



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**MODELO COMPUTACIONAL TRIDIMENSIONAL CON  
BASE EN LA INTEGRACIÓN DE DATOS GEOFÍSICOS  
DE LA CALDERA DE ACOCULCO, PUEBLA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**P R E S E N T A:**

**JOSE EMILIANO CRUZ LOZANO**



**DIRECTORA DE TESIS:**

**DOCTORA ELSA LETICIA FLORES  
MÁRQUEZ**

**Ciudad Universitaria, CDMX., 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.

Datos del alumno

Cruz Lozano Jose Emiliano

312183808

Licenciatura en Ciencias de la Tierra

Facultad de Ciencias, UNAM

Datos del tutor

Dra. Elsa Leticia Flores Márquez

Instituto de Geofísica, UNAM

Datos del sinodal 1

Dra. Graciela del Socorro Herrera Zamarrón

Instituto de Geofísica, UNAM

Datos del sinodal 2

Dra. Dra. Lyssette Elena Muñoz Villers

Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

Datos del sinodal 3

Dra. Ana María Lizeth Caballero García

Facultad de Ciencias, UNAM

Datos del sinodal 4

Maestra en Ciencias de la Tierra. Ingrid Alejandra Kohn Ledesma

Facultad de Ciencias, UNAM

Datos del trabajo escrito

Modelo computacional tridimensional con base en la integración de datos geofísicos de la caldera de Acoculco, Puebla.

86 p

2021

## **Agradecimientos**

Le agradezco a la UNAM por abrirme las puertas y por el conocimiento que adquirí formando parte de ella.

A la Facultad de Ciencias por facilitarme las herramientas necesarias en mi formación profesional.

Agradezco a mi tutora la Dra. Elsa Leticia Flores Márquez por su invaluable apoyo en estos tiempos tan complicados, por sus consejos académicos, fundamentales para el desarrollo de este trabajo de Tesis y sobre todo por mostrar un interés auténtico en este proceso de mi vida académica.

Al Instituto de Geofísica por permitirme el uso de sus instalaciones y recursos previo a la contingencia Covid, ya que en él pude desarrollar la parte final de mi formación profesional.

Gracias a mis sinodales por sus valiosas observaciones y correcciones, por su tiempo y disposición para brindarme su ayuda.

A mis amigos por su apoyo moral y sus consejos académicos. Gracias en especial a Jaqueline García por sus valiosas asesorías y revisiones. Y sobre todo gracias por su cariño y por creer siempre en mí.

A mi familia, en especial a mis padres por apoyarme en todos los aspectos de mi vida y por su incondicional afecto.

## **Dedicatoria**

*A mis padres y en especial a mi hermano mayor, les dedico este trabajo, por ser mi mayor ejemplo y demostrarme que con constancia, empeño y trabajo se superan los obstáculos y se logran las metas.*

## Índice

Resumen .....	9
Introducción .....	10
2. Estudios Geológicos. ....	13
2.1 Geología superficial .....	13
2.2 Estratigrafía .....	15
2.3 Formación de la Caldera de Acoculco.....	17
2.4 Pozos exploratorios .....	19
2.5 Geología Estructural .....	21
2.6 Hidrogeología .....	23
3. Estudios Geofísicos .....	26
3.1 Caracterización estructural de la región .....	26
3.2 Métodos gravimétricos.....	27
3.2 Métodos magnéticos.....	29
3.4 Modelo digital de elevación .....	32
3.5 Imágenes satelitales .....	33
4. Estudios geoquímicos .....	36
4.1 Estudios previos.....	36
4.2 Minerales de alteración hidrotermal .....	37
4.3 Manifestaciones hidrotermales.....	39
4.4 Geoquímica de fluidos .....	40
5. Integración de datos.....	45
5.1 Metodología de construcción del modelo 3D geológico .....	45
5.1.1 Delimitación de capas digitales .....	48
5.1.2 Construcción de las capas digitales .....	50
5.1.3 Construcción de fallas .....	52
5.2 Modelo conceptual.....	53
5.2.1 Funcionamiento del modelo conceptual .....	54
5.3 Modelo numérico hidrogeológico de Chignahuapan.....	55
6. Modelo hidrogeológico.....	58
6.1 Modelo de flujo .....	58
6.2 MODFLOW .....	58

6.3 Construcción de capas.....	59
6.4 Geometría del modelo .....	61
6.5 Condiciones de frontera .....	62
6.6 Parámetros hidrogeológicos .....	63
6.6.1 Recarga .....	63
6.6.1 Conductividad hidráulica .....	63
6.7 Observaciones .....	65
6.8 Entradas de fluido geotérmico (Agua caliente) .....	67
6.9 Estimación de parámetros .....	68
6.10 Salidas modelo numérico hidrogeológico .....	72
6.10.1 Salidas MODPATH .....	76
7. Conclusiones .....	79
Bibliografía .....	82

## Índice de figuras

2.1	A) Ubicación de la zona de estudio. B) Mapa de la zona de estudio, se muestran las ubicaciones de los principales manantiales y localidades. Imagen Sentinel (Recorte de la figura 3.5).	11
2.2	Geología superficial de la zona de estudio, (modificada de García-Palomo, 2018).	12
2.3	Ubicación temporal de las 15 unidades geológicas descritas por García-Palomo (2002), (tomada de García-Palomo, 2002).	13
2.4	Geología superficial de la caldera de Acoculco (modificada de Avellán, 2020).	15
2.5	Sección estratigráfica de las unidades volcánicas que forman la caldera de Acoculco, (tomada de Avellán, 2019).	16
2.6	Columna litológica del pozo EAC-1 (tomada de López-Hernández, 2009).	17
2.7	Mapa de geología estructural de la zona de estudio, (modificada de García-Palomo, 2018).	19
2.8.	Cuencas en las que se encuentra la zona de estudio	20
2.9	Mapa de precipitación de la zona de estudio.	21
3.1	Mapa de anomalías residuales de Bouguer modificado de García-Palomo et al. (2017).	25
3.2	Mapa del campo magnético reducido al polo tomada de Avellán et al (2020), superpuesto en un DEM de la región de la caldera de Acoculco. Los puntos negros representan los pozos de CFE.	28
3.3	Modelo digital de elevación clave e14b13me (recuperado de INEGI, 2020).	30
3.4	Imagen Sentinel número de registro T14QN, banda 4 “Red”.	31
3.5	Composición a color bandas 432, imagen número de registro T14QN.	32
4.1	Composición a color bandas 432, imagen número de registro T14QN.	34
4.2	Mapa de distribución de los tipos de alteración hidrotermal dentro de la caldera de Acoculco (modificado de Canet et al., 2015).	35
4.3	Composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta\text{D}$ las muestras de agua recolectada de los manantiales. Al-Alcaparroza, Ch-Chignahuapan, Az-Los Azufres, Ji-Jicolapa, Ri-El Rincón, Cf-Cuadro Fierro, Qu-Quetzalapa (tomada de Peiffer, 2014).	38
5.1	Representación gráfica del modelo conceptual del sistema hidrogeológico de Acoculco.	43
5.2	Diagrama de flujo que muestra en resumen el procedimiento de elaboración del modelo geométrico geológico.	44
5.3	Modelo digital integral de información geológica y geofísica (MED, interface entre estratos geológicos, información estructural, información geofísica).	45

5.4	Vista del Graben de Chignahuapan en el modelo geométrico digital de la zona de estudio. Las fallas de Apan-Tláloc, Manzanito, Chignahuapan y Axaxalpan se encuentran señaladas en color rosa.	46
5.5	Perfil litológico de la caldera de Acoculco (modificada de Avellán, 2020).	48
5.6	Vista de perfil litológico donde se observan las capas que componen el modelo geométrico la caldera de Acoculco y que deja ver las fallas a profundidad.	50
5.7	Fallas más importantes representadas en el modelo digital integral.	52
5.8	Área que abarca el modelo numérico hidrogeológico de flujo dentro del dominio total de la zona de estudio.	54
6.1	División de la capa 1 de acuerdo a la litología.	56
6.2	A) Representación en planta de las celdas activas e inactivas del modelo numérico. B) Representación en 3D de las celdas activas del modelo.	58
6.3	Ubicación de la frontera de flujo constante.	59
6.4	Zonas de recarga del modelo.	60
6.5	Conductividad hidráulica del modelo en las tres primeras capas.	61
6.6	A) Ubicación de las observaciones de carga hidráulica dentro del modelo. B) Perfiles topográficos dentro del modelo.	63
6.7	Ubicación de los puntos donde se ubica la entrada de fluido geotérmico.	64
6.8	Diagrama del proceso general de calibración de modelos (modificado de Hill y Tiedeman 2007).	65
6.9	Valores de carga hidráulica observados contra simulados para la primera prueba.	66
6.10	Sensibilidades escaladas compuestas de la primera prueba.	68
6.11	Comparación de los valores de carga hidráulica observados contra simulados para la simulación final.	71
6.12	Mapa de isolíneas de carga hidráulica del modelo de flujo.	72
6.13	Líneas de flujo calculadas por MODPATH para la capa 3.	74
6.14	Líneas de flujo calculadas por MODPATH para la capa 2.	75
6.15	Representación 3D de las líneas de flujo calculadas por MODPATH.	75

### **Índice de tablas**

2.1	Principales fallas presentes en la zona de Apan-Acoculco (tomada de García-Palomo, 2018).	18
2.2	Estaciones meteorológicas reportadas por el Servicio Meteorológico Nacional.	22
4.1	Concentraciones de elementos disueltos y $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta\text{D}$ en aguas de Acoculco. Las concentraciones se reportan en mg/L, (modificado de Peiffer, 2014).	39



4.2 Composición química de los gases de Acoculco (tomada de Peiffer, 2014).	40
4.3 Proporción del flujo de CO <sub>2</sub> de las poblaciones A y B con el flujo promedio y el rango de flujo, (modificada de Peiffer, 2014).	40
5.1 Propiedades físicas e hidrológicas de las rocas correspondientes a las capas del modelo geométrico geológico (Canet et al., 2015; Avendaño Cortes, 2017; Colombier et al., 2017; Lewis et al., 2006; Singhal et al., 2008).	47
6.1 Propiedades hidrológicas de las rocas correspondientes a las capas del modelo numérico (Canet et al 2015; Avendaño Cortes, 2017; Colombier et al, 2017; Lewis et al, 2006; Singhal et al, 2008).	57
6.2 Valores de carga hidráulica de las 14 observaciones estimadas.	62
6.3 Valores de carga hidráulica para la primera corrida del modelo.	67
6.4 Valores de los parámetros de recarga y de conductividad hidráulica para el modelo numérico.	69
6.5 Valores de cargas hidráulicas observadas y simuladas para la simulación final.	70
6.6 Balance hídrico de la última simulación.	73

## Resumen

En esta investigación se desarrolló un modelo integral geométrico que caracteriza la estructura interna del sistema geotérmico de la zona de Acozulco con base en todos los estudios previos de geofísica, geología, hidrogeología y geoquímica. Posteriormente, mediante un modelo de flujo en estado estacionario del graben de Chignahuapan se estudió la posible relación de las manifestaciones termales superficiales localizadas en la localidad de Chignahuapan, fuera del perímetro de la caldera.

Para elaborar, tanto el modelo geométrico estructural como el modelo de flujo, fue necesario concebir el funcionamiento del sistema hidrogeológico desde un enfoque holístico, lo cual se realizó mediante la integración de los estudios geológicos, geofísicos, geoquímicos y geohidrológicos que se encontraban disponibles y de libre acceso en línea.

Las herramientas computacionales como *QGIS*, *Voxler* y *Surfer* se utilizaron para el tratamiento, integración y representación en 3D de la información recopilada. Por otro lado, el software *MODFLOW 2005*, fue utilizado para la simulación del modelo de flujo.

Mediante la interfaz gráfica *ModelMuse*, se elaboró el modelo de flujo en estado estacionario de la zona del Graben de Chignahuapan, que fue seleccionado debido a las evidencias superficiales que indican una mayor actividad hidrotermal en esta zona y también para comprobar la dirección del flujo geotérmico proveniente de la caldera.

Por medio de la representación gráfica en 3D de las líneas de flujo, se sugiere que es posible la existencia de un flujo geotérmico, a través de la capa de calizas, desde la Caldera de Acozulco hacia los alrededores de la misma, en particular en el graben Chignahuapan.

Como conclusión de este trabajo podemos decir que el sistema hidrogeológico dominante para flujos geotérmicos son los sistemas de fallas en la caldera y sus alrededores.

## **Capítulo I**

### **Introducción**

#### *Antecedentes*

Actualmente México genera más del 80 % de su energía eléctrica por medio de hidrocarburos (balance nacional de energía, 2018) lo que produce grandes cantidades de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero que agravan el problema ambiental que se vive actualmente. Por esto, el uso de energías “limpias” es un asunto primordial hoy en día.

La energía geotérmica es considerada como una energía limpia debido a la poca cantidad de gases contaminantes originados durante su aprovechamiento, comparada con la utilización de hidrocarburos. México está incluido en la lista de países que tienen una gran capacidad de producir este tipo de energía. A nivel mundial se encuentra en el sexto puesto de producción de energía geotérmica con una producción de 958 MW (Hiriart, 2011).

El territorio mexicano se divide en 11 provincias geotérmicas (Prol-Ledesma y Morán, 2019). En la provincia correspondiente a la faja volcánica transmexicana (FVTM) existe un gran número de campos geotérmicos debido a la intensa actividad volcánica de edad reciente; dos ejemplos de campos que se encuentran en aprovechamiento dentro de esta zona son Los Humeros en Puebla y Los Azufres en Michoacán.

La caldera de Acoculco se encuentra dentro de la FVTM, y es considerado uno de los sitios con mayor prospección de capacidad de producción de energía geotérmica (Hiriart, 2011). Prueba de ello son las múltiples manifestaciones hidrotermales que se encuentran dentro de la caldera y alrededor de ella. A pesar de esto, las investigaciones que se han llevado a cabo no han encontrado evidencia suficiente

de que existan las condiciones necesarias para el establecimiento de una planta de generación de energía eléctrica.

El principal inconveniente es la baja permeabilidad de las rocas en estratos superiores, puesto que impiden el ascenso del fluido termal. Sin embargo, el manantial de agua termal de Chignahuapan a 20 km al sur de Acoculco, podría estar relacionado con la existencia del flujo subterráneo profundo proveniente del sistema geotérmico de Acoculco hacia el Graben de Chignahuapan.

Para poder establecer con mayor certeza las capacidades de producción geotérmica de la zona y su posible relación con las manifestaciones de los manantiales termales de Chignahuapan, es necesario realizar modelos numéricos que por una parte reproduzcan la situación actual de las estructuras geológicas y por la otra permitan establecer un modelo de la circulación de fluidos geotérmicos en profundidad, considerando la integración de todos los estudios previos: geofísicos, geológicos, geoquímicos y de información remota, siendo este aspecto lo que motiva la realización de la presente tesis.

## **Objetivo**

El objetivo general de la tesis es realizar un modelo integral geométrico de la estructura interna de la caldera de Acoculco, teniendo en cuenta toda la información geológica, geofísica, geoquímica e hidrogeológica de la zona, y además reproducir el comportamiento hidrogeológico de las manifestaciones termales observadas en el graben de Chignahuapan.

## **Justificación**

Como se mencionó en los antecedentes, necesitamos establecer con mayor certeza las capacidades de producción geotérmica de la caldera de Acoculco y su posible relación con las manifestaciones de los manantiales termales de Chignahuapan. Tanto en hidrogeología y como en geotermia la elaboración de modelos

matemáticos es una herramienta imprescindible para la simulación del funcionamiento de un sistema real.

La integración de la información es un proceso necesario para la elaboración de dichos modelos, debido a que, a través de este procedimiento es posible incorporar los datos más relevantes de cada campo (geología, geoquímica, geofísica) en la construcción del modelo geométrico, para finalmente poder reproducir de la manera más fidedigna el comportamiento del sistema natural.

Este trabajo se estructura de tal manera que, en los capítulos 2, 3 y 4 se presenta la recopilación, síntesis y discusión de la información previa de la zona de estudio, el capítulo 2 está dedicado a los estudios geológicos e hidrogeológicos, en el capítulo 3 se presentan los estudios geofísicos y el capítulo 4 está dedicado a los estudios geoquímicos y de manifestaciones hidrotermales superficiales. En el capítulo 5 se realiza una descripción detallada de la metodología de construcción del modelo geométrico estructural, a partir de la integración y tratamiento de la información recopilada en los capítulos anteriores.

Finalmente, el capítulo seis presenta el proceso de construcción, los resultados y discusión del modelo numérico de flujo del Graben de Chignahuapan en estado estacionario y en el capítulo siete se presentan las conclusiones de la presente tesis.

## **CAPITULO II**

### **2. Estudios Geológicos.**

Se presenta la recopilación y síntesis de toda la información geológica disponible en la zona. El capítulo está estructurado de tal manera que en cada subtema se exponen y discuten los datos más relevantes para realizar los modelos.

#### ***2.1 Geología superficial***

La región de Apan-Acocolco se encuentra dentro de la parte este de la Faja Volcánica Transmexicana. Se caracteriza por la presencia de un sistema de fallas normales con dirección NE-SW, mediante el cual se ha llevado a cabo toda la actividad volcánica de la región. La zona de estudio del presente trabajo se enfoca en la parte oriental de la región Apan-Acocolco, principalmente en el área de la caldera de Acocolco y en la zona adyacente a esta, debido a que esta zona presenta varias manifestaciones hidrotermales (García-Palomo, 2017). El área que abarca es de 50 km de latitud por 60 km de longitud.

La geología superficial de la zona está dominada por rocas volcánicas pertenecientes a diferentes etapas del vulcanismo que ha ocurrido desde el Mioceno al Pleistoceno. Destaca la presencia del campo volcánico Apan-Tezontepec conformado por 280 conos escoria, 10 volcanes en escudo y 5 domos; compuesto de rocas principalmente basálticas-andesíticas (García-Palomo, 2002).

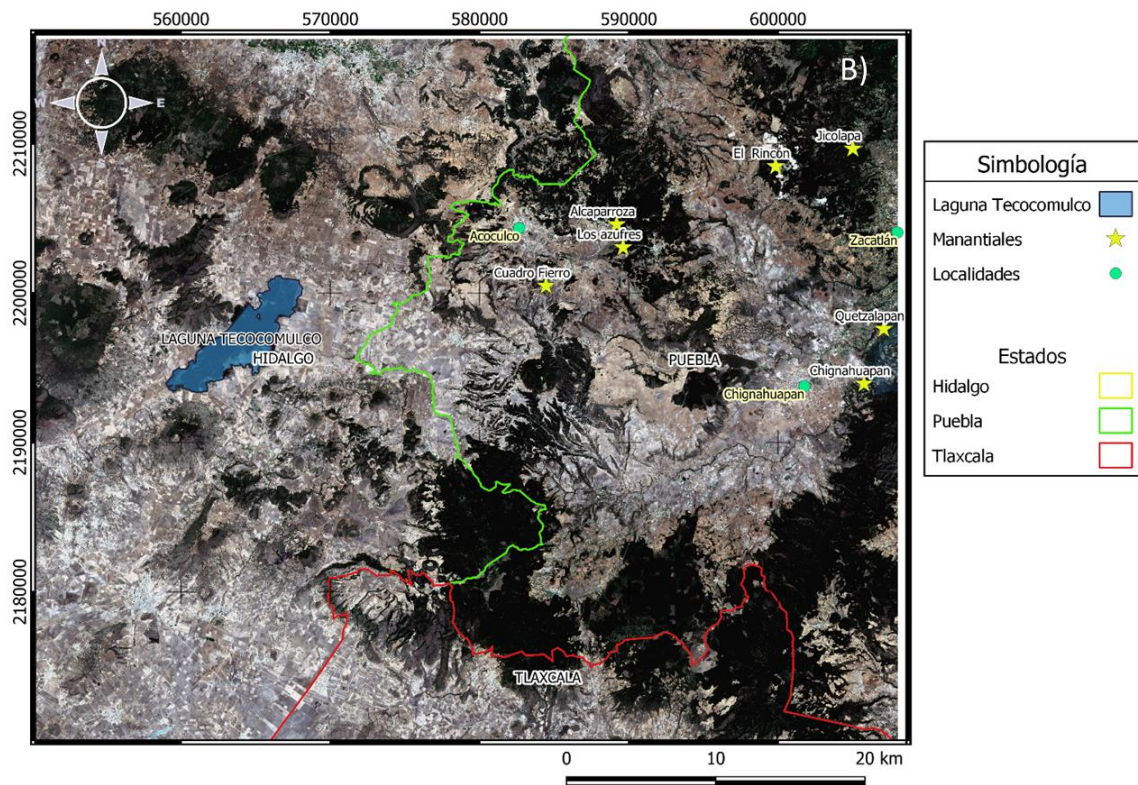
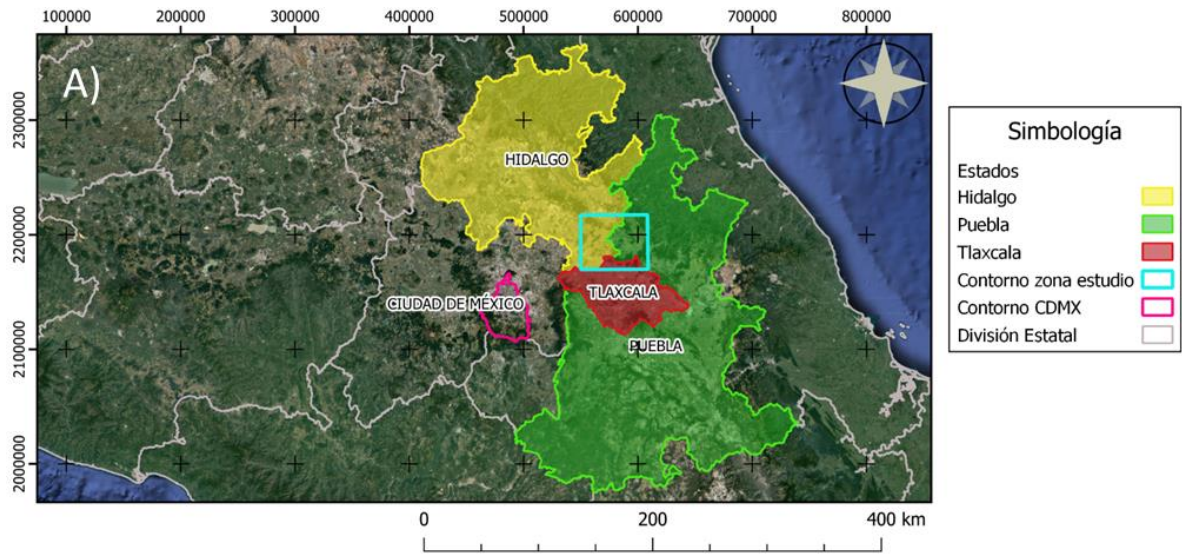


Figura 2.1. A) Ubicación de la zona de estudio. B) Mapa de la zona de estudio, se muestran las ubicaciones de los principales manantiales y localidades. Imagen Sentinel (Recorte de la figura 3.5)

En la zona noreste de la zona de estudio, las rocas que afloran en superficie se relacionan con la formación de la caldera de Acozulco.

