	1310	1360	9
H-7	410	940	5	H-15	0	200	2
H-7	945	1700	7	H-15	200	270	3
H-7	1700	2340	8	H-15	270	950	5
H-8	0	390	2	H-15	950	1770	7
H-8	390	430	4	H-15	1770	1920	8
H-8	430	960	5	H-15	1920	1970	9
H-8	960	2130	7				
H-8	2130	2338	9				

Hold ID	From	To	Unit	Hold ID	From	To	Unit
H-16	0	110	2	H-23	0	90	2
H-16	110	160	3	H-23	90	290	3
H-16	160	190	4	H-23	290	390	4
H-16	190	910	5	H-23	390	950	5
H-16	910	1810	7	H-23	950	1960	7
H-16	1810	2020	8	H-23	1960	2550	8
H-16	2020	2048	9	H-23	2550	2620	9
H-17	0	40	2	H-24	0	320	2
H-17	40	310	3	H-24	320	390	3
H-17	310	2150	5	H-24	390	530	4
H-17	2150	2170	8	H-24	530	630	5
H-18	0	370	2	H-24	630	1380	6
H-18	370	390	3	H-24	1380	3230	7
H-18	390	470	4	H-24	2600	3230	8
H-18	470	840	5	H-24	3230	3270	9
H-18	840	2850	7	H-25	0	290	2
H-18	2850	2862	9	H-25	290	500	5
H-19	0	180	2	H-25	500	980	6
H-19	180	240	3	H-25	980	2300	7
H-19	240	300	4	H-26	0	220	2
H-19	300	500	5	H-26	220	960	5
H-19	500	1000	6	H-26	960	1060	6
H-19	1000	2270	7	H-26	1060	2070	7
H-20	0	110	2	H-26	2070	2540	8
H-20	110	200	3	H-27	0	100	2
H-20	200	240	4	H-27	100	620	3
H-20	240	520	5	H-27	620	1050	5
H-20	520	1030	6	H-27	1050	2060	7
H-20	1030	2235	7	H-27	2060	2600	8
H-20	2235	2402	8	H-28	0	130	2
H-21	0	120	2	H-28	130	365	3
H-21	120	320	4	H-28	365	520	4
H-21	320	580	5	H-28	520	900	5
H-21	580	910	6	H-28	900	1960	7
H-21	910	2160	7	H-28	1960	2545	8
H-21	2160	2220	9	H-28	2545	2570	9
H-22	0	300	2	H-29D	0	210	2
H-22	300	400	4	H-29D	210	310	3
H-22	400	650	5	H-29D	310	475	4
H-22	650	1150	7	H-29D	475	1020	5
H-22	1150	1500	9	H-29D	1020	1740	7
				H-29D	2150	2200	9

Hold ID	From	To	Unit	Hold ID	From	To	Unit
H-30	0	200	2	H-39	0	340	2
H-30	200	220	3	H-39	340	560	3
H-30	220	290	4	H-39	560	650	4
H-30	290	930	5	H-39	650	990	5
H-30	930	1180	6	H-39	990	1710	7
H-30	1180	1910	7	H-39	1710	2500	8
H-31	0	50	2	H-40	0	280	2
H-31	50	420	3	H-40	280	640	3
H-31	420	970	5	H-40	640	640	4
H-31	970	1830	7	H-40	640	1040	5
H-31	1830	1920	9	H-40	1040	1040	6
H-32	0	60	2	H-40	1040	2230	7
H-32	60	350	3	H-41	0	370	2
H-32	350	1140	5	H-41	370	760	3
H-32	1140	2130	7	H-41	760	890	4
H-32	2130	2200	8	H-41	890	1030	5
H-33	0	280	2	H-41	1030	1600	7
H-33	280	460	3	H-41	1600	2220	8
H-33	460	830	5	H-42	0	370	2
H-33	830	1602	7	H-42	370	500	3
H-34	0	120	2	H-42	500	630	4
H-34	120	510	4	H-42	630	990	5
H-34	510	1060	5	H-42	990	2200	7
H-34	1060	1800	7	H-43	0	100	2
H-35	0	210	2	H-43	100	1010	5
H-35	210	470	3	H-43	1010	1730	7
H-35	470	880	5	H-43	1730	2200	9
H-35	880	1700	7	H-49	0	300	2
H-36	0	130	2	H-49	300	450	3
H-36	130	460	3	H-49	450	700	4
H-36	460	950	5	H-49	700	1100	5
H-36	950	1800	7	H-49	1100	1660	7
H-37	0	120	2	H-49	1660	2200	8
H-37	120	360	3	H-50	0	340	2
H-37	360	890	5	H-50	340	360	3
H-37	890	1790	7	H-50	360	400	4
H-37	1790	1800	9	H-50	400	730	5
H-38	0	110	2	H-50	730	970	6
H-38	110	190	3	H-50	970	2580	7
H-38	190	350	4	H-52	0	100	2
H-38	350	1060	5	H-52	100	540	5
H-38	1060	1900	7	H-52	540	780	6
H-38	1900	2160	8	H-52	780	1720	7
H-38	2160	2210	9	H-52	1720	1900	9