Las zonas que están rellenas de sedimentos aluviales y lacustres coinciden con las partes más bajas que forman amplias llanuras, según Huizar Álvarez et al, (2002) estos depósitos tienen un espesor aproximado de 600 metros en la zona de la sub-cuenca de Tecocomulco (Fig. 2.8). La llanura con rellenos sedimentarios más amplia se encuentra al suroeste del Horst de Rosario-Acozulco al este de la falla Apan-Tláloc, dentro de esta planicie se encuentran los lagos de San Antonio de Atocha y Atlangatepec (Fig. 2.7).

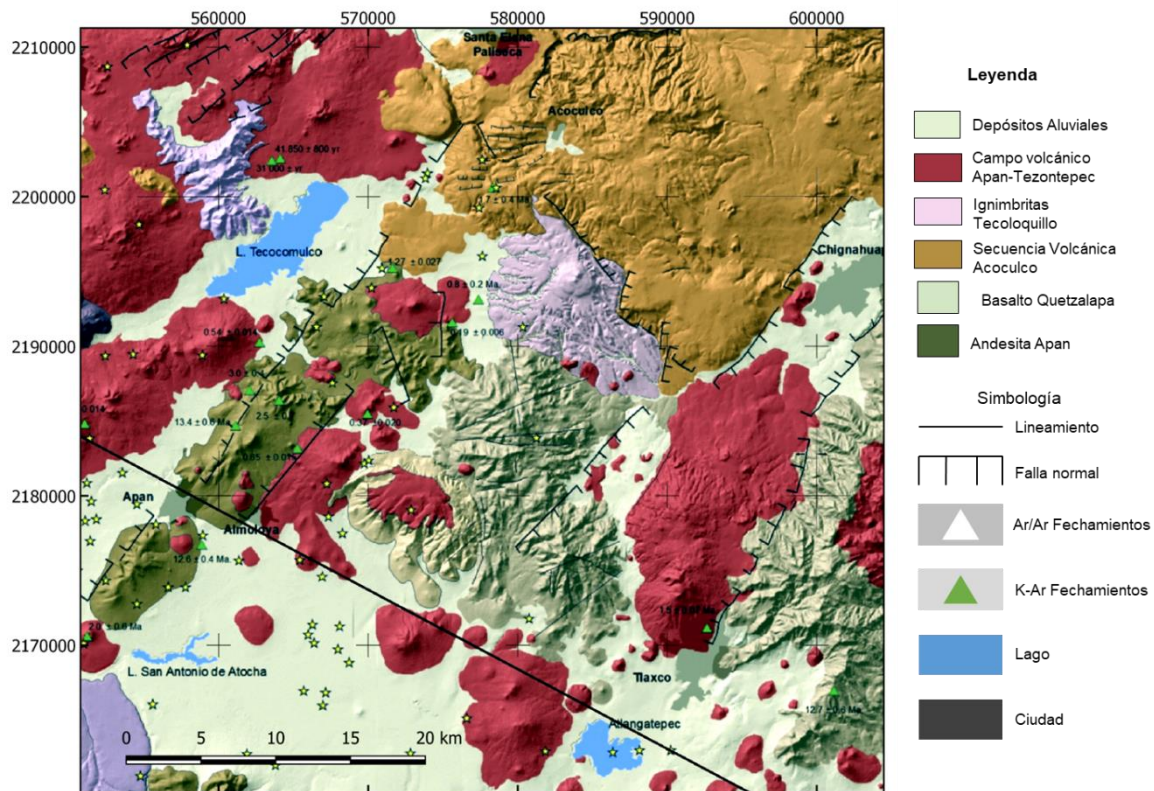


Figura 2.2 Geología superficial de la zona de estudio, (modificada de García-Palomo, 2018).

## 2.2 Estratigrafía

La unidad más antigua del dominio corresponde a calizas del Cretácico, las cuales funcionan como basamento. Sobre el basamento se reconocen 15 unidades estratigráficas descritas ampliamente por García-Palomo et al. (2002). En la figura



2.3, se encuentran representadas las 14 unidades ordenadas temporalmente. Las unidades de mayor importancia para el presente trabajo son la Andesita Apan, Andesita El Peñón, Basalto Quetzalapa, el Campo volcánico de Apan Tezontepec, la secuencia volcánica Acoculco y la Ignimbrita Tecoloquillo.

A. García-Palomo et al.

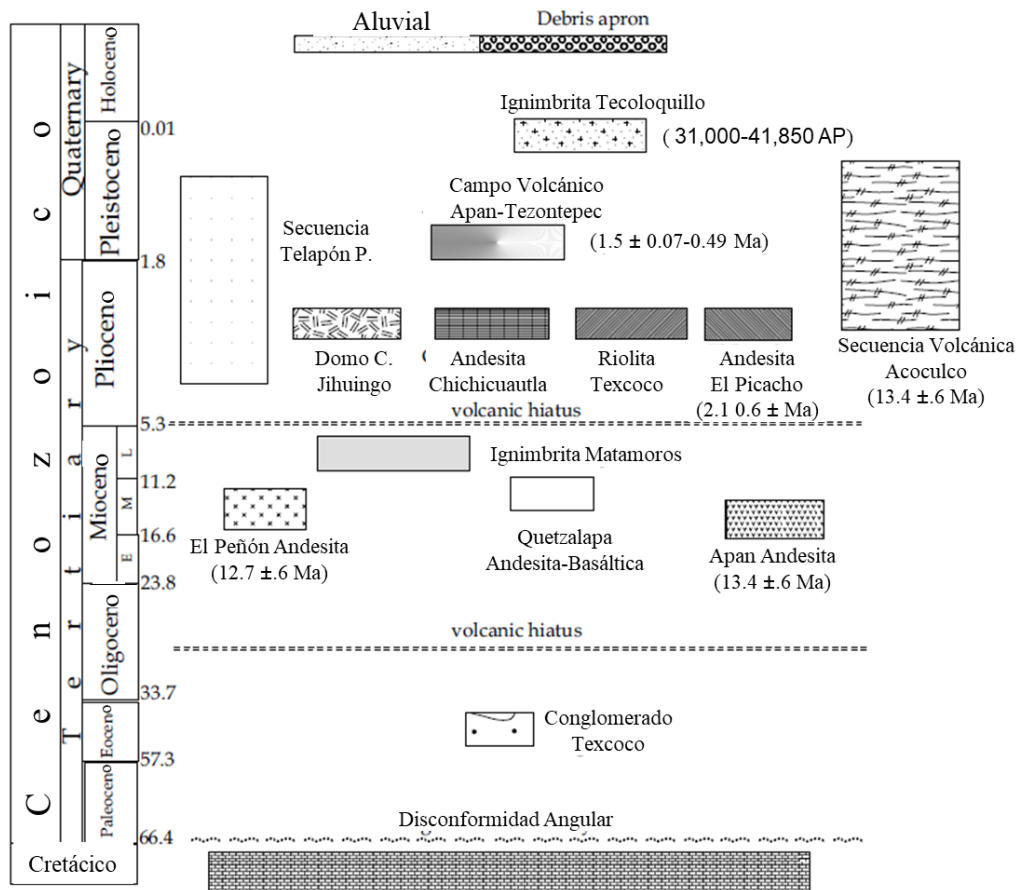


Figura 2.3. Ubicación temporal de las 14 unidades geológicas descritas por García-Palomo (2002).

La unidad Andesita Apan consiste de lavas de composición andesítica intercaladas con brechas compactas, tiene un espesor de entre 850 y 1000 m. La Andesita El Peñón se compone de flujos de andesita intercalados con brechas andesíticas, su espesor varía entre 100 a 700 m (García-Palomo et al., 2002). La unidad de Andesita-basáltica de Quetzalapa está expuesta en el valle del río Axaxalpa, se emplaza sobre rocas calizas del cretácico, se compone de coladas de lava basáltica

con alteración hidrotermal en algunas zonas; cuenta con un espesor de 100 - 200 m cerca de la ciudad de Chignahuapan (Avellán et al, 2019; García-Palomo, 2017; García-Palomo, 2002). El campo volcánico Apan-Tezontepec se compone de 280 conos escoria, 10 volcanes en escudo y 5 domos, su composición es principalmente basáltica-andesítica, las edades de los volcanes van desde hace 2.25 Ma hasta el Holoceno (Fig. 2.3) (García-Palomo, 2017; García-Palomo, 2002).

### ***2.3 Formación de la Caldera de Acoculco***

La caldera se emplaza sobre rocas calizas del cretácico, sobre esta unidad se emplazan 14 unidades estratigráficas volcánicas (García-Palomo, 2017; García-Palomo, 2002; Avellán et al, 2020). El evento eruptivo que dio lugar a la formación de la caldera Acoculco ocurrió hace aproximadamente 2.7 Ma, resultando en el emplazamiento de la unidad de andesitas ignimbríticas Acoculco; posteriormente, debido a la forma de la caldera se depositó una capa de sedimentos lacustres en el centro de la misma; siguiendo a esto, ocurrieron más de 40 eventos eruptivos, que fueron dando la forma actual a la caldera. Los eventos eruptivos fueron ordenados de forma cronológica por Avellán et al. (2019) en cuatro sucesiones, “pre-caldera”, “sin-caldera”, “post-caldera temprana” y “post-caldera tardía”, dichas sucesiones se muestran en la figura 2.5.

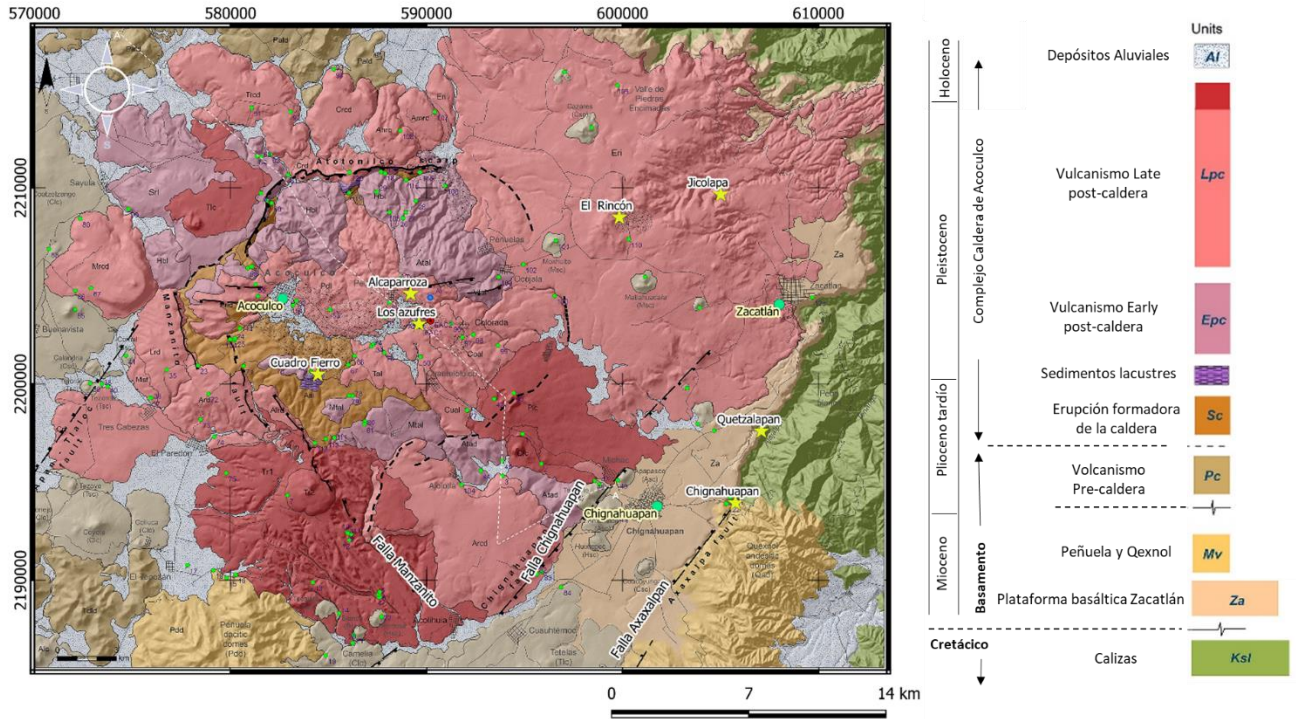


Figura 2.4. Geología superficial de la caldera de Acozulco (modificada de Avellán, 2020).

El anillo que delimita la caldera no es visible en superficie debido a la intensa actividad volcánica que hubo después de su formación, no obstante, es posible establecer la morfología de la caldera identificando las fallas que la rodean: la Falla de Manzanito marca la frontera NW-SE, por su parte norte la caldera se delimita por los altos topográficos pertenecientes a la estructura de Atotonilco, consistente en unidades de rocas basálticas andesíticas y traquiandesíticas; en la parte central de la caldera, cerca de la localidad de Acozulco, se encuentran depósitos sedimentarios de origen aluvial de edad reciente que presentan alteración hidrotermal en su parte norte, correspondiente a las rocas de la estructura de Atotonilco (Fig. 2.4) (Avellán et al., 2019).

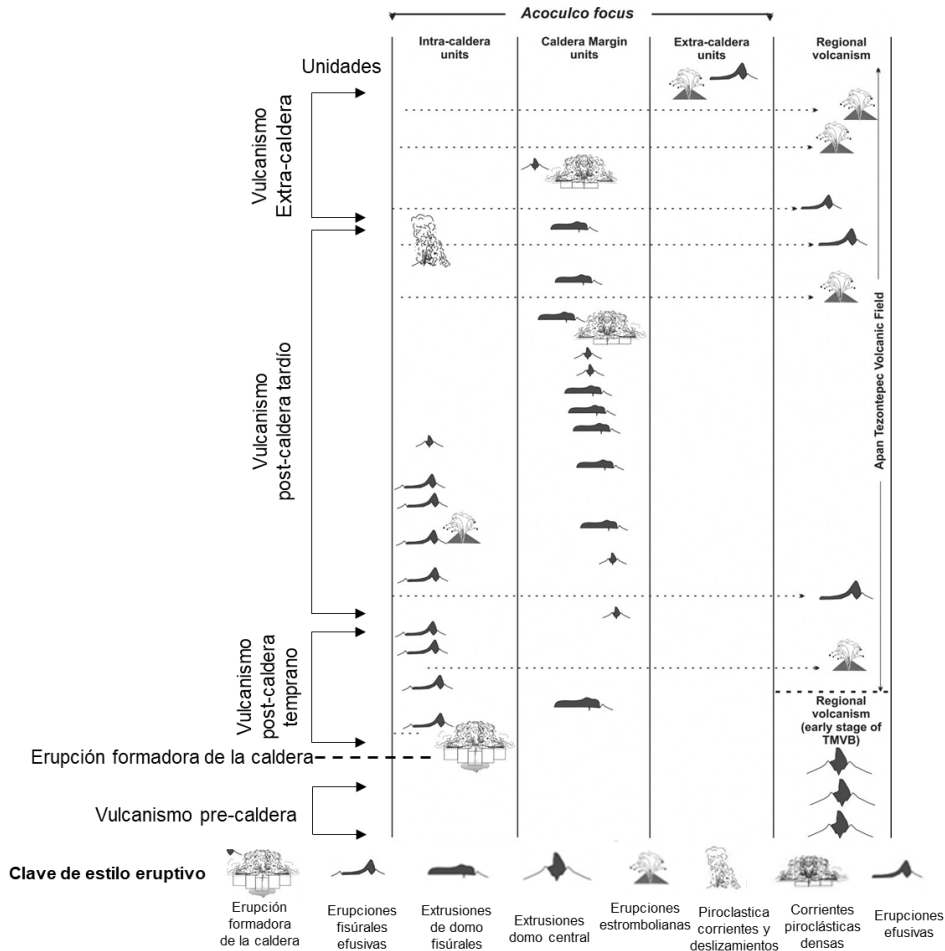


Figura 2.5. Sección estratigráfica de las unidades volcánicas que forman la caldera de Acoculco, (modificada de Avellán, 2019)

## 2.4 Pozos exploratorios

Con la intención de medir las temperaturas del sistema a profundidad, la CFE realizó la perforación de dos pozos de exploración, el primero (EAC-1) en 1995 y el segundo (EAC-2) en 2008, con profundidades de 2000 y 1900 m respectivamente. Debido a que no se tienen manifestaciones de agua con temperatura termal dentro de la caldera, los pozos fueron perforados cercanos a una zona de emanación de gases y de clara alteración hidrotermal en las rocas de la superficie (Viggiano et al., 2011).

El análisis del material volcánico de los primeros 800 m del pozo elaborado por Avellán et al. (2020) difiere del elaborado en un primer momento por López-

Hernández (2009). Avellán (2020) menciona que los primeros 210 metros corresponden a riolitas vesiculares altamente alteradas, mientras que de los 210 a los 580 m se encuentran ignimbritas correspondientes a la unidad Acoculco, dicha unidad equivale a la formación de la caldera.

Avellán et al. (2020), describe tres unidades de menor grosor que se encuentran debajo de la unidad Acoculco, las primeras dos corresponden a dacitas y riodacitas de formación pre-caldera y la tercera unidad son rocas basálticas pertenecientes a la unidad Zacatlán

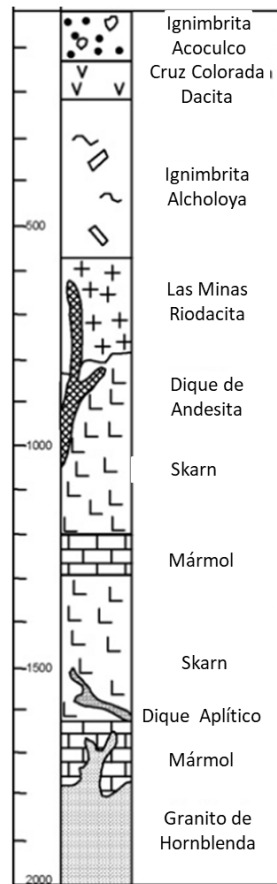


Figura 2.6. Columna litológica del pozo EAC-1 (modificada de López-Hernández, 2009).

Las unidades subyacentes corresponden principalmente a rocas calizas del Cretácico, dentro de esta unidad se observa también una secuencia de rocas metamórficas (skarn y mármol) que son producto de la interacción de las rocas calizas con cuerpos intrusivos, los cuales están representados en la columna

litológica de la figura 2.6 (Avellán, 2020). La última unidad descrita de la columna litológica es una capa de granito, la cual se asume como el cuerpo intrusivo que alimentó al sistema geotérmico.

La descripción detallada de la columna estratigráfica, elaborada a partir de las muestras recuperadas del pozo EAC-1, se realizó por López-Hernández et al. (2009), (Fig. 2.6.).

## 2.5 Geología Estructural

La región de Apan-Acocolco se caracteriza por la presencia de seis grandes sistemas de fallas normales con dirección NE-SW, llamadas Axaxalpa, Apan-Tlálloc, Texcoco, Tizayuca y Tolcayuca (García-Palomo et al., 2018).

El área de estudio se encuentra al este de la falla Apan-Tlálloc, la cual es la de mayor longitud y divide la región Apan-Acocolco en dos áreas de características estructurales distintas, la parte oriental está dominada por bloques con geometría en dominó y por los bloques Rosario-Acocolco y Chignahuapan, por otro lado, el sector occidental presenta una geometría horst-graben con vulcanismo monogénético del cuaternario y afloramientos de rocas del Mioceno y Plioceno (García-Palomo et al; 2018).