Hold ID	From	To	Unit
H-55	0	100	2
H-55	100	220	3
H-55	220	250	4
H-55	250	560	5
H-55	560	1070	6
H-55	1070	2300	7
H-56	0	390	2
H-56	390	500	3
H-56	500	660	4
H-56	660	970	5
H-56	970	1930	7
H-56	1930	2380	8
H-58	0	200	2
H-58	200	390	3
H-58	390	550	4
H-58	550	850	5
H-58	850	1880	7
H-58	1880	2400	8
H-58	2400	2500	9
H-59	0	90	2
H-59	90	870	5
H-59	870	890	7
H-59	1780	1980	8
H-59	2025	2160	9
H-63	0	90	2
H-63	90	770	5
H-63	770	1780	9
H-63	1780	2200	9

- Temperaturas\_estabilizadas.csv

Hold ID	East	North	Elev	Temperatura (°C)	Hold ID	East	North	Elev	Temperatura (°C)
H-1	661906	2175064	1718	200	H-14	663832	2169627	2105	150
H-1	661906	2175064	1258	250	H-14	663832	2169627	1875	200
H-2	662646	2172435	2446	150	H-15	661638	2178804	1872	150
H-2	662646	2172435	2176	200	H-15	661638	2178804	1652	200
H-2	662646	2172435	1716	250	H-15	661638	2178804	972	250
H-2	662646	2172435	906	300	H-16	661557	2178250	2043	150
H-4	661931	2177517	2076	150	H-16	661557	2178250	1703	200
H-4	661931	2177517	1636	200	H-16	661557	2178250	1373	250
H-4	661931	2177517	1026	250	H-16	661557	2178250	1003	300
H-5	660540	2175950	1934	150	H-16	661557	2178250	863	350
H-5	660540	2175950	1704	200	H-17	662298	2178606	1953	150
H-5	660540	2175950	974	250	H-17	662298	2178606	1643	200
H-6	663508	2173545	2294	150	H-17	662298	2178606	1373	250
H-6	663508	2173545	1974	200	H-17	662298	2178606	673	300
H-6	663508	2173545	1554	250	H-17	662298	2178606	613	350
H-6	663508	2173545	814	300	H-18	664916	2172077	1992	150
H-8	661582	2176392	1841	150	H-18	664916	2172077	1302	200
H-8	661582	2176392	1641	200	H-18	664916	2172077	1022	250
H-8	661582	2176392	961	250	H-18	664916	2172077	142	300
H-8	661582	2176392	511	300	H-19	662881	2176643	1518	150
H-9	660618	2178216	1672	200	H-19	662881	2176643	1238	200
H-9	660618	2178216	1252	250	H-19	662881	2176643	648	250
H-9	660618	2178216	982	300	H-19	662881	2176643	508	300
H-9	660618	2178216	772	350	H-20	663330	2177486	930	250
H-10	662081	2176381	1758	150	H-20	663330	2177486	740	300
H-10	662081	2176381	1618	200	H-20	663330	2177486	610	350
H-10	662081	2176381	1438	250	H-21	662279	2179691	1361	150
H-10	662081	2176381	948	300	H-21	662279	2179691	1171	200
H-10	662081	2176381	718	350	H-21	662279	2179691	1011	250
H-11	662574	2177436	1982	150	H-22	660055	2178853	2253	150
H-11	662574	2177436	1572	200	H-22	660055	2178853	2033	200
H-11	662574	2177436	1222	250	H-22	660055	2178853	1583	250
H-11	662574	2177436	882	300	H-23	664184	2175459	1509	150
H-11	662574	2177436	622	350	H-23	664184	2175459	1289	200
H-12	663803	2173053	2150	200	H-23	664184	2175459	1009	250
H-12	663803	2173053	1960	250	H-23	664184	2175459	699	300
H-12	663803	2173053	1500	300	H-25	666396	2176169	830	150
H-13	662244	2174406	1645	200	H-25	666396	2176169	590	200
H-13	662244	2174406	885	250					