Nombre	Dirección/Buzamiento	Dimensión largo/ancho	Salto de falla (m)	Relieve estructural
Axaxalpa	N25°E/80°NW	17/3	500	600
Apan-Tlálloc	N40°E/81°NW	25/4.6	1500	400
Texcoco	N40°E/80°NW	15/2	>2000	350
Tizayuca	N35°E/81°NW	50/10	2400	desconocido
Tolcayuca	N40°E/80°SE	12/4	2400	250

Tabla 2.1. Principales fallas presentes en la zona de Apan-Acocolco (tomada de García-Palomo, 2018).

Las fallas que se encuentran dentro del área de interés son la falla Apan-Tlálloc, falla Axaxalpa, falla Chignahuapan y la falla Manzanito (Fig. 2.7) (García-Palomo et al., 2018, Avellán et al; 2019). García-Palomo et al. (2018) realizó un profundo análisis

estructural del área mediante trabajo de campo, imágenes satelitales, datos gravimétricos y modelos digitales de elevación; en él detalla la dirección de extensión de las fallas principales, así como la profundidad de las mismas, las cuales se encuentran especificadas en la tabla 2.1.

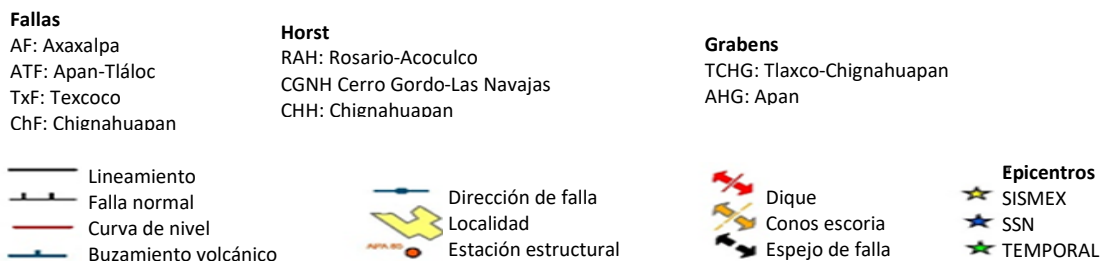
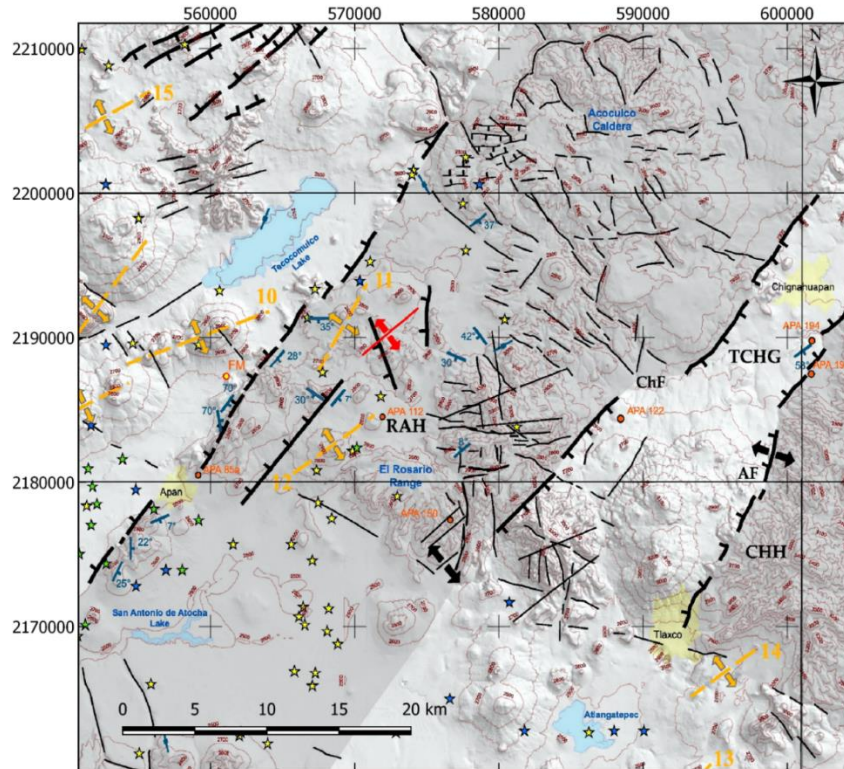


Figura 2.7. Mapa de geología estructural de la zona de estudio, (modificada de García-Palomo, 2018).

El análisis de los estudios de gravimetría, alineamientos de cono y orientación de estructuras, señalan que las fracturas provocan una geometría de tipo horst-graben. En el área de estudio se encuentran los horst de Rosario-Acozulco y Chignahuapan, y el graben de Tlaxco-Chignahuapan (Fig. 2.7) (García-Palomo et al, 2018; García-Palomo et al, 2002).

La caldera de Acoculco se ubica en la parte noreste del horst Rosario-Acoculco (Fig. 2.7). La afectan tres sistemas de fallas de dirección NE-SW, NW-SE y E-W. Las fallas con dirección NE-SW y NW-SE pertenecen a los sistemas de fallas regionales presentes en la región. La estructura de Manzanito es la más representativa del sistema con dirección NW-SE, se extiende por 30 km desde la parte noroeste de la caldera hasta la parte sur de la caldera por medio de una serie de fallas normales que forman un arreglo en escalón (Avellán et al, 2020). La falla de Apan-Acoculco pertenece al sistema NE-SW. Las fallas normales con dirección E-W solo son visibles dentro de la caldera (López-Hernández, 2009).

## 2.6 Hidrogeología

La mayor parte del área de estudio se encuentra en el dominio de cuatro subcuencas: Tecocomulco, Río Laxaxalpan, Río Necaxa y Río Metztitlán (Fig. 2.8).

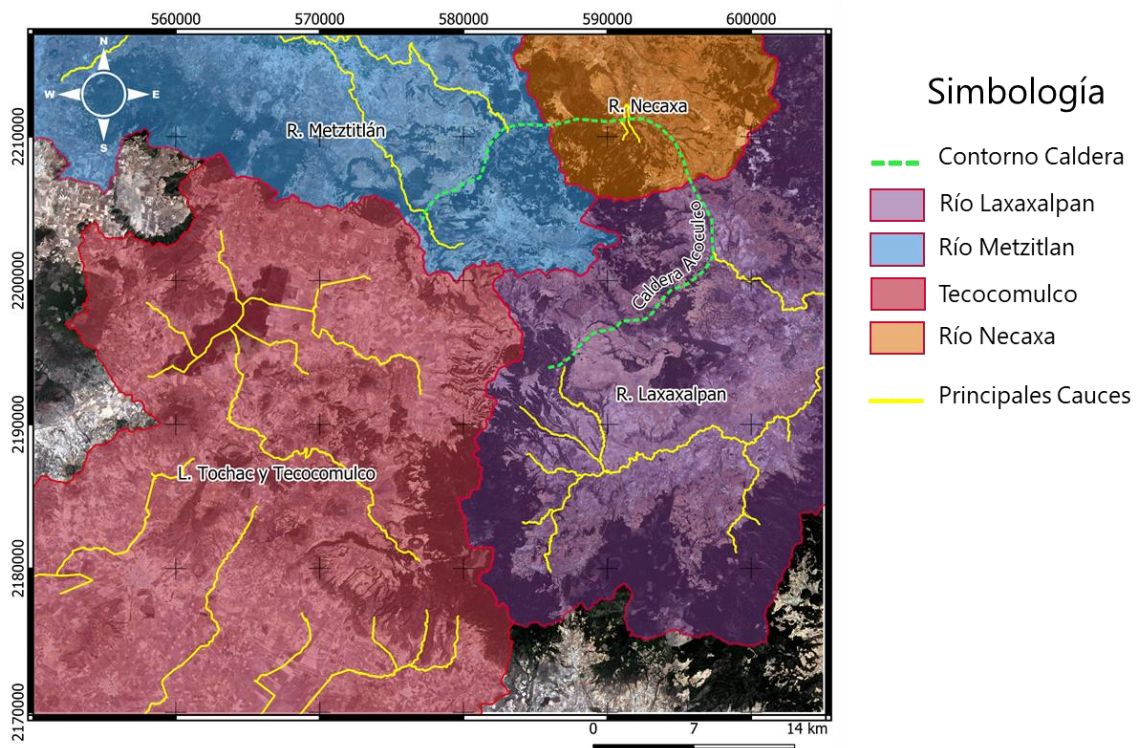


Figura 2.8. Cuencas en las que se encuentra la zona de estudio.



La subcuenca de Tecocomulco abarca toda la zona oeste y suroeste del área. Huízar Álvarez et al. (2001) realizó una descripción detallada de los principales rasgos hidrológicos e hidrogeológicos de esta subcuenca. Esta presenta un drenaje endorreico, con cuatro cauces principales que desembocan en la laguna de Tecocomulco. El caudal medio anual de la cuenca para el período de 1980 a 1996 fue de 4098 m<sup>3</sup> con tendencia positiva. La precipitación media anual es de 779.2 mm. La temperatura media anual es de 13.5 C. El valor más alto se registra en el mes de mayo con 30°C y el valor más bajo en enero con -4°C. En cuanto a la evapotranspiración presenta una media anual de 550 mm y una máxima mensual de 114 mm durante mayo.

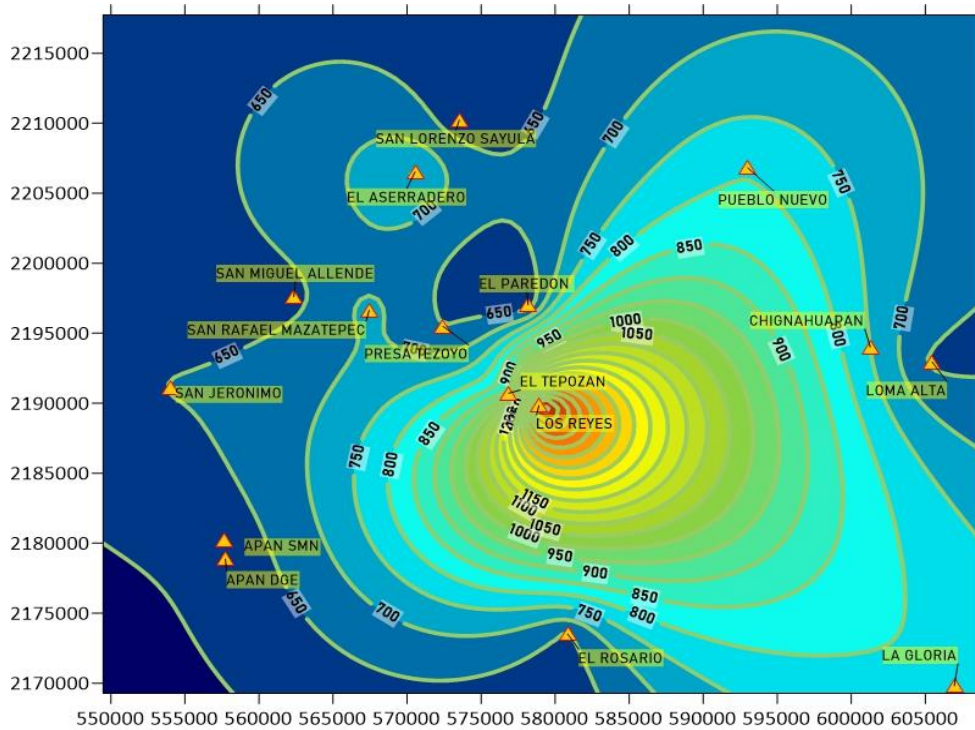


Figura 2.9. Mapa de precipitación de la zona de estudio.

La subcuenca del río Metztlán abarca la parte norte del área de estudio. Cuenta con un drenaje de tipo endorreico. Dentro de la región de interés, la cuenca tiene un clima templado subhúmedo con una temperatura promedio anual de 13.1 °C, la precipitación media anual según el mapa de la Fig. 2.9 varía de los 630 a los 710 mm. Cabe mencionar que, solamente el 15% del área total de la cuenca se

encuentra dentro del área de estudio, dentro este dominio se encuentra la Caldera de Acoculco.

En la subcuenca Río Laxaxalpan se ubica la Ciudad de Chignahuapan. El caudal principal de la subcuenca es el río Laxaxalpan, el cual nace del Cerro del Peñón del Rosario en Tlaxcala, su curso general es hacia el noreste. La corriente pasa 20 km al suroeste de la ciudad de Chignahuapan. El balneario de aguas termales Chignahuapan se ubica a las orillas del mismo (UACH-INE, 2002). La temperatura media anual reportada por la estación meteorológica Chignahuapan para un período de (1981-2010) fue de 12.7°C, la temperatura máxima de 19.6°C y la menor de 5.9°C. La precipitación media anual para el mismo período de tiempo fue de 749 mm.

El mapa de precipitación de la zona de estudio se realizó con base en datos reportados por el Servicio Meteorológico Nacional mediante las normales climatológicas de las estaciones meteorológicas que se muestran en la tabla 2.2.

<b>ESTACIONES METEOROLÓGICAS</b>				
<b>NOMBRE</b>	<b>FECHA DE MUESTREO</b>	<b>UTM X</b>	<b>UTM Y</b>	<b>PRECIPITACION MEDIA ANUAL</b>
CHIGNAHUAPAN	1981-2010	601282.4	2194004.5	749.9
EL PAREDON	1971-2000	578172	2197022.8	618.2
PUEBLO NUEVO	1981-2010	593011.4	2206809.3	795.7
EL ASERRADERO	1981-2010	570543.1	2206520.3	755.2
SAN LORENZO SAYULA	1981-2010	573521.6	2210221.4	617.5
SAN RAFAEL MAZATEPEC	1981-2010	567441.7	2196640.4	713
EL TEPOZAN	1981-2010	576861.5	2190715.2	910.5
PRESA TEZOYO	1981-2010	572419.7	2195492	650.3
APAN DGE	1981-2010	557727.5	2178869.2	618.2
APAN SMN	1971-2010	557635.8	2180221.5	620.3
SAN JERONIMO	1981-2010	554022.1	2191122.6	651.7
SAN MIGUEL ALLENDE	1971-2000	562348.7	2197605.4	635.4
EL ROSARIO	1981-2000	580838.3	2173518.1	644.1
LA GLORIA	1981-2010	606955.1	2169812.6	793.9
LOMA ALTA	1981-2010	605448.7	2192952.9	641.4
LOS REYES	1971-2000	578902	2189832.7	1701.5

Tabla 2.2. Estaciones meteorológicas reportadas por el Servicio Meteorológico Nacional.

## Capítulo 3

### 3. Estudios Geofísicos

En este capítulo se muestran todos los estudios geofísicos realizados previamente en la zona. Los estudios aquí presentados incluyen estudios gravimétricos, magnéticos y de percepción remota.

La recopilación, discusión e integración de esta información es importante ya que mediante los estudios gravimétricos y magnéticos se puede conocer hasta que profundidad se prolongan las estructuras geológicas de la zona. Por otra parte, el modelo digital de elevación es la base sobre la cual se construyen los modelos estructural y numérico.

#### **3.1 Caracterización estructural de la región**

El área de Apan-Acocolco se caracteriza por la presencia de una serie de fallas regionales de orientación NE-SW. La zona de estudio comienza a partir de la falla Apan-Tlálloc la cual divide el área de Apan–Acocolco en dos zonas. Las 3 fallas regionales presentes en la zona de estudio son la falla Apan-Tlálloc, la falla de Chignahuapan y la falla de Axaxalpa. Las fallas han estado activas desde el Plioceno tardío. Estas han servido para facilitar el ascenso del magma que propició el vulcanismo monogénético en el área (García-Palomo et al., 2017).

La caldera de Acocolco se encuentra en la parte norte del Horst de Rosario-Acocolco, entre las fallas de Apan-Tlálloc y la falla de Chignahuapan. Como consecuencia de ubicarse en un horst, la caldera de Acocolco se encuentra a una altitud mayor con respecto a la ciudad de Chignahuapan que se encuentra ubicada dentro del graben Tlaxco-Chignahuapan, la evidencia geológica de esta diferencia de altura es el afloramiento de rocas calizas del cretácico en la ciudad de Chignahuapan, mientras que las mismas calizas se encontraron a 1200 y 800 m de profundidad en el pozo EAC1 (López-Hernández, 2009). Hacia el oeste, a menor altitud con respecto a la caldera, se encuentra el lago de Tecocomulco.

Delimitando la parte suroeste de la caldera se encuentra la falla de Manzanito la cual pertenece al sistema de fallas regional de Tulancingo Tlaxco. Continuando hacia el sur se extiende un conjunto de elevaciones por encima de los 2800 m, las cuales son afectadas por una serie de fracturas entre 3 y 5 km de largo, paralelas a la falla de manzanito, con dirección perpendicular a las fallas regionales de Apan-Acocolco y Chignahuapan.

### **3.2 Métodos gravimétricos**

El mapa de anomalías residuales se obtuvo a partir de una separación regional-residual utilizando un método espectral del mapa de anomalías totales de Bouguer publicado por García-Palomo et al., 2017. Este método usa un ajuste bidimensional de Fourier para separar estructuras de menos de 10 km. El mapa de la publicación original cubre un área de aproximadamente 5000 km<sup>2</sup>, las coordenadas límites en UTM son: 501000, 2156050 para la esquina inferior izquierda y 604600, 2211730 para la esquina superior derecha. De la totalidad del área del mapa original, la información de interés para esta tesis se encuentra al este de la falla Apan-Tlálloc.

Para realizar el análisis de la zona de interés, se recortó el mapa original. Para llevar a cabo este procedimiento se georreferenció el mapa original. En este primer paso se realizó la corrección de las coordenadas originales del mapa puesto que se encontraban duplicadas, para ello estas se compararon con las de otro mapa ya georreferenciado, una vez georreferenciado el mapa este se recortó mediante el software QGIS. Las coordenadas UTM del mapa recortado son: 550120, 2160000 para la esquina inferior izquierda y 605100, 2211700 para la esquina superior derecha.

El autor presenta 3 mapas de anomalías de Bouguer: un mapa de anomalías completas, uno de anomalías regionales y uno anomalías residuales en una misma figura, por ello el mapa de anomalías residuales tiene una resolución limitada, lo cual dificultó el análisis de las anomalías.

Por otro lado, la descripción del autor se concentraba específicamente en los mapas de anomalías completas y anomalías regionales de Bouguer ya que para fines de su estudio estas representaban mayor interés. Por lo tanto, en esta tesis se realizó el análisis de las anomalías presentes en el mapa de anomalías residuales (Fig. 3.1).

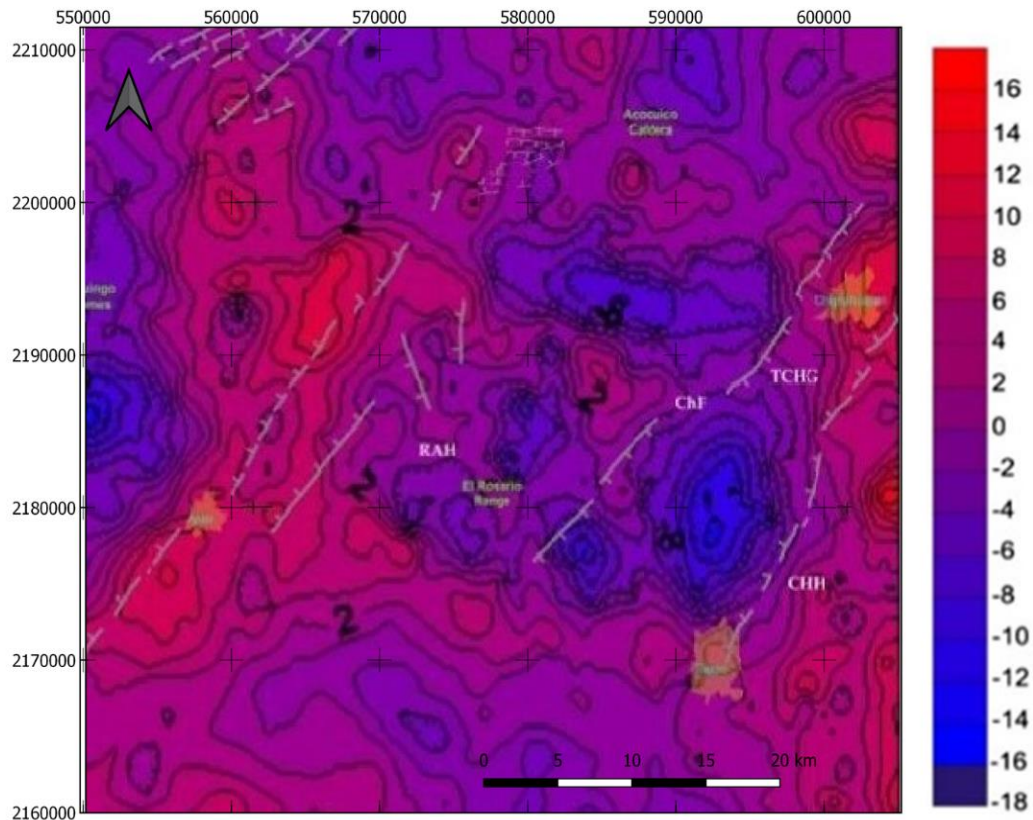


Figura 3.1. Mapa de anomalías residuales de Bouguer (modificado de García-Palomo et al. 2017).

En la parte oeste del dominio (Fig. 3.1), se observa una anomalía irregular que se extiende en dirección NE-SW a lo largo de una parte de la falla Apan-Tláloc y hacia el norte hasta la altura del lago de Tecocomulco. Dentro de esta gran anomalía se encuentran dos más pequeñas con valores por encima de los 6 mGal. La primera se encuentra al sur del lago de Tecocomulco, mide 8.8 km de largo por 3.8 km de ancho con valores de 10 mGal. La segunda anomalía se encuentra al suroeste de

la ciudad de Apan, mide 7.7 km de largo por 5.4 km de ancho, tiene valores de 8 a 10 mGal. Este par de anomalías pueden estar relacionadas con la falla Apan-Tlálloc.

En la zona suroeste del graben de Chignahuapan, entre las fallas de Chignahuapan y Axaxalpa se ubica una anomalía negativa con orientación Norte-Sur, mide 9 km de largo por 4.2 km de ancho, con valores de -8 a -14 mGal. Los valores cambian abruptamente en ambos bordes de la anomalía que se extienden a lo largo de las fallas. Al oeste de esta anomalía se encuentra una más pequeña igualmente negativa, mide 5.4 km de largo por 3 km de ancho, con valores de -6 a -8 mGal.

En la parte central del horst Rosario-Acocolco, al sur de la caldera de Acocolco existen una serie de anomalías positivas y negativas entre 4 y -8 mGal. La primera se encuentra en el límite sur de la caldera de Acocolco tiene orientación E-W, mide 17 km de largo por 5 km de ancho, va desde la falla de Chignahuapan hasta la falla de Apan-Tezontepec el valor de la anomalía va desde -2 hasta -8 mGal. La ubicación de esta anomalía coincide con la falla de Manzanito, la cual delimita la parte sur de la caldera de Acocolco. Al sur de la anomalía anterior se encuentra una anomalía positiva de 5.7 km de largo por 3.2 km de ancho. La siguiente es una anomalía negativa, se encuentra 2 km al sureste de la descrita anteriormente, mide 5 km de ancho por 6 km de largo, tiene valores desde -4 a -8 mGal. Finalmente, en la parte sur del Horst Rosario-Acocolco se encuentran una zona de contraste donde los valores de anomalía cambian rápidamente de -4 mGal a 6 mGal, las isolíneas que marcan el cambio van en dirección NW-SE y miden aproximadamente 11.8 km.

Estos cambios en los valores de las anomalías están relacionados con el gran número de fallas y fracturas que se encuentran en esta región.

### **3.2 Métodos magnéticos**

En la imagen 3.2 se muestra el mapa aeromagnético de la región de la caldera de Acocolco, el mapa fue publicado por Avellán et al, (2019), a partir del procesamiento de la base de datos del Servicio Geológico Mexicano. El autor realizó la descripción detallada de las anomalías ubicadas dentro de la caldera y la relación que estas

tienen en la evolución eruptiva de la caldera, sin embargo, para el objetivo de esta tesis se realizó el análisis de las anomalías al sur de la caldera.

En el mapa de la figura 3.2 se observan 4 anomalías positivas dentro de la caldera de Acozulco, la geometría de estas anomalías fue descrita por Avellán et al (2019). La primera anomalía se ubica en la parte central de la caldera, está orientada al noreste, sus dimensiones son 9.7 km de largo y 4.8 km de ancho con intensidades magnéticas entre  $-81.8$  y  $57.8$  nT. La segunda anomalía se localiza a las afueras del límite sureste de la caldera, con orientación oeste-noreste, tiene dimensiones de 6.6 km de largo y 4.1 km de ancho con intensidades magnéticas entre  $-135.1$  y  $25.7$  nT. La tercera anomalía se encuentra en la parte sur de la caldera, está orientada al noreste, sus dimensiones son de 8.9 km de largo y 3.5 km de ancho con intensidades magnéticas entre  $-64.5$  y  $36.5$  nT. La cuarta anomalía se encuentra al oeste de la caldera, está orientada al noroeste, tiene 5.4 km de largo y 3 km de ancho, sus intensidades magnéticas varían entre  $84.5$  y  $-2$  nT.

Las anomalías descritas anteriormente sugieren la presencia de cuerpos intrusivos que se formaron posteriormente al colapso de la caldera, la intrusión de estos cuerpos magmáticos pudo haber tenido un importante rol en el establecimiento y mantenimiento del sistema geotérmico activo (Avellán et al., 2019).

Además de encontrar estas anomalías al centro de la caldera, se observa un contraste bastante marcado entre los valores de intensidad magnética dentro de la caldera y los valores fuera de ella.

Existe un conjunto de anomalías negativas que están al sur, fuera de la caldera. Algunas de ellas, coinciden con el graben donde se ubica la ciudad de Chignahuapan. Se pueden ubicar seis anomalías con los valores más bajos, pero son tres las anomalías que son de mayor tamaño. Dos de ellas se ubican fuera del graben, la primera se encuentra al oeste del conjunto de anomalías, tiene una orientación norte-sur y sus dimensiones son 5.5 km de largo por 1.8 km de ancho. La segunda anomalía se ubica inmediatamente al sur de la caldera, al este del cerro "El Tecoloquillo", cuenta con una forma más circular, su diámetro es de 2.2 km. Al este de esta anomalía y al suroeste de la ciudad de Chignahuapan se ubica la

segunda anomalía de menor tamaño con orientación Noroeste-Sureste con 3.9 km de largo por 1.6 km de ancho. El rango de valores magnéticos va desde los -350 hasta -240 nT.

Al sureste de este conjunto de anomalías negativas representadas en color azul en la figura 3.2, se encuentra una zona de alto gradiente de cambio de valores negativos a positivos, la cual coincide con la ubicación de la falla Axaxalpan que marca la frontera sur del graben.

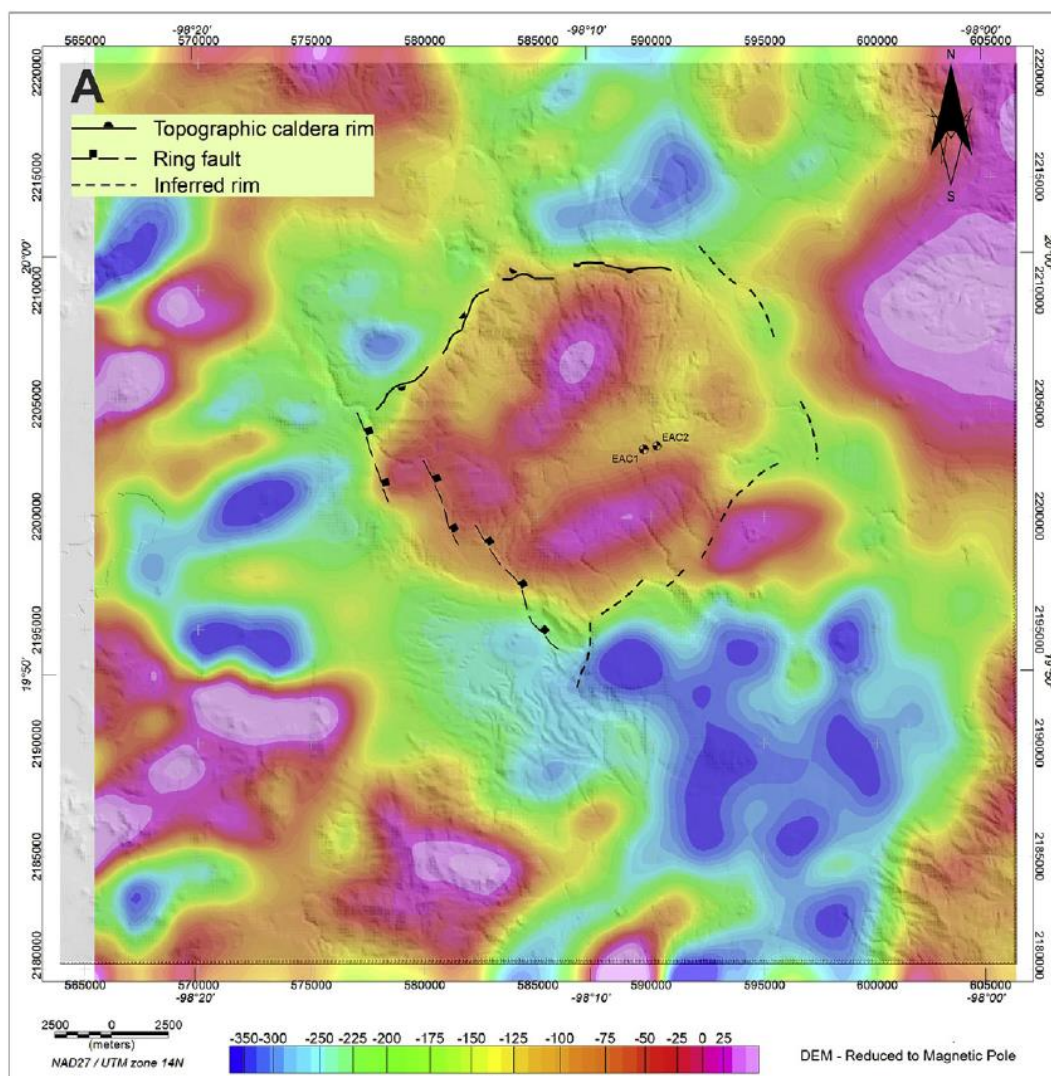


Figura 3.2. Mapa del campo magnético reducido al polo tomada de Avellán et al. (2020), superpuesta en un DEM de la región de la caldera de Acoculco. Los puntos negros representan los pozos de CFE.



La integración de la información obtenida de los estudios gravimétricos y magnéticos permitió elaborar una conceptualización de la composición de la geología estructural de la zona. Se identificaron fallas mayores tales como: la falla Apan-Tláloc, Chignahuapan y Axaxalpan, así como también de las estructuras geológicas que se pueden encontrar a profundidad. De esta manera mediante el análisis de las anomalías gravimétricas se observa que el sistema de fallas ha influido en el establecimiento de las estructuras geológicas como la caldera de Acoculco o el graben de Chignahuapan.

### **3.4 Modelo digital de elevación**

En la investigación geotérmica los estudios de percepción remota como las fotografías aéreas y los sensores satelitales resultan muy útiles cuando se quiere cubrir un área extensa (Boden, 2016).

Una herramienta muy útil para conocer diversos aspectos de la superficie del terreno como: la altura, la pendiente y desniveles, son los modelos digitales de elevación (MDE) los cuales son archivos en formato raster que representan la elevación del terreno mediante una cuadrícula de tamaño específico donde cada celda corresponde a un punto con ubicación geográfica conocida a la que se relaciona un valor de elevación (INEGI). Se construyen a partir de datos exclusivamente de la superficie de la Tierra (modelo digital de terreno), pero también puede describir datos que incluyen vegetación y estructuras construidas (modelo digital de superficie) (Tarolli y Mudd, 2020).

En la presente tesis se utilizaron 6 modelos digitales de elevación de terreno de escala 1:50000, claves F14D82, F14D83, E14B12, E14B13, E14B22 y E14B23, construidos a partir de del procesamiento de las curvas de nivel obtenidas del proceso de la conversión digital de la información topográfica (INEGI, 2021), un ejemplo del despliegue de un MDE se muestra en la figura 3.3. Los MDE se utilizaron para la construcción de la topografía del modelo geométrico geológico. De igual manera se utilizaron para la elaboración de las capas del modelo numérico del

graben de Chignahuapan. La metodología de construcción se describe a detalle en el capítulo 5.

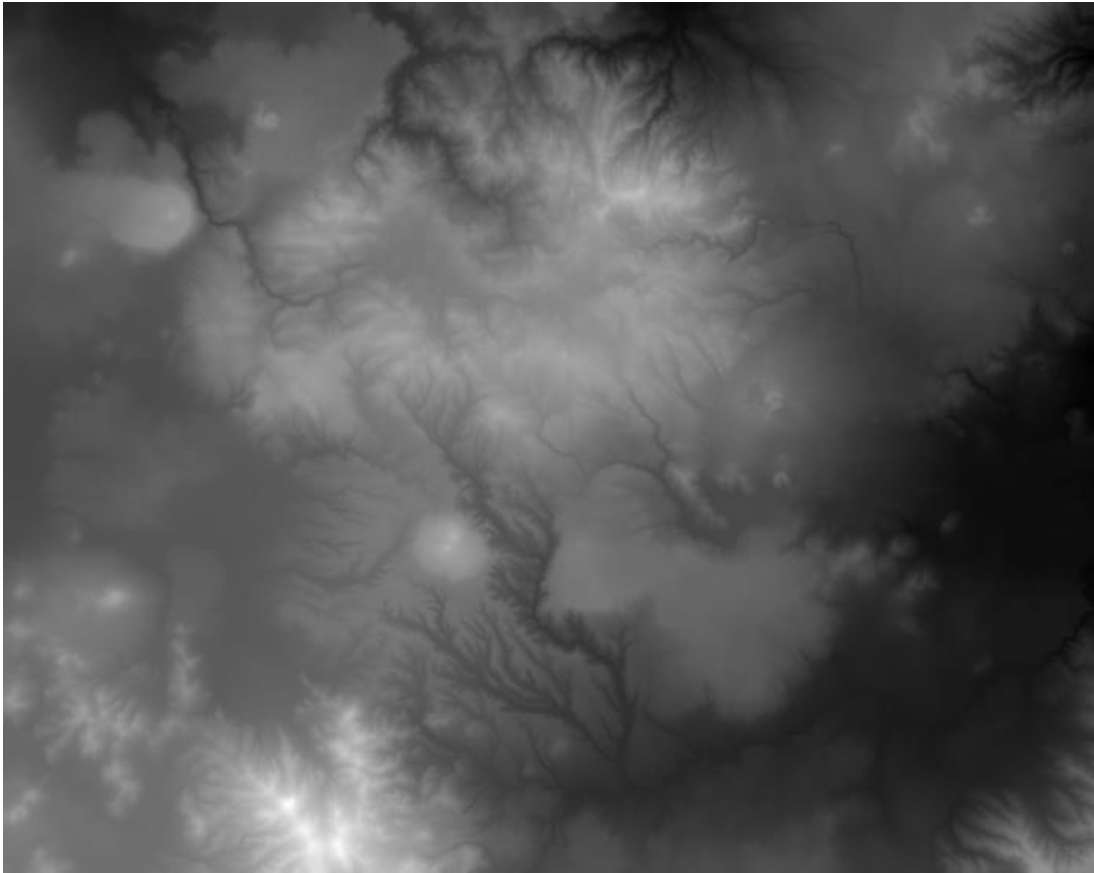


Figura 3.3 Modelo digital de elevación clave *e14b13me* (recuperado de INEGI, 2020).

### **3.5 Imágenes satelitales**

Las imágenes satelitales son herramientas de gran ayuda en las investigaciones geotérmicas. A través de ellas se puede obtener información importante sobre el terreno de una manera más sencilla, a diferencia de los métodos convencionales de exploración como son la perforación de pozos, medición de parámetros geofísicos y toma de muestras en campo.

Se utilizaron dos imágenes obtenidas de la misión Sentinel 2 dirigida por la Agencia Espacial Europea. El objetivo de la misión es obtener imágenes multiespectrales de alta resolución y de banda ancha. La misión Sentinel 2 está constituida por dos satélites, Sentinel A y B, los cuales rodean la Tierra siguiendo la misma órbita, pero

con una diferencia de 180°. Cada satélite Sentinel 2 está equipado con un instrumento multiespectral (MSI). El MSI es capaz de muestrear en 13 bandas espectrales que abarcan desde el espectro visible hasta el infrarrojo cercano. Las bandas 2,3 y 4 se obtienen a una resolución de 10 m, las bandas 5, 6, 7 y 8 a 20 m y las bandas a 1, 9 y 10 a 60m (ESA, 2021).

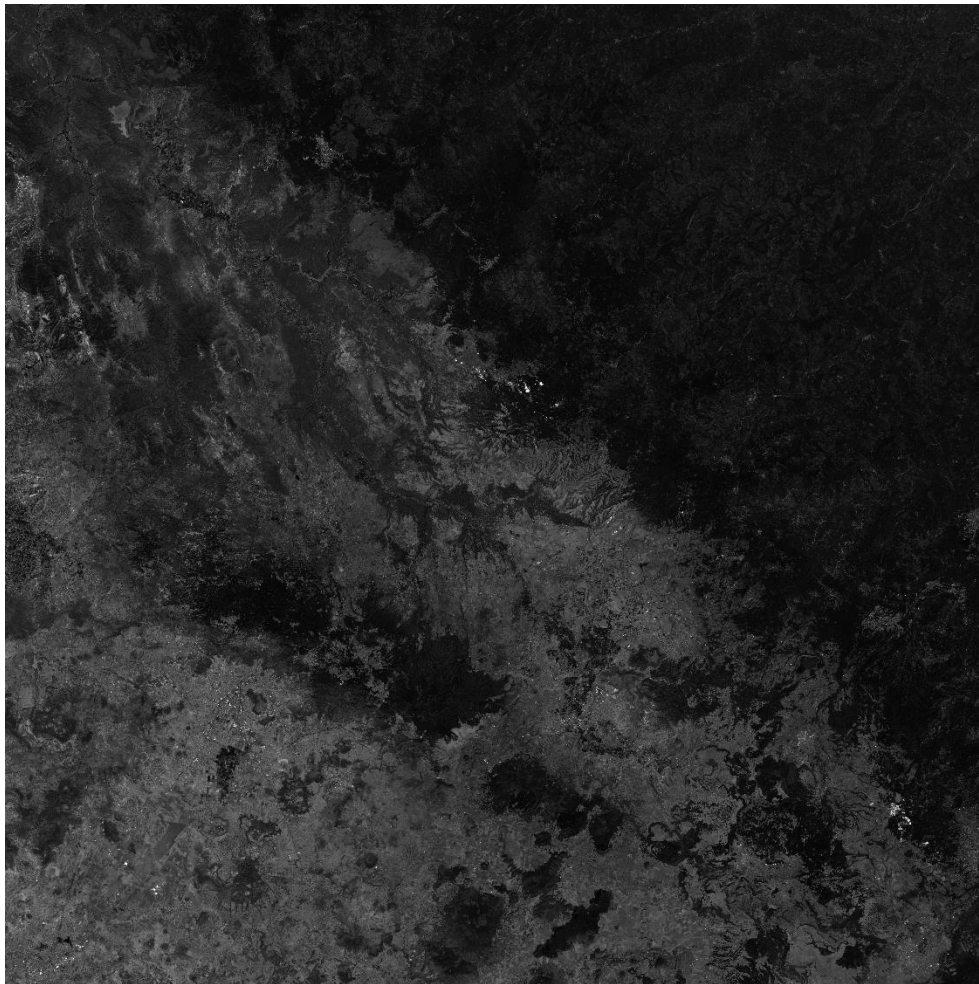


Figura 3.4. Imagen Sentinel número de registro T14QN, banda 4 “Red”.

Las imágenes utilizadas en esta tesis fueron muestreadas por el satélite Sentinel B, el muestreo de ambas se realizó el 27/03/2020, su dominio es de 110 km de ancho por 110 km de largo, sus números de registro de campo son T14QNG y T14QNH (Fig. 3.4).

Se realizó una composición a color real de 10 m de resolución de cada imagen descargada mediante la conjunción de las bandas RGB (4,3 y 2 respectivamente), (Fig. 3.5). Posteriormente se hizo la unión de las composiciones a color real para después recortar el área de la zona de estudio. La composición a color de las imágenes Sentinel se utilizó para elaborar los mapas de ubicación de la zona de estudio (Fig. 2.1 B).

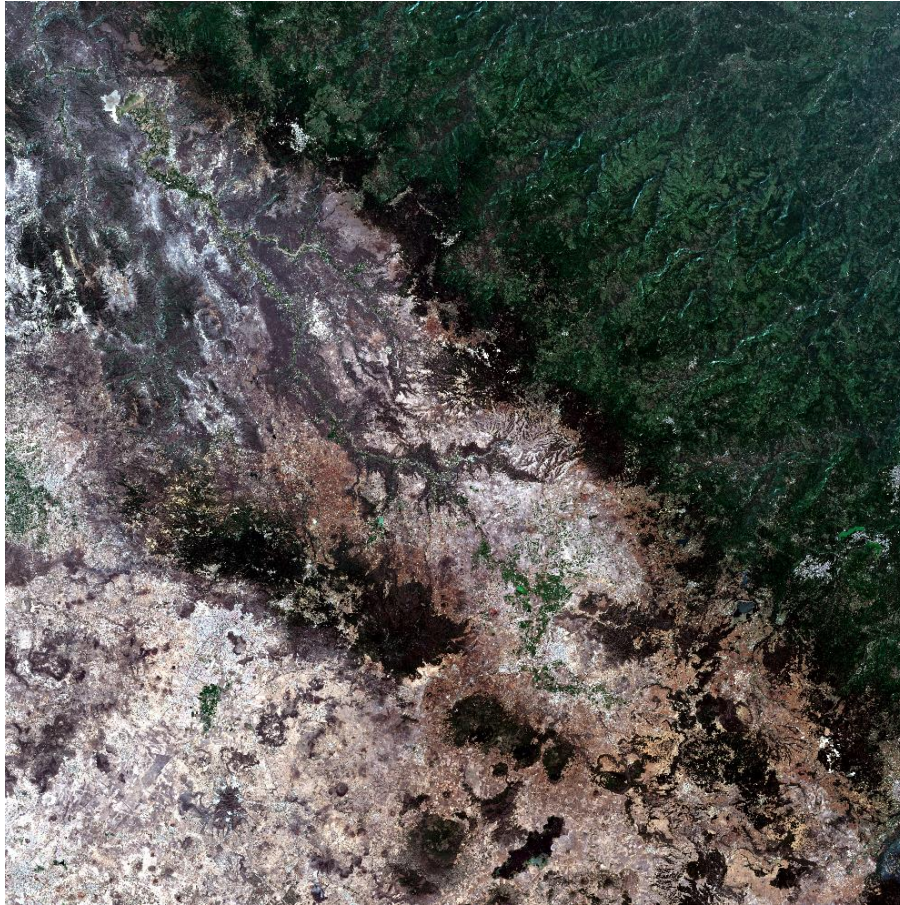


Figura 3.5. Composición a color bandas 432, imagen número de registro T14QN.