Hold ID	East	North	Elev	Temperatura (°C)
H-26	663133	2175459	1543	150
H-26	663133	2175459	1183	200
H-26	663133	2175459	943	250
H-26	663133	2175459	533	300
H-27	663986	2176292	1566	150
H-27	663986	2176292	1386	200
H-27	663986	2176292	1236	250
H-27	663986	2176292	616	300
H-27	663986	2176292	476	350
H-28	662601	2177741	2059	150
H-28	662601	2177741	1829	200
H-28	662601	2177741	1589	250
H-28	662601	2177741	1179	300
H-28	662601	2177741	779	350
H-30	661488	2178547	2017	150
H-30	661488	2178547	1767	200
H-30	661488	2178547	957	250
H-31	661832	2179041	1790	150
H-31	661832	2179041	1670	200
H-31	661832	2179041	1300	250
H-31	661832	2179041	1000	300
H-32	662631	2178043	2108	150
H-32	662631	2178043	1858	200
H-32	662631	2178043	1568	250
H-32	662631	2178043	1018	300
H-32	662631	2178043	708	350
H-33	661534	2177986	2062	150
H-33	661534	2177986	1642	200
H-33	661534	2177986	1272	250
H-34	662965	2177207	2013	150
H-34	662965	2177207	1803	200

- Datos de Permeabilidad

East	North	Intervalo permeable
661906	2175064	1200-1300/1400-1475
662646	2172435	1000-1200 / 2130-2260
661931	2177517	1100-1750 / 1800-1860
660519	2175966	1250-1350 / 1750-1850
663508	2173545	1700-1920 / 2020-2400
661838	2175871	1000-1100 / 1150-1240 / 1300-1600 / 2020-1260
661567	2176391	1570-1740 / 1890-2210
660618	2178216	1440-1560
662067	2176382	1720-1900 / 1950-2080
662574	2177436	2240-1380
663803	2173053	1600-2200/2500-2800
662244	2174406	1220-1290 / 1520-1580 / 1640-1740
661638	2178804	1400-1500
661557	2178250	1480-1660 / 1750-1960
662298	2178606	1280-1580
662867	2176653	1050-1150 / 1200-1830
663315	2177505	1600-2200 / 2250-2400
662279	2179691	1940-2100
660055	2178853	1260-1500
664184	2175459	1820-2010 / 2230-2340
666383	2176186	1700-1800 / 1900-1950
663117	2175453	1950-2250 / 2450-2530
663986	2176292	1530-1670 / 1900-2350 / 2540-1600
662590	2177750	1440-1570 / 1700-1980
661884	2177843	1360-1900 / 1990-2110
661488	2178547	1340-1440 / 1520-1860
661832	2179041	1580-1860
662631	2178043	1440-2000
661535	2177983	1280-1470 / 1510-1602
662956	2177222	1380-1800
663300	2173505	1300-1500 / 1800-2000
661240	2178060	1450-1900
661011	2178905	1250-1450
663319	2177691	1700-2100
661582	2178401	1450-2100