Para lograr la construcción de los modelos geométrico y numérico fue fundamental el uso coordinado de herramientas de percepción remota como son los MDE y las imágenes satelitales, debido a que su integración permitió obtener información tanto del estado de la superficie como de la topografía de la zona.

## **CAPITULO IV**

### **4. Estudios geoquímicos**

Este apartado está dedicado a la recopilación y discusión los estudios geoquímicos más relevantes para la elaboración de los modelos, su principal función fue la validación y respaldo en la idealización tanto del funcionamiento hidrogeológico en el modelo conceptual como también para definir algunos parámetros del modelo numérico.

Dentro de los estudios geoquímicos se incluyen los de alteración de los minerales presentados aquí, que sirven como indicadores del paso de aguas termales dentro de la caldera, en donde se observan claras zonas de alteración cercanas a los manantiales. Por otro lado, los análisis de fluidos fueron utilizados para inferir el posible comportamiento del fluido hidrotermal a profundidad, al compararlos con los resultados de los manantiales que se encuentran fuera de la caldera.

#### ***4.1 Estudios previos***

En la zona central de la caldera de Acoculco se han llevado a cabo diversos estudios geoquímicos, los cuales han tenido como objetivo general entender el funcionamiento del sistema geotérmico de la caldera. Dentro de estas investigaciones se destacan (Canet et al., 2010; Canet et al., 2015; Sánchez-Córdova, 2019) las relativas al análisis mineralógico de las rocas presentes en las zonas de alteración hidrotermal. Por otro lado, los principales estudios de geoquímica de fluidos se llevaron a cabo primero y principalmente por la CFE entre 1985 y 1986, sintetizados y publicados por López-Hernández et al. (2009) y recientemente por Peiffer et al. (2014), en ellos presentan resultados del análisis de los gases que emanan de las zonas donde existen manifestaciones hidrotermales, la interacción fluido-roca que ha ocurrido a lo largo del tiempo, así como el análisis químico e isotópico del agua de los manantiales más importantes que se encuentran dentro y fuera de la caldera. La integración de los resultados

obtenidos en estas investigaciones es parte fundamental para la elaboración del modelo conceptual de la estructura y funcionamiento del sistema geotérmico de la caldera de Acoculco.

#### 4.2 Minerales de alteración hidrotermal

Los minerales de alteración hidrotermal presentes en las distintas zonas de alteración hidrotermal han sido ampliamente estudiados por Canet et al. (2010), Canet et al. (2015) y Sánchez-Córdova (2019). A partir del análisis de las muestras recuperadas del pozo EAC-1, se distinguen dos zonas de alteración hidrotermal, la primera de illita de amonio que va desde la superficie hasta los 500-600 m y una profunda de epidota-calcita-clorita que llega hasta los 1000 m (Canet et al. 2010).

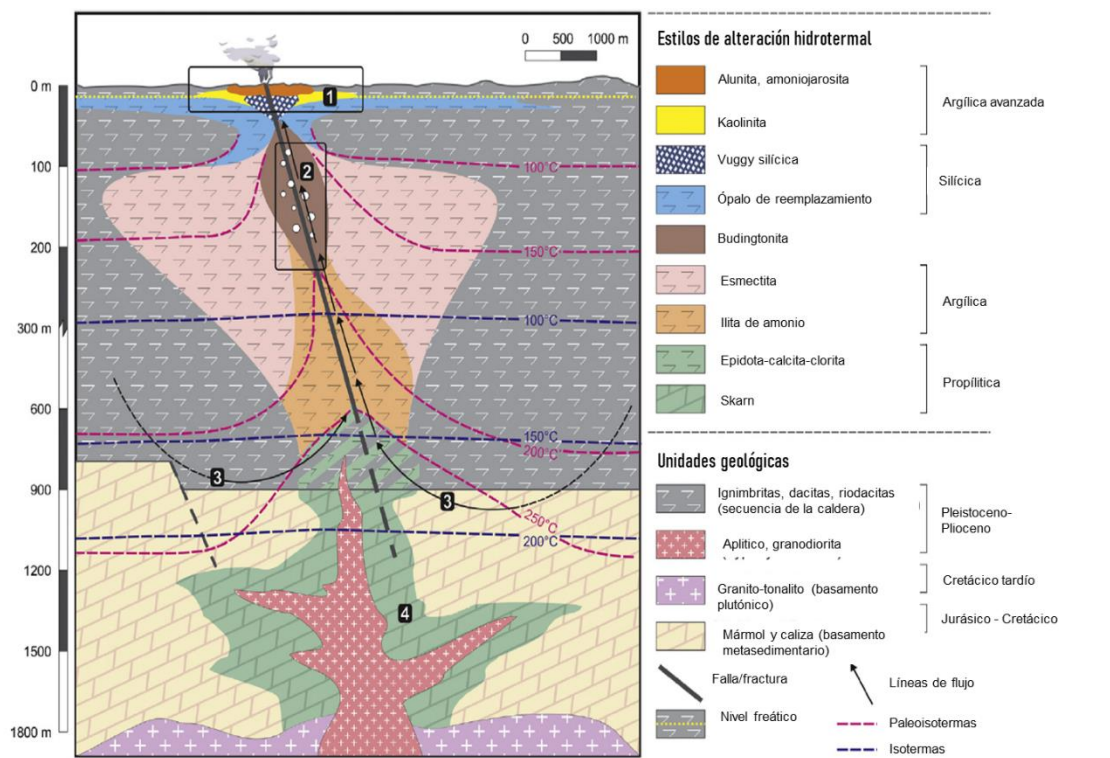


Figura 4.1 Modelo conceptual de la alteración hidrotermal de la zona de Acoculco, (tomada de Canet, 2015).

En el estudio realizado por Canet et al. (2015), se describen los estilos de alteración hidrotermal presentes en el centro de la caldera, los cuales son: alteración argílica, silícica, argílica avanzada y propílitica. La alteración silícica es la que ocupa una mayor extensión (50 km<sup>2</sup>), esta alteración ocurre generalmente a niveles poco profundos en zonas permeables, la presencia de ópalo sugiere temperaturas por debajo de 150 °C. La alteración argílica avanzada está asociada a “overprints” calentados por vapor en depósitos de baja sulfuración, dichos “overprints” se forman por encima del nivel freático en aguas superficiales a pH bajo (2-3) y temperatura alrededor de los 100 °C.

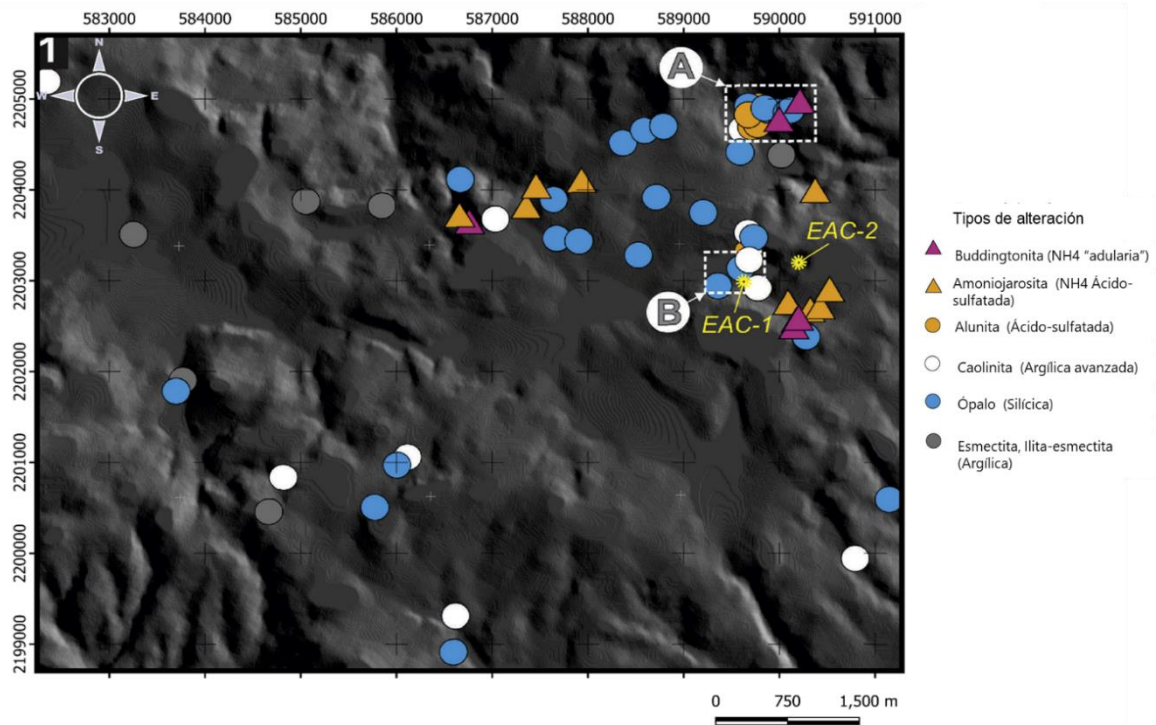


Figura 4.2 Mapa de distribución de los tipos de alteración hidrotermal dentro de la caldera de Acoculco. Las zonas A (Alcaparroza) y B (Los Azufres) destacadas en el mapa presentan manifestaciones hidrotermales gaseosas (modificado de Canet et al., 2015).

La presencia del mineral amoniojarosita y la asociación entre valores altos de nitrógeno y la alteración ácido-sulfatada sugiere la presencia de fluidos hidrotermales altos en amonio. El amonio se encuentra en minerales como buddingtonita y la iilita de amonio. La buddingtonita se forma cuando el amonio

sustituye al potasio en la ortoclasa, la ortoclasa se forma por encima de los 150 °C y a un pH casi neutro. En Acoculco la buddingtonita se formó aproximadamente a 300 m de profundidad. De los 600 a los 1000 m se encuentran minerales asociados a la alteración propílica (epidota, clorita y calcita), sus temperaturas de formación se encuentran por encima de los 240 °C (Canet et al. 2015).

A partir de la correlación de la ubicación de los minerales de alteración con sus temperaturas de formación y las muestras recolectadas y analizadas del pozo EAC-1, Canet et al. (2015) realizó un modelo 2D conceptual que se muestra en la Figura. 4.1, donde se observan las paleoisotermas del sistema geotérmico y la posible ubicación de las zonas de alteración.

En el mismo estudio se describen los minerales asociados a cada estilo de alteración. En el mapa de la figura 4.2 se puede observar la distribución de los principales minerales (Buddingtonita, amoniojarosita, alunita, kaolinita, ópalo y esméctita) que fueron utilizados como minerales índices para ser asociados con sus condiciones específicas que regulan las reacciones agua-roca (acidez, temperatura, relación fluido/roca).

Las zonas de mayor importancia descritas en el mapa son A (Alcaparroza) y B (Los Azufres) debido a la presencia de manifestaciones gaseosas. Las áreas destacadas por la co-ocurrencia de alteración ácido-sulfato, buddingtonita y anomalías de amonio son Alcaparroza, Los Azufres y Las Minas. Estas alteraciones sugieren que existen zonas permeables mediante las cuales asciende el fluido termal.

### **4.3 Manifestaciones hidrotermales**

La caldera de Acoculco no cuenta con manantiales de alta temperatura dentro de su dominio, la mayoría de los manantiales que están registrados cuentan con temperaturas de entre 14-20 C (Peiffer et al, 2014). Sin embargo, existen algunas zonas de descarga que emanan gases como el sulfuro de hidrógeno que se relaciona a sistemas hidrotermales. Las localidades que cuentan con los manantiales más estudiados son: Chignahuapan, Quetzalapa, Jicolapa, La



Alcaparrosa y Los Azufres (Quinto et al, 2015; Peiffer et al, 2014; López-Hernández, 2009). Peiffer et al. (2014) concluyeron que el origen del agua de los manantiales dentro y fuera de la caldera de Acoculco proviene de aguas subterráneas poco profundas, también indicó que las zonas donde están las principales fuentes de desgasificación, se encuentran dentro de la caldera. En el mapa de la Fig. 2.1 se muestran las ubicaciones de los manantiales dentro y fuera de la caldera.

Los manantiales que se encuentran alrededor de la caldera como son los baños de la localidad de Chignahuapan y Quetzalapa registran temperaturas de 49 °C y 30 °C respectivamente, la velocidad de descarga es de aproximadamente 20 L/s (López-Hernández, 2009). Esta velocidad se debe posiblemente a los canales de disolución a través de las rocas calizas de la Sierra Madre Oriental. López-Hernández, (2009) señala que posiblemente la actividad hidrotermal se ha ido recorriendo hacia la parte sureste con respecto a la Caldera de Acoculco debido a la ubicación y geología de los manantiales de agua termal de Chignahuapan que se encuentran a 2 km al sureste de una serie de terrazas de depósitos de travertinos hidrotermales fósiles.

Los minerales encontrados en las rocas superficiales cercanas a los pozos, así como en los primeros 200 m de perforación, indican una alteración hidrotermal ácido-sulfatada que ocurrió probablemente por la interacción de gases provenientes del fondo con agua meteórica, esta deposición de minerales provocó que se creara un tipo de capa sello que bloqueó la salida del fluido a la superficie lo que podría explicar porque los manantiales encontrados en la zona son fríos (López Hernández, 2009).

#### **4.4 Geoquímica de fluidos**

En la caldera de Acoculco hay ausencia de manifestaciones hidrotermales superficiales de alta temperatura, solamente existen algunos manantiales de temperaturas frías con emanación de gases, dichos manantiales se describieron en el apartado anterior. La geoquímica de estos manantiales ha sido ampliamente

estudiada por Peiffer et al. (2014) con el propósito de establecer el origen de los fluidos, relacionando las bajas temperaturas con la presencia de gases de origen geotérmico, esta información se complementa con los resultados de estudios realizados por la CFE, sintetizados y publicados por López-Hernández (2009).

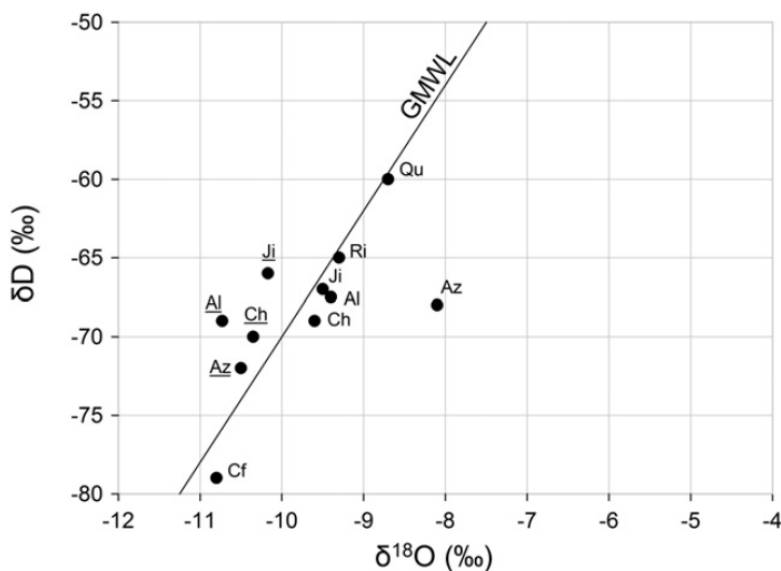


Figura 4.3 Composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta\text{D}$  las muestras de agua recolectada de los manantiales. Al-Alcaparroza, Ch-Chignahuapan, Az-Los Azufres, Ji-Jicolapa, Ri-El Rincón, Cf-Cuadro Fierro, Qu-Quetzalapa (tomada de Peiffer, 2014).

La composición de las aguas de los manantiales se puede dividir en dos tipos, la de los manantiales dentro de la caldera (Alcaparroza, Los azufres y Cuadro Fierro) que presentan una composición sulfatada-cálcica con un pH ácido (2.4-6.8), y por otro lado la de los manantiales que se encuentran fuera de la caldera (Chignahuapan, Quetzalapa, Jicolapa) de composición bicarbonatada-cálcica-sódica con un pH casi neutro (6.2-7.3), en la figura 2.1 se muestra la ubicación de los manantiales dentro y fuera de la caldera (Peiffer et al, 2014).

Peiffer et al. (2014) resume los resultados de sus estudios en la tabla 4.1, donde se muestra la concentración de una serie de elementos disueltos, temperatura y pH de los manantiales. La acides y el enriquecimiento en sulfato de las aguas puede

deberse a la oxidación del H<sub>2</sub>S después de la disolución de los gases hidrotermales en las aguas superficiales (Peiffer et al, 2014).

La mayoría de los resultados en los análisis de la relación entre  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  en todos los manantiales caen dentro de la línea de agua meteórica global (GMWL) (Fig. 4.3), esto quiere decir que el agua presente en los manantiales es de origen principalmente meteórico (Peiffer et al, 2014; López-Hernández et al, 2009).

<b>Manantial</b>	<b>Fecha de muestreo</b>	<b>Temp (°C)</b>	<b>pH</b>	<b>Na</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Cl</b>	<b>HCO<sub>3</sub></b>	<b><math>\delta^{18}\text{O}</math></b>	<b><math>\delta\text{D}</math></b>
<b>Chignahuapan</b>	2006	47.5	7	87	14	196	106	735	-10.4	-70
<b>Alcaparrosa</b>	2013	17	2.4	15.8	8.5	9.7	2.2	Nd	Na	Na
<b>Los Azufres</b>	2006	21.4	5.5	55	15	56	7.8	137	-10.5	-72
<b>Jicolapa</b>	2006	25.4	6.2	29	15	265	7.7	894	-10.2	-66
<b>Quetzalapa</b>	1986	30	6.9	157	11	193	24	1479	-8.7	-60
<b>El Rincón</b>	1986	32	6.6	12.8	13	143	9.8	514	-9.3	-65
<b>Cuadro Fierro</b>	1986	23	4.3	42.3	14	145	14	Nd	-10.8	-79

Tabla 4.1 Concentraciones de elementos disueltos y  $\delta^{18}\text{O}$  –  $\delta\text{D}$  en aguas de Acoculco. Las concentraciones se reportan en mg/L, (modificado de Peiffer, 2014).

López-Hernández (2009) infirió que los índices de saturación de calcita en los manantiales de Chignahuapan, Quetzalapa y Jicolapa, 1.14, 0.61, 0.70, respectivamente, así como los altos niveles de Cl (118mg/L) y B (3.2mg/L) en el manantial de Chignahuapan, pudieran deberse al efecto de la circulación profunda a través de las Calizas del Cretácico, sin embargo, Peiffer et al. (2014) refuta esta hipótesis argumentando que los resultados obtenidos del análisis de los isotopos de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  indican que el agua del manantial de Chignahuapan es de origen meteórico y esta no puede tener origen profundo debido a que esta se encontraría enriquecida en isotopos pesados de  $\delta^{18}\text{O}$ . A pesar de esto, Peiffer et al. (2014)

señala que la mezcla de fluidos geotérmicos profundos y agua superficial puede enmascarar la firma de los fluidos geotérmicos profundos.

Muestra	Fecha	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	NH <sub>3</sub>	He	H <sub>2</sub>	Ar	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	ref
Los Azufres	21-25/04/2006	97.02	1.85	na	0.0006	0.01	0.004	na	0.43	0.68	1
Los Azufres	25/06/1986	96.63	2.95	0.0305	nd	0.00009	0.060	nd	0.38	0.017	2
Jicolapa	21-25/04/2006	97.97	nd	na	0.0031	nd	0.053	na	2.11	0.36	1
Jicolapa	03/07/1986	98.47	0.91	0.0455	0.0010	0.0001	0.015	0.0344	0.58	0.013	2
Alcaparrosa	29/05/2013	93.36	2.94	na	0.0031	nd	0.018	0.18	1.50	2.00	1
Alcaparrosa	21-25/04/2006	95.28	2.83	na	0.0033	nd	0.003	na	0.61	1.28	1
Alcaparrosa	24/06/1986	94.24	2.23	0.0038	0.0135	0.00017	0.004	nd	0.98	2.53	2
Quetzalapa	18/06/1986	98.61	0.31	0.0481	0.0004	0.00003	0.010	0.0699	0.50	0.453	2
El Rincón	19/07/1986	93.06	0.24	0.0665	0.0175	0.00004	0.158	0.2779	6.15	0.038	2

Tabla 4.2 Composición química de los gases de Acocolco (tomada de Peiffer, 2014).

Los resultados más importantes obtenidos del análisis de la composición química de los gases, realizada por Peiffer et al. (2014) se presentan en la tabla 4.2. Se destaca que el CO<sub>2</sub> es el gas más abundante, algo común en los sistemas geotérmicos (Peiffer, 2014), el segundo gas en orden de abundancia es el H<sub>2</sub>S. Hay concentraciones significativas de H<sub>2</sub>S en Los Azufres y Alcaparrosa.

Población de flujo de CO <sub>2</sub>	Proporción de las muestras (%)	Flujo medio de CO <sub>2</sub> (gm <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )	Rango de flujo CO <sub>2</sub> : 90% intervalo de confianza (g m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )
A	95	18	14-26
B	5	5543	1906-27,713

Tabla 4.3 Proporción del flujo de CO<sub>2</sub> de las poblaciones A y B con el flujo promedio y el rango de flujo, (modificada de Peiffer, 2014).

El flujo de CO<sub>2</sub> medido por Peiffer et al. (2014) en Los azufres y Alcaparrosa se muestra en la tabla 4.3, se destaca que de la población B solo se recolectaron 10 muestras, de las cuales, 8 pertenecen a Alcaparrosa y 2 a Los Azufres; por otro lado, las muestras de la población A fueron recolectadas alrededor de las manifestaciones. Los valores de flujo de CO<sub>2</sub> para Alcaparrosa son 7 T/día y 18 T/día para Los Azufres; en cambio, los resultados obtenidos por Hernández (2018) del flujo de CO<sub>2</sub>, son 223.22 ton/día para Los Azufres y de 12.43 ton/día para Alcaparrosa. La baja tasa de flujo de CO<sub>2</sub> en las muestras de la población A puede deberse a la baja permeabilidad del sistema, como consecuencia de la intensa

alteración observada en los primeros metros (Peiffer et al, 2014). Finalmente debido a que el agua de los manantiales dentro de la caldera es de tipo ácido-sulfatada, Peiffer (2014), sugiere que la fuente de desgasificación debe localizarse debajo de Los Azufres y Alcaparrosa.

## Capítulo V

### 5. Integración de datos

En el presente capítulo se describe la metodología para la construcción del modelo tridimensional geométrico. El proceso de integración y análisis de la información descrita en los capítulos anteriores se especifica en cada etapa de la metodología de construcción. Por otro lado, simultáneamente con la descripción de la metodología, se exponen los resultados obtenidos de la construcción del modelo geométrico tridimensional.

Se presenta también el modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico de la zona de estudio, el cual se elaboró a partir del análisis e integración de la información obtenida en los capítulos anteriores en conjunto con el análisis del modelo geométrico tridimensional.

Por último, se enlistan los argumentos que justifican la elaboración de un modelo numérico para una mejor comprensión del posible funcionamiento hidrogeológico del sistema geotérmico de Acoculco.

#### ***5.1 Metodología de construcción del modelo 3D geológico***

Se describe el procedimiento que se llevó a cabo para la construcción del modelo tridimensional geométrico, el cual se presenta resumido a manera de diagrama de flujo en la figura 5.1.

El primer paso en la elaboración del modelo tridimensional geométrico, consistió en delimitar la zona de estudio, la cual se define en el capítulo 2; cabe mencionar que en una etapa preliminar el área de estudio abarcaba solamente el perímetro de la Caldera de Acoculco, la cual excluía a la zona de Chignahuapan. Sin embargo, a partir del análisis de la geología estructural de la región (Capítulos 2 y 3), se determinó que tanto las fallas ubicadas al sur de la caldera con orientación SE-NO, como las fallas regionales (Chignahuapan, Apan, Axaxalpan) de orientación SO-NE, pueden tener influencia en el funcionamiento del sistema geotérmico, por lo tanto, se decidió ampliar el área de estudio al dominio actual.

Para definir del área de estudio, se empalmaron los mapas de geología (Fig. 2.2 y 2.4) junto con el mapa de anomalías gravimétricas (Fig. 3.1) mediante el uso del software QGIS. El proceso consistió en georreferenciar cada mapa para posteriormente agregar cada uno como una capa raster individual. Una vez empalmados los mapas se identificaron la relación que existe entre las anomalías gravimétricas y las fallas y fracturas representadas en los mapas geológicos.

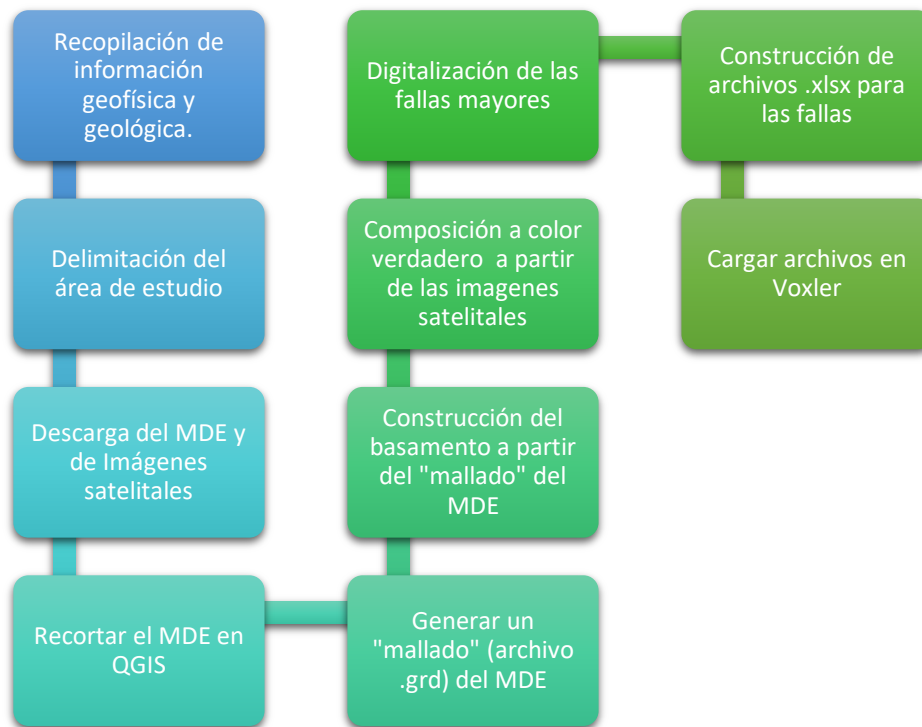


Figura 5.1. Diagrama de flujo que muestra en resumen el procedimiento de elaboración del modelo geométrico geológico.

La georreferenciación consiste en establecer una relación entre la información disponible, datos, mapas, imágenes y ubicaciones geográficas mediante referencias geoespaciales como puede ser la longitud y latitud (Hill, 2006). En otras palabras, la georreferenciación se utiliza para obtener la ubicación en la Tierra de un objeto deseado, en este caso un mapa (Navarro, 2011). Este proceso se realiza ubicando puntos homólogos en los sistemas de coordenadas de origen y destino. Para la

georreferenciación de todos los mapas, se utilizaron 4 puntos control de los cuales se anotaron sus coordenadas originales con base en las coordenadas que estaban marcadas en cada mapa. Posteriormente mediante la herramienta “Digitize” de QGIS se marcaron dichos puntos y se seleccionó el sistema de coordenadas de destino, en este caso fue el sistema WGS 84 UTM Zona 14.

Una vez georreferenciados los mapas, se definió el límite de la zona de estudio, desde el inicio de la Falla Apan-Acocolco en el oeste hasta el fin de la falla de Axaxalpa en el oeste, por la parte norte se eligió el límite de la caldera de Acocolco y para el límite sur se eligió el límite sur de la falla de Axaxalpa que se encuentra marcado en la ubicación de Tlaxco. El motivo de realizar esta delimitación fue tener una visión más integral de las características estructurales regionales de la zona donde se localiza el Sistema geotérmico de Acocolco, con base en la influencia que pudieran tener las fallas regionales en el funcionamiento del sistema.

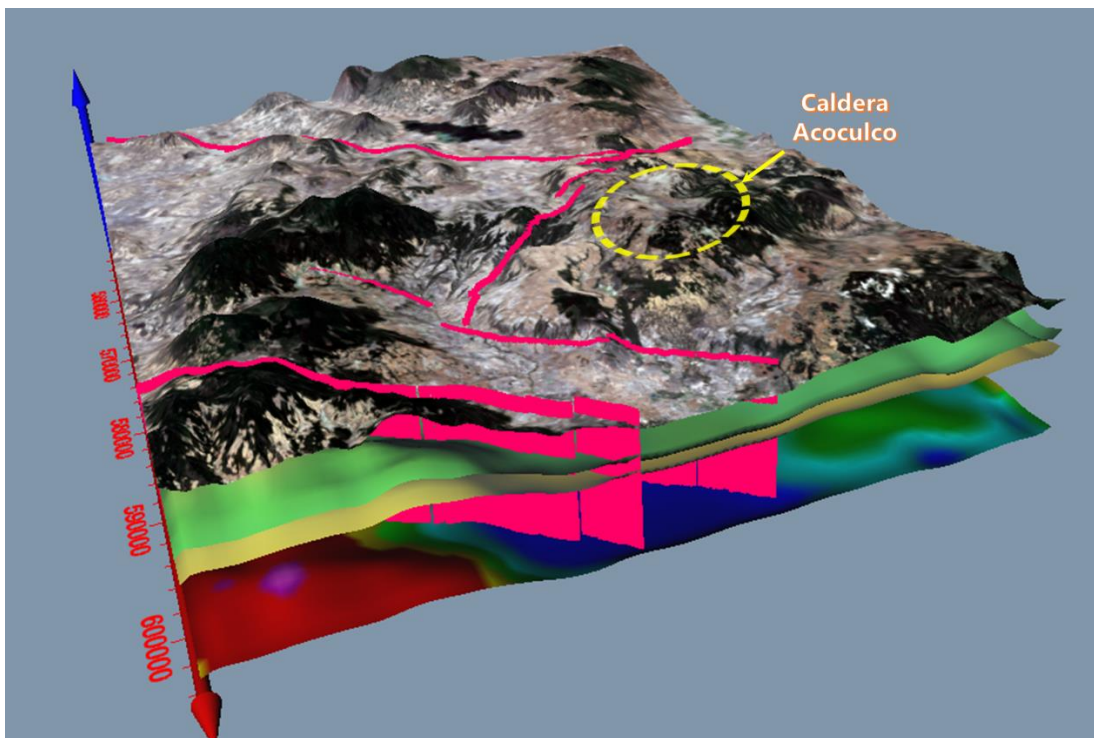


Figura 5.2 Modelo digital integral de información geológica y geofísica (MED, interface entre estratos geológicos, información estructural, información geofísica).



La elaboración del modelo geométrico geológico se realizó mediante el uso del software Voxler, el cual es un programa diseñado para la visualización de datos científicos en 3D, es distribuido por Golden Software.

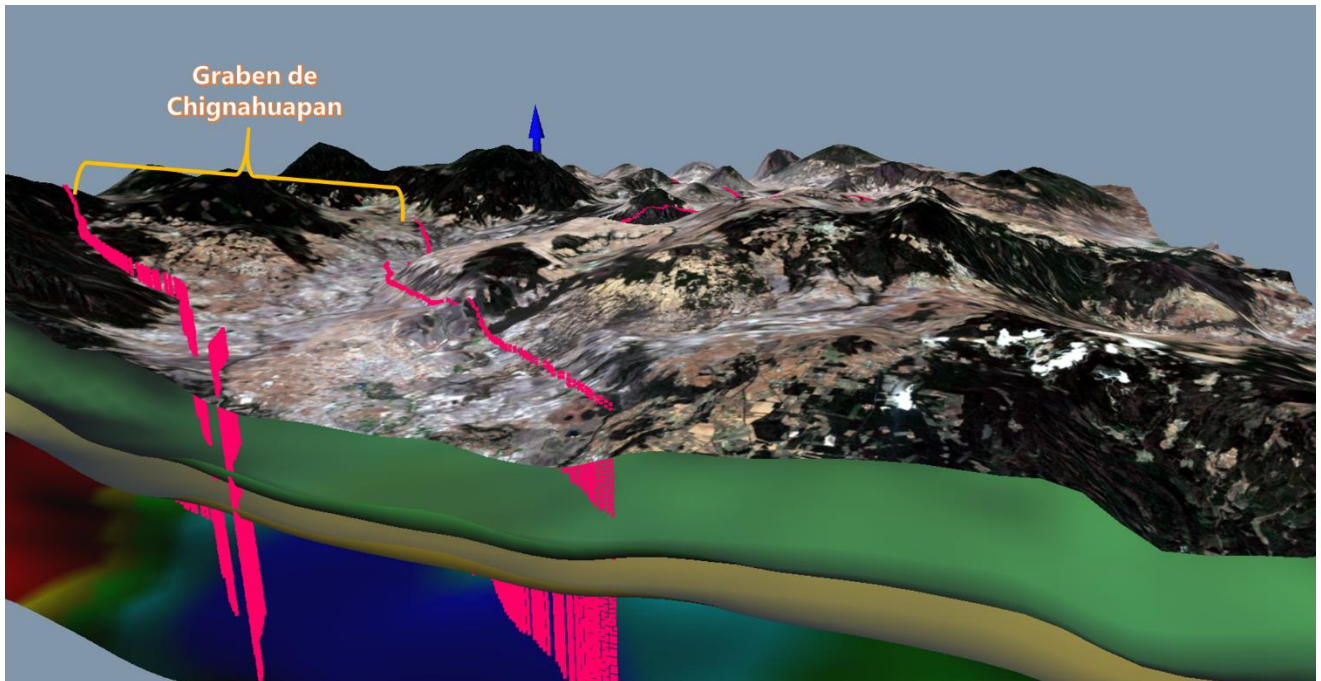


Figura 5.3. Vista del Graben de Chignahuapan en el modelo geométrico digital de la zona de estudio. Las fallas de Apan-Tláloc, Manzanito, Chignahuapan y Axaxalpan se encuentran señaladas en color rosa.

### **5.1.1 Delimitación de capas digitales**

Para la elaboración de los modelos geométrico y numérico se delimitaron 4 capas. Dicha delimitación se realizó con base en la descripción de la columna litológica del pozo EAC1 (Fig. 2.6) elaborada por López-Hernández (2009), cuyos resultados se sintetizan en el apartado 2.4 del capítulo 2; en el perfil litológico (Fig.5.2) y en la descripción del mapa de anomalías aeromagnéticas (Fig. 3.2) del capítulo 3 construido por Avellán et al. (2020).

Los primeros 600 metros forman parte de la primera capa del modelo geométrico geológico, debido a que las rocas de dichas formaciones presentan características

físicas similares como son conductividad hidráulica, conductividad térmica y densidad.

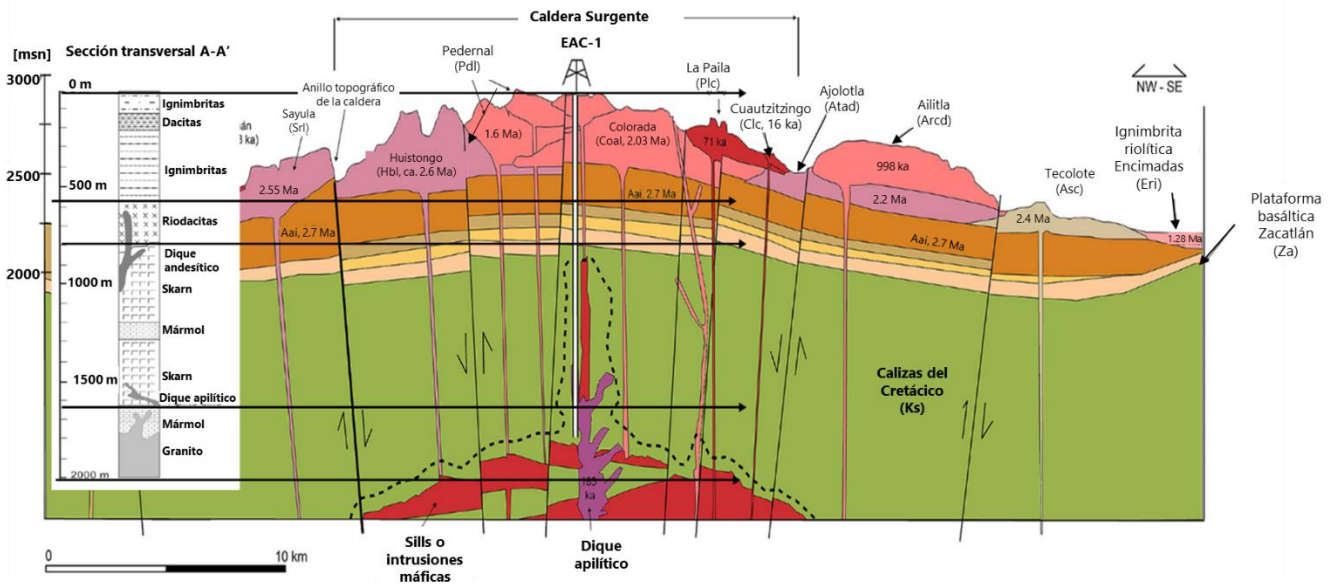


Figura 5.4 Perfil litológico de la caldera de Acoculco (modificada de Avellán et al., 2020).

La segunda capa del modelo equivale a las tres unidades de menor grosor que se encuentran debajo de la unidad Acoculco, dos corresponden a dacitas y riodacitas y la tercera unidad son rocas basálticas pertenecientes a la unidad Zacatlán; esta unidad cuenta con un grosor de 200m.

La tercera capa corresponde con las unidades subyacentes, las cuales son principalmente rocas calizas del Cretácico, el grosor de esta capa abarca de los 800 a los 1600 m. La última capa del modelo representa el basamento del modelo y se relaciona con la capa de granito. Las unidades se enlistan y describen en la Tabla 5.1.

Estrato	Tipo de roca	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad Térmica (W/mK)	Permeabilidad (m <sup>2</sup> )	Conductividad hidráulica (m/día)	Descripción geológica
1	Ignimbritas	2341	1.65	1x10 <sup>-15</sup> a 1x10 <sup>-18</sup>	5x10 <sup>-5</sup> a 2x10 <sup>-1</sup>	Consiste en secuencias de rocas volcánicas formadas durante el Plioceno tardío al pleistoceno (Avellán, 2019)
2	Riodacitas	2200	2.08	7.49x10 <sup>-11</sup> a 1.97x10 <sup>-16</sup>		Unidades pre caldera formadas del Mioceno al Plioceno tardío (Avellán, 2019)
	Basalto Basalto fracturado	2.8-3.0	3.5	1x10 <sup>-14</sup> a 1x10 <sup>-18</sup> 10x10 <sup>-13</sup> a 1x10 <sup>-15</sup>	1x10 <sup>-6</sup> a 1x10 <sup>-3</sup> 1x10 <sup>-4</sup> a 1x10 <sup>-1</sup>	Colada de basalto (Avellán, 2019)
3	Skarn/Hornfels	2800	1.80	2.14x10 <sup>-18</sup>		Zona de metamorfismo debido al contacto con el granito intrusivo (Avellán, 2009).
	Calizas	2.3-2.7	2.37	10x10 <sup>-14</sup> a 1x10 <sup>-12</sup>	5x10 <sup>6</sup> a 10	Calizas del cretácico (Avellán, 2009).
4	Granito	2761	2.68	5,08x10 <sup>-17</sup>	5x10 <sup>-8</sup> a 1x10 <sup>-5</sup>	Granito de hornblenda formado probablemente durante el mioceno medio (López, 2009).

Tabla 5.1. Propiedades físicas e hidrológicas de las rocas correspondientes a las capas del modelo geométrico geológico (Canet et al., 2015; Avendaño Cortes, 2017; Colombier et al., 2017; Lewis et al., 2006; Singhal et al., 2008).

### 5.1.2 Construcción de las capas digitales

La capa superior del modelo se construyó a partir de la combinación de seis cartas de modelos digitales de elevación escala 1:50000, claves F14D82, F14D83, E14B12, E14B13, E14B22 y E14B23; elaborados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Una vez combinadas, el archivo raster generado se recortó en QGIS de acuerdo al tamaño del área delimitada, posteriormente se transformó el archivo del modelo digital de elevación de formato raster “.tif” a formato “.grd”. Mediante el uso del programa *Surfer* de Golden software, se transformó el archivo “.grd” compuesto de 442 filas por 350 columnas en un archivo formato “.xyz” de *Surfer* con el objetivo de disminuir el número de filas y columnas, posteriormente mediante la herramienta “*grid*” se transformó el archivo “xyz” a un archivo con formato “.grd” compuesto de 88 filas por 70 columnas.

Para la representación de la superficie se utilizó una composición a color natural (bandas 432) de dos imágenes Sentinel-2 capturadas en marzo de 2020.

La elaboración de las capas inferiores se realizó con base en el archivo “.grd” generado anteriormente para representar la topografía. Esto debido a que no se contó con los medios necesarios para realizar la transformación de un mapa de anomalía de Bouguer a valores de profundidad para la construcción de un basamento.

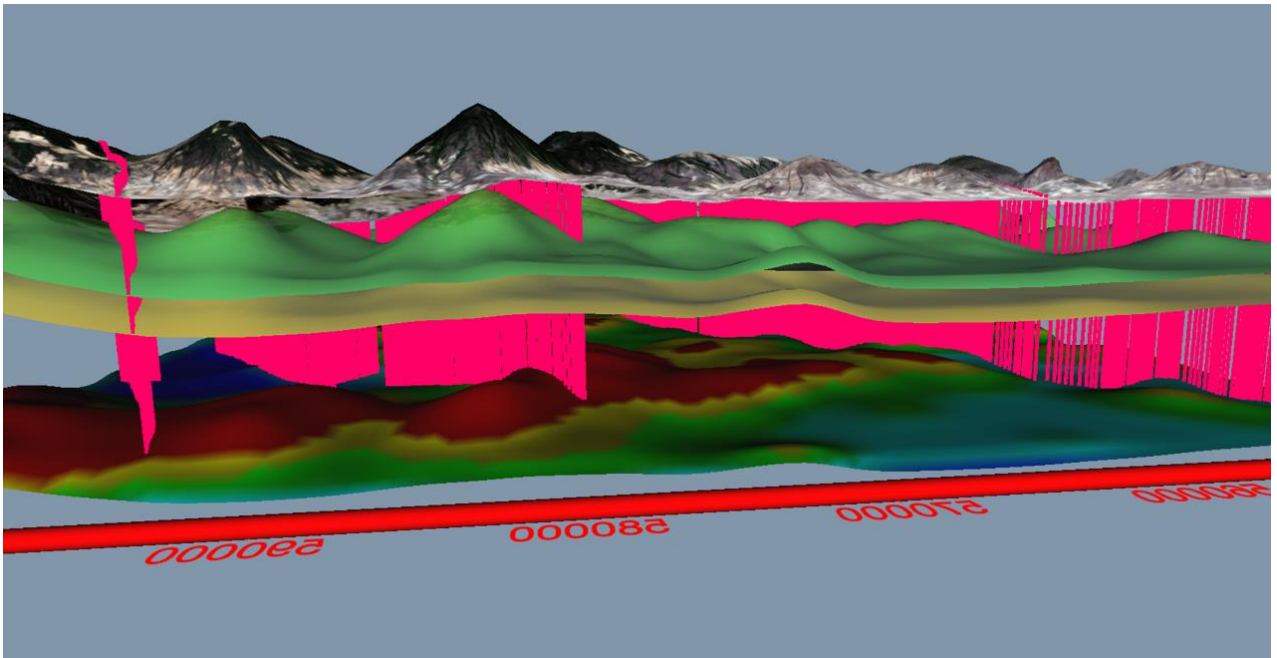


Figura 5.5 Vista de perfil litológico donde se observan las capas que componen el modelo geométrico la caldera de Acoculco y que deja ver las fallas a profundidad.

El procedimiento consistió en restar 600 metros al archivo de la topografía mediante la herramienta “math” de *Surfer*, posteriormente se aplicó un filtro “Low-pass” Gaussiano, con el objetivo eliminar las protuberancias más abruptas de la topografía y obtener una superficie más “suavizada” que representara mejor la estructura de las capas inferiores. Se aplicó el mismo procedimiento para obtener las mallas de las capas inferiores.

En la figura 5.5 se observan en una perspectiva de perfil, las capas que componen al modelo geométrico estructural, se aprecian las capas suavizadas. Se observan también las fallas a profundidad.

### **5.1.3 Construcción de fallas**

Para la construcción de las fallas, fue necesario introducir cada falla como una gráfica de dispersión de puntos, para lo cual se siguió el siguiente procedimiento.

A través del uso del software *Surfer* se realizó la digitalización de las fallas mayores (Apán-Tlaloc, Chignahuapan, Axaxalpa y Manzanito), con base en su representación en el mapa de la figura 2.7. Para cada falla se obtuvo un archivo de Excel con 3 columnas; en la primera columna se representa la altura del punto digitalizado, en la segunda columna la coordenada “X” y en la tercera la coordenada “Y”. Para poder generar las gráficas de dispersión en *Voxler* fue necesario crear un archivo “xlsx” el cual contiene una lista donde se repiten las coordenadas y alturas de los puntos digitalizados, y en cada nueva repetición se restan 25 m a la altura de cada punto, hasta llegar a la altura del basamento, esto sólo se logra por medio de un algoritmo computacional que en este caso se elaboró en Matlab.

En la figura 5.6 se señalan las fallas mayores presentes en la zona. Se observa el Graben de Chignahuapan delimitado por las fallas de Chignahuapan y Axaxalpa.

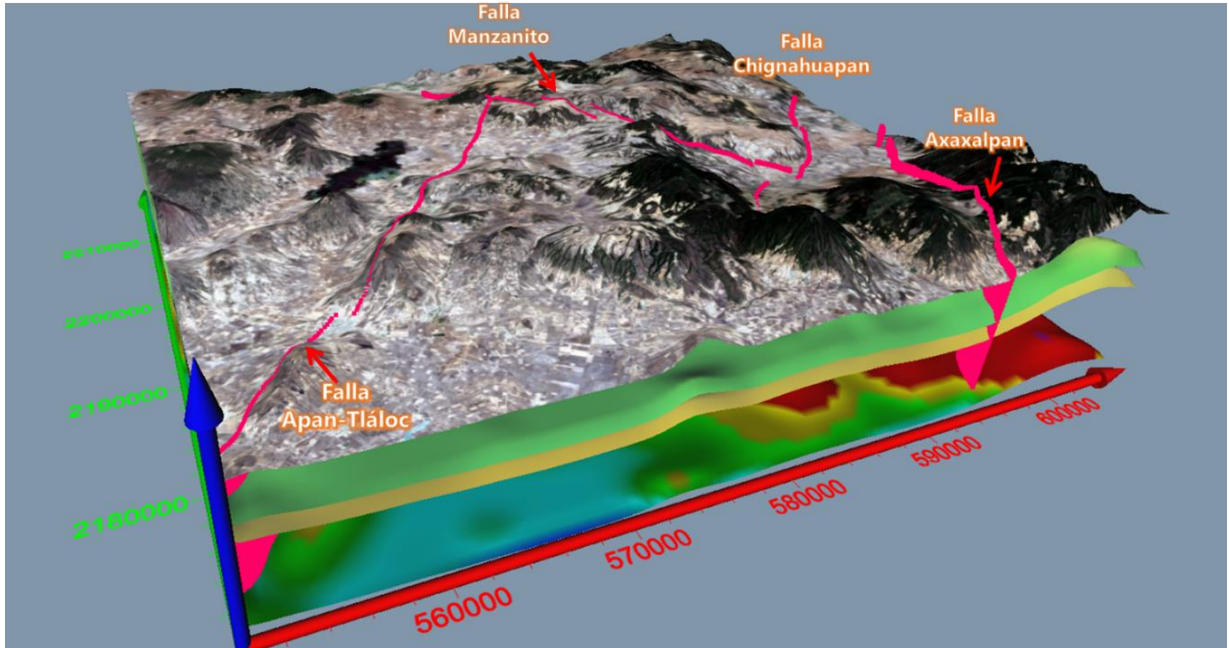


Figura 5.6. Fallas más importantes representadas en el modelo digital integral.

## 5.2 Modelo conceptual

Un modelo conceptual es la idealización del sistema hidrogeológico, es una representación virtual del funcionamiento del sistema basada en mapas geológicos, estudios geofísicos y geoquímicos, así como en todas las bases de datos hidrológicos disponibles sobre el sistema (Bundschuh, 2010).

Una vez establecida el área de estudio, se realizó la conceptualización de la estructura geológica del modelo mediante la revisión detallada de los estudios geológicos; principalmente los referentes a la geología superficial, las unidades geológicas, y a la geología estructural. Estos estudios han sido descritos a detalle en el capítulo 2.

Aunado a los estudios geológicos, el análisis de los estudios geofísicos presentado en el capítulo 3, fue fundamental para la concepción de la parte estructural del modelo. Por un lado, se utilizó el mapa de anomalías residuales de Bouguer de la figura 3.1 para la localización de las principales fallas y fracturas. Por otro lado,

mediante el mapa de anomalías aeromagnéticas se estableció la ubicación de los posibles cuerpos intrusivos que se encuentran debajo de la caldera.

Los estudios geoquímicos descritos en el capítulo 4 se utilizaron como evidencia para la concepción del funcionamiento del sistema geotérmico. Los resultados obtenidos del análisis de temperatura, minerales e isotopos de las aguas de los manantiales ubicados dentro y fuera de la caldera sirvieron como soporte para la descripción de la dirección del flujo geotérmico en el sistema.

### ***5.2.1 Funcionamiento del modelo conceptual***

La evidencia de la actividad volcánica que se ha manifestado desde el Mioceno es la dominancia de rocas volcánicas en la zona de la Caldera. Estas rocas en su mayoría son poco porosas y por consecuencia presentan poca permeabilidad. Sin embargo, la existencia de sistemas de fallas importantes como las fallas de: Manzanito, de Apan y de Chignahuapan, cuya actividad provocó un importante fracturamiento de las rocas superficiales; en el pasado estas fracturas pudieron haber funcionado como posibles vías de flujo para recarga o ascenso de fluido hidrotermal hacia el sistema, sin embargo, actualmente se encuentran selladas debido a la precipitación de minerales de alteración hidrotermal en ellas, en consecuencia a este sellamiento los manantiales presentes en la caldera son fríos.

En función de lo anterior López-Hernández et al. (2009) sugiere la existencia de un sistema hidrotermal a profundidad debajo de la caldera de Aocolco, cuyo flujo hidrotermal va desde la caldera de Aocolco hacia el graben de Chignahuapan a través de la capa de calizas del Cretácico, ya que las calizas presentan mayor permeabilidad que las unidades de rocas volcánicas que se encuentran sobre ella. Una evidencia de este ello podría ser el manantial de Chignahuapan, el cual emana desde rocas calizas del Cretácico.

La ubicación de la caldera de Aocolco dentro del horst Rosario Aocolco la coloca a mayor altitud con respecto del graben de Chignahuapan, esta diferencia en altitud provoca un gradiente que permite inferir que el flujo de agua ocurre por gravedad

desde la caldera hacia el graben de Chignahuapan. Sumado a lo anterior, el flujo desde el sistema geotérmico se ve favorecido por la presencia de la falla de Manzanito y las fallas dirección NW-SE que aún no han sido identificadas y que van desde la caldera hacia el graben.

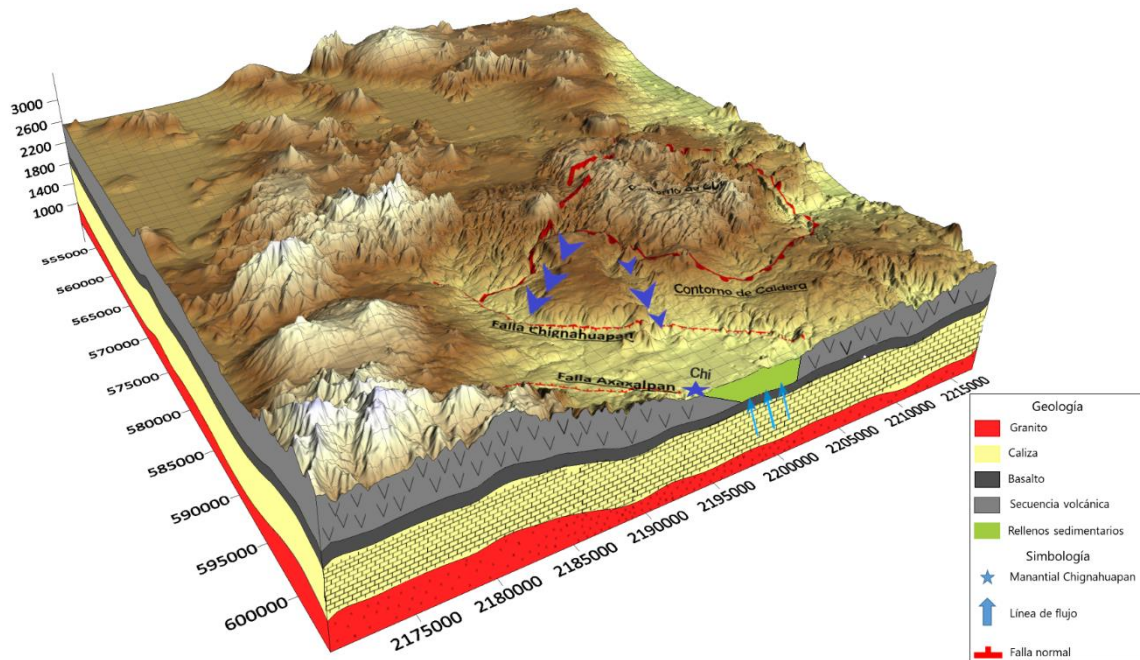


Figura 5.7 Representación gráfica del modelo conceptual del sistema hidrogeológico de Acoculco.

### 5.3 Modelo numérico hidrogeológico de Chignahuapan

Se realizó el modelo numérico del graben de Chignahuapan, con base en el análisis e integración de la información recopilada en los capítulos anteriores. En la figura 5.8 se muestra el área que ocupa el modelo numérico en relación al área total de la zona de estudio. Los fundamentos obtenidos de la integración que justifican la elaboración del modelo se enlistan a continuación:

1. El manantial de Chignahuapan es el único manantial que presenta temperaturas por encima de los 35 °C, es decir que es el único con agua caliente a diferencia de las manifestaciones hidrotermales dentro de la caldera que son de agua fría (Peiffer et al, 2014). Aunado a esto, La



permeabilidad encontrada a través de la perforación del pozo EAC-1 resultó ser mínima (López-Hernández, 2009).

2. La geometría tipo cuenca del graben de Chignahuapan facilita la elaboración de un modelo de flujo de agua subterránea debido a que por acción de la gravedad el agua tiende a ir de las zonas más altas a las más bajas. Esto tiene como resultado que sea posible la acumulación de agua en el centro del graben, donde se encuentra el manantial de Chignahuapan.
3. La orientación SE-NO de las fallas que se encuentran al noroeste de la ciudad de Chignahuapan posiblemente permita que estas actúen como vía de flujo por donde circule el fluido geotérmico, desde la caldera de Acoculco hasta la zona de descarga del manantial de Chignahuapan. Un ejemplo de esto es la falla de Manzanito (Fig. 2.7), la cual marca el límite sur de la caldera. Aunado a esta interpretación, López-Hernández (2009) sugiere que dada la tendencia regional del gradiente de gravedad NW-SE en el que se encuentra el pozo EAC-1 y el manantial de Chignahuapan estos podrían estar relacionados a través de las fallas NW-SE.
4. Las calizas que constituyen la tercera capa, funcionan como medio por el cual se facilita la circulación profunda de los fluidos geotérmicos, debido a la alta conductividad hidráulica que presentan. López-Hernández, (2009) sugiere que la actividad hidrotermal de la caldera se ha ido recorriendo hacia el sureste, como evidencia menciona en primer lugar la existencia de una serie de depósitos de travertinos hidrotermales en forma de terrazas al noroeste del manantial de Chignahuapan. Además, menciona que los valores elevados del índice de saturación de calcita en los manantiales de Chignahuapan, Quetzalapa y Jicolapa se pueden deber a la circulación profunda a través de las rocas carbonatadas de la región.

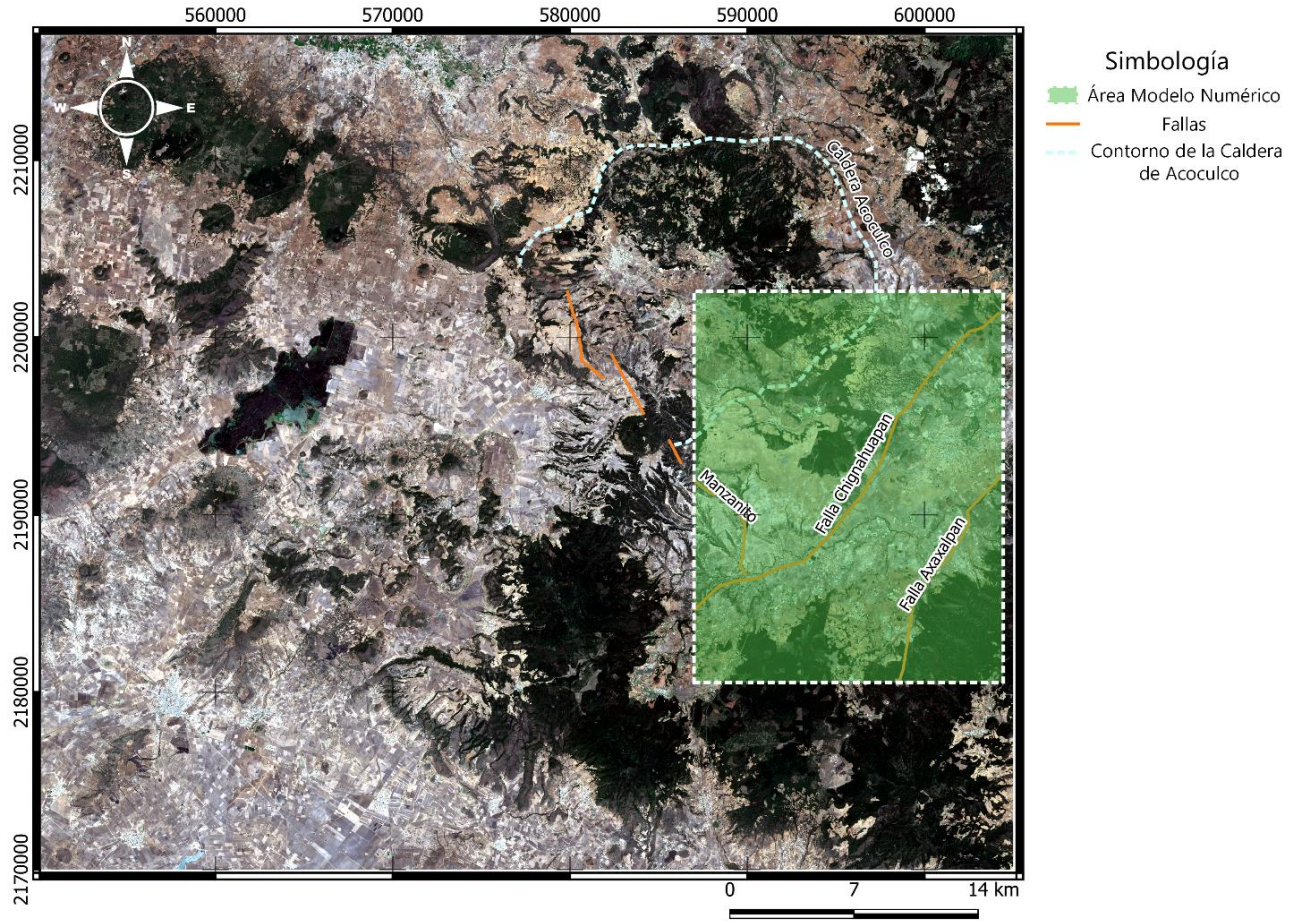


Figura 5.8. Área que abarca el modelo numérico hidrogeológico de flujo dentro del dominio total de la zona de estudio.

## Capítulo VI

### 6. Modelo hidrogeológico

#### 6.1 Modelo de flujo

El objetivo de un modelo es representar de forma simplificada el funcionamiento real de un sistema. Sabiendo esto, un modelo hidrogeológico funciona como herramienta para la integrar la información obtenida en campo junto con conceptos hidrogeológicos establecidos. Existen distintos tipos de modelos entre los que se encuentran los físicos y los matemáticos; dentro de los modelos matemáticos se encuentran los modelos basados en procesos, los cuales utilizan ecuaciones físicas para determinar diversos fenómenos físicos, por ejemplo, el flujo de agua subterránea dentro de un dominio establecido (Anderson et al, 2015).

En el presente trabajo se realizó el modelo hidrogeológico de flujo en estado estacionario del graben de Chignahuapan mediante el uso de la interfaz gráfica *Modelmuse*, la cual permite interactuar con el software *MODFLOW* de una manera sencilla mediante el uso de iconos, menús y otros indicadores visuales. Por otra parte, *Modelmuse* permite configurar la entrada espacial y las características hidráulicas del modelo mediante objetos (puntos, líneas y polígonos).

#### 6.2 MODFLOW

El software *MODFLOW* fue desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) en 1984 (Harbaugh, 2005), su principal objetivo es modelar el flujo de agua subterránea con base en un modelo matemático, discretizado y codificado en un lenguaje computacional. Utiliza una estructura modular con “paquetes” que se agregan al código base para aumentar la capacidad del software. El software resuelve la ecuación de flujo de agua subterránea (1) mediante el método de diferencias finitas.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Donde  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  y  $K_{zz}$  (L/T) son los valores de la conductividad hidráulica en las direcciones de los ejes coordenados  $x$ ,  $y$  y  $z$ ; la carga hidráulica se representa por  $h$  (L),  $Q$  (1/T) es el flujo volumétrico por unidad de volumen,  $SS$  (1/L) es el almacenamiento específico del material poroso y  $t$  es el tiempo (Langevin et al, 2017).

### 6.3 Construcción de capas

La división de capas se realizó con base en la delimitación de capas elaborada para el dominio completo, la cual se describe a detalle en el apartado 5.2.1 del capítulo anterior.

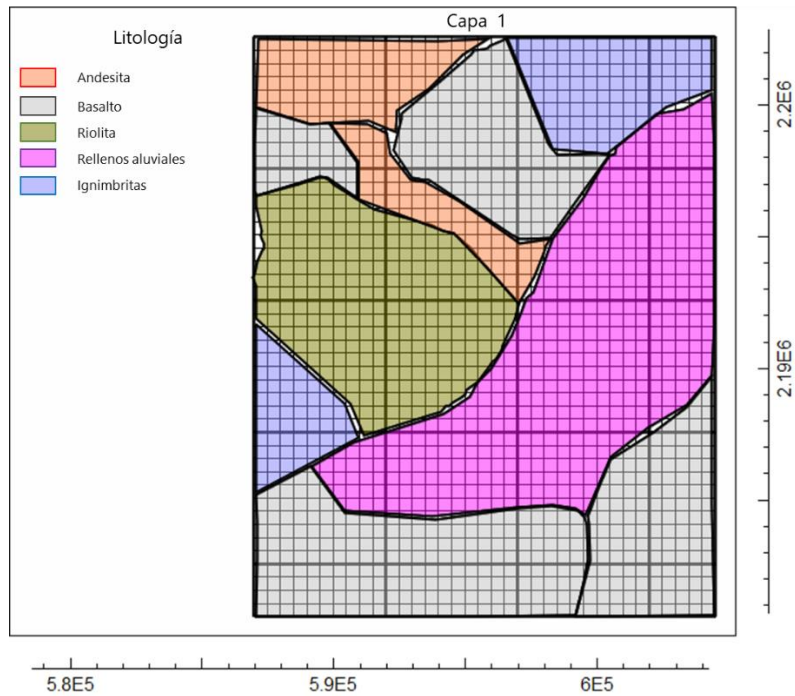


Figura 6.1. División de la capa 1 de acuerdo a la litología.

La primera capa se subdividió de acuerdo a 5 tipos diferentes de litologías, estas son: rellenos aluviales, Basaltos, Andesitas, Ignimbritas y Riolitas, las cuales se describieron en el capítulo 2 (Fig. 6.1). La segunda capa corresponde a la unidad basalto Zacatlán, que se observa en el perfil litológico de la figura 5.5 del capítulo anterior, esta unidad es diferente a la primera debido a las propiedades hidrológicas del basalto en comparación con los rellenos aluviales. La tercera capa corresponde a la unidad de rocas calizas del cretácico, esta capa cuenta con los mayores valores de conductividad hidráulica debido a la facilidad de disolución de las rocas calizas. Por último, a la cuarta capa se le asignó el funcionamiento de basamento, esta capa es correspondiente con la unidad de granito. En la tabla 6.1 se esquematiza la división de capas que conforman el modelo y la geología correspondiente a cada una, además de los valores de conductividad hidráulica asignados.

<b>Estrato</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Tipo de roca</b>	<b>Conductividad hidráulica (m/s)</b>
<b>1</b>	0-600	Rellenos aluviales	1E-7
		Basalto	1.1574E-08
		Andesita	1.1574E-8
		Ignimbritas	1.1574E-8
		Riolita	1.1574E-7
<b>2</b>	600-800	Basalto/Basalto fracturado	1E-6
<b>3</b>	800-1600	Calizas	1E-4
<b>4</b>	1600-1700	Granito	5E-10

Tabla 6.1 Propiedades hidrológicas de las rocas correspondientes a las capas del modelo numérico (Canet et al 2015; Avendaño Cortes, 2017; Colombier et al, 2017; Lewis et al, 2006; Singhal et al, 2008).

#### 6.4 Geometría del modelo

La extensión del modelo es de 17400 m de longitud en  $X$  por 22050 m en  $Y$ , se compone de una malla de 44 filas por 35 columnas con una dimensión de celda de 500 m en la dirección  $x$  por 500 m en dirección  $y$ . Las mallas utilizadas para definir cada capa del modelo de flujo, se obtuvieron a partir de las mallas generadas para el modelo geométrico.

La elección de las zonas activas e inactivas del modelo se realizó a partir de la geología superficial presentada en el capítulo 2. La zona de celdas activas se asignó con base en el área que ocupa la unidad de rellenos aluviales (Fig. 6.1), esto debido a que esta litología abarca el área correspondiente al graben de Chignahuapan. La representación de las zonas activas se observa en la figura 6.2.

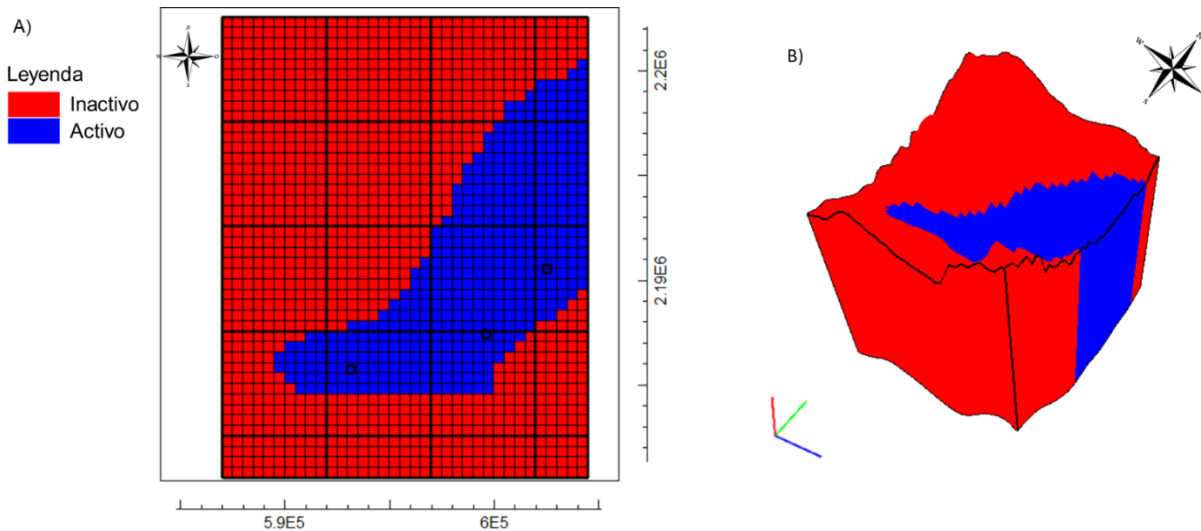


Figura 6.2. A) Representación en planta de las celdas activas e inactivas del modelo numérico. B) Representación en 3D de las celdas activas del modelo.

### 6.5 Condiciones de frontera

En la frontera este se asignó una condición de flujo constante para simular el flujo de agua desde la parte oeste hacia el exterior del modelo. Para establecer la frontera de flujo constante se utilizó el paquete “*Flow and Head Boundary*” el cual permite asignar a una celda o grupo de celdas un flujo constante hacia el interior o el exterior del sistema. La figura 6.3 muestra las celdas que representan la frontera de flujo constante.

Para la simulación de la descarga del manantial de Chignahuapan se utilizó el paquete “*WELL*”, el cual se asignó a una sola celda en la ubicación del manantial. El volumen de salida constante que se estableció fue de  $0.044\text{m}^3/\text{s}$  o de  $44\text{ L/s}$ . Este manantial se incluyó dentro del modelo de flujo debido a la relevancia que tiene para la presente investigación.

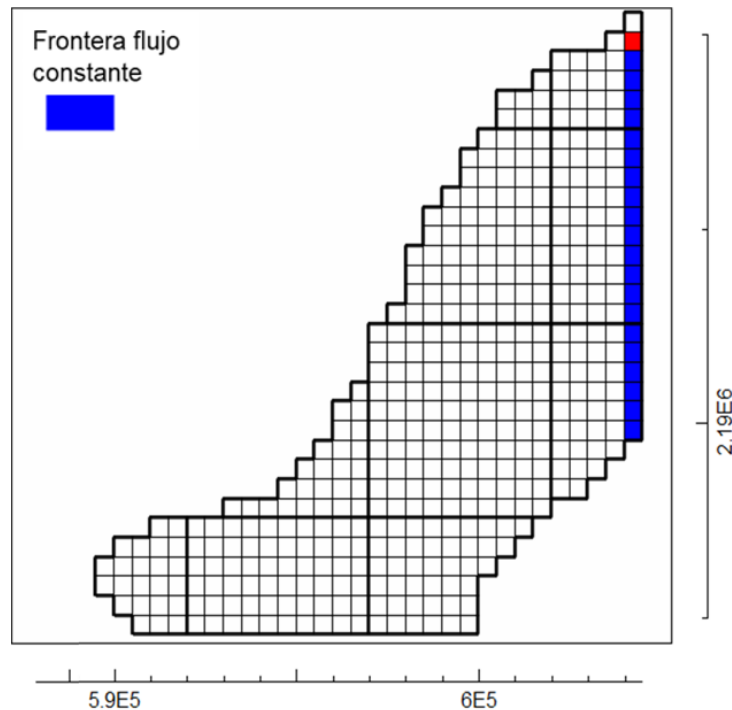


Figura 6.3 Ubicación de la frontera de flujo constante.

## 6.6 Parámetros hidrogeológicos

### 6.6.1 Recarga

Las zonas de recarga en el modelo se asignaron tomando en cuenta la geología estructural de la zona. En la frontera norte es donde existe mayor posibilidad de recarga a través de la falla de Chignahuapan que delimita al Graben, mientras que por la parte sur existe el contacto geológico de los rellenos aluviales con un derrame de basalto.

La recarga en la parte norte es mayor en la capa 3 y 2 en comparación con la capa 1 debido al posible flujo de agua proveniente de la Caldera a través de la capa de calizas. En la figura 6.4 se muestran las zonas de recargas presentes en el modelo.

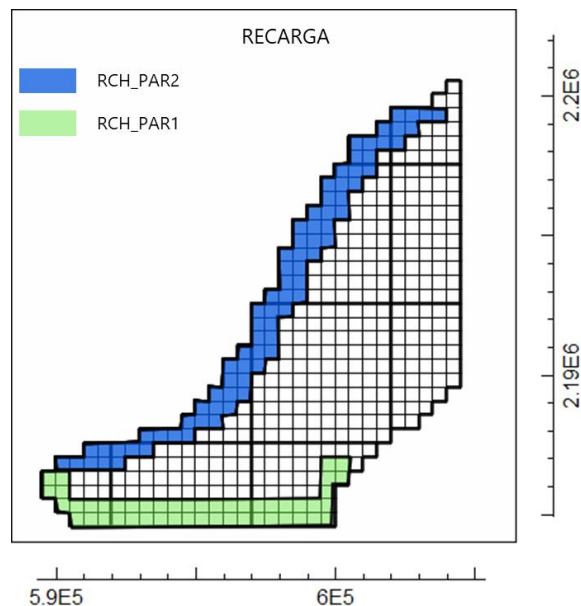


Figura 6.4. Zonas de recarga del modelo.

### 6.6.1 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica del modelo se dividió en ocho zonas tomando en cuenta dos factores, la litología de cada capa y las zonas donde se asignó la recarga. A la tercera capa se le asignó un valor de conductividad hidráulica mayor, con respecto a las primeras dos, debido a que las rocas calizas de esta capa presentan mayor



permeabilidad que los rellenos aluviales de la primera capa. Para la última capa se estableció un valor de conductividad hidráulica uniforme debido a su funcionamiento de basamento. En la figura 6.5 se observan las zonas de conductividad hidráulica para las primeras 3 capas.

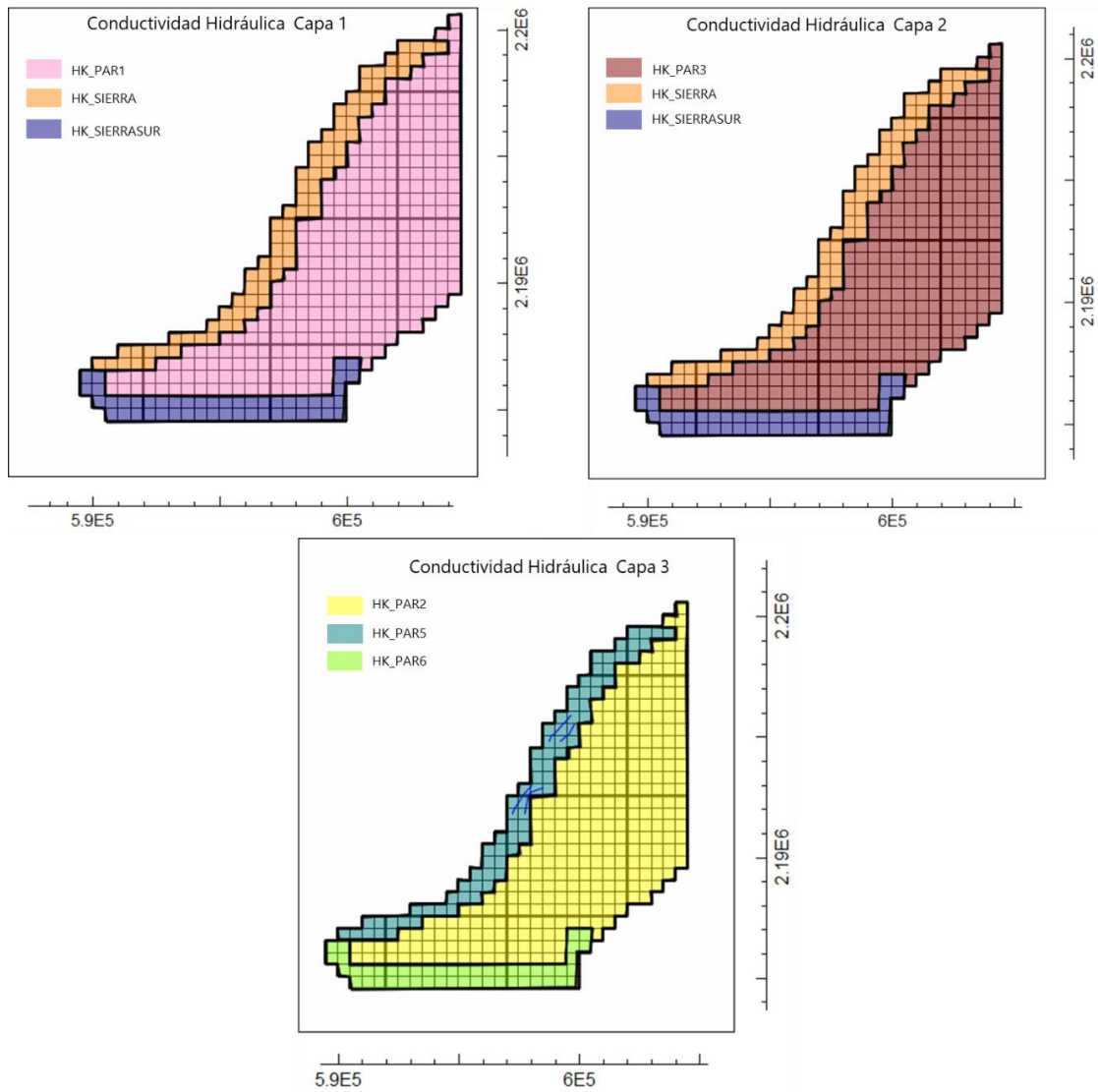


Figura 6.5 Conductividad hidráulica del modelo en las tres primeras capas.

## 6.7 Observaciones

Se asignaron 14 observaciones de carga hidráulica mediante el paquete “*Head Observation*”. Los valores de carga hidráulica se asignaron con base en tres perfiles topográficos del terreno obtenidos en *Surfer*, a cada observación se restó una distancia determinada (Tabla 6.2) con el objetivo de que se siguiera un gradiente en la altura del nivel piezométrico que fuera acorde con la altura del terreno. Las cargas hidráulicas se establecieron mediante la metodología mencionada debido a que, ante la escasez de información, no se contaba con datos de observaciones de cargas hidráulicas dentro de la zona. La tabla 6.2 muestra los valores de carga hidráulica que se utilizaron, así como el valor de la altura topográfica correspondiente a cada observación y sus coordenadas.

<b>No.</b>	<b>Observación</b>	<b>Nivel piezométrico (msnm)</b>	<b>Altura de terreno (msnm)</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>1</b>	OBSCEN1	2315	2334.8	599622	2187421
<b>2</b>	OBSCEN2	2285	2299.1	602503	2190556
<b>3</b>	OBSCEN3	2310	2326.9	600631	2189018
<b>4</b>	OBSCEN4	2312	2319.6	598488	2188929
<b>5</b>	OBSCEN5	2315	2341	596417	2190072
<b>6</b>	OBSCEN6	2310	2336.5	599549	2190937
<b>7</b>	OBSNOR1	2275	2310	603291	2191844
<b>8</b>	OBSNOR2	2275	2296.6	600893	2193157
<b>9</b>	OBSNOR3	2273	2293.2	599041	2194144
<b>10</b>	OBSNOR4	2255	2258.7	602403	2195636
<b>11</b>	OBSNOR5	2257	2266.5	601744	2196153
<b>12</b>	OBSSUR1	2340	2441.6	593142	2185741
<b>13</b>	OBSSUR2	2330	2391.8	596924	2186631
<b>14</b>	OBSUR3	2345	2367.6	594754	2187864

Tabla 6.2 Valores de carga hidráulica de las 14 observaciones estimadas.

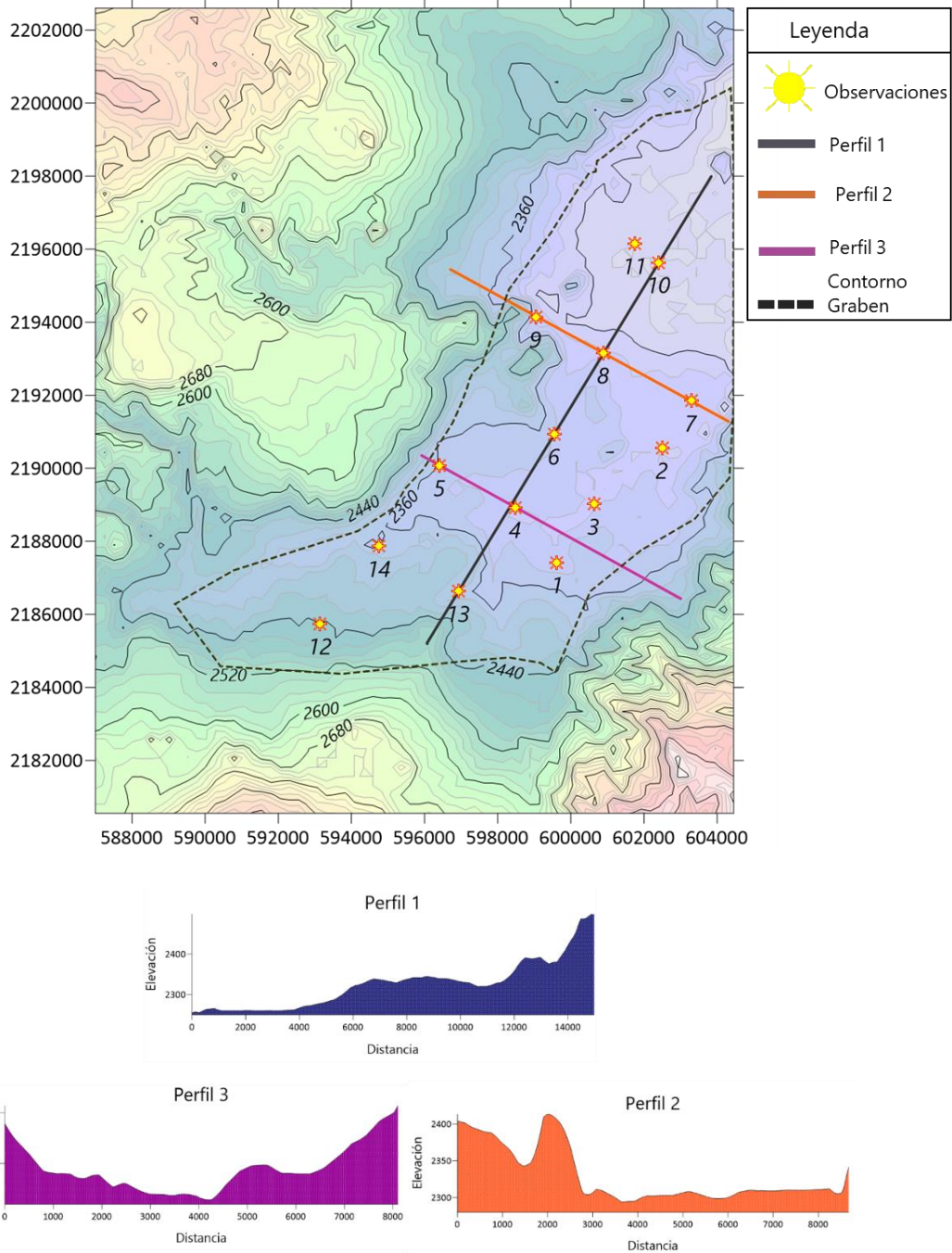


Figura 6.6. A) Ubicación de las observaciones de carga hidráulica dentro del modelo. B) Perfiles topográficos dentro del modelo.

### 6.8 Entradas de fluido geotérmico (Agua caliente)

Se simuló la trayectoria que tendría el fluido geotérmico proveniente de la Caldera de Acoculco hacia el sistema. Las entradas de agua caliente se asignaron en la frontera norte, en las zonas donde existe contacto entre las fallas que tienen dirección NW-SE con la falla de Chignahuapan, debido a que mediante estas es más probable que exista flujo de fluido geotérmico proveniente de la caldera; esta justificación se explica con mayor detalle en el punto 3 del apartado 5.3 del capítulo anterior.

La simulación del flujo de fluido geotérmico se realizó a través de *MODPATH*, un software de post procesamiento que simula la trayectoria tridimensional del movimiento de partículas imaginarias a través de un modelo de agua subterránea, que se encuentre en estado estacionario o transitorio simulado en *MODFLOW* (Pollock, 2016). Se utilizaron 3 objetos para la simulación de las partículas, se asignó una configuración de 1 partícula en la parte central de cada celda. Las ubicaciones se encuentran señaladas en color rojo en la figura 6.7.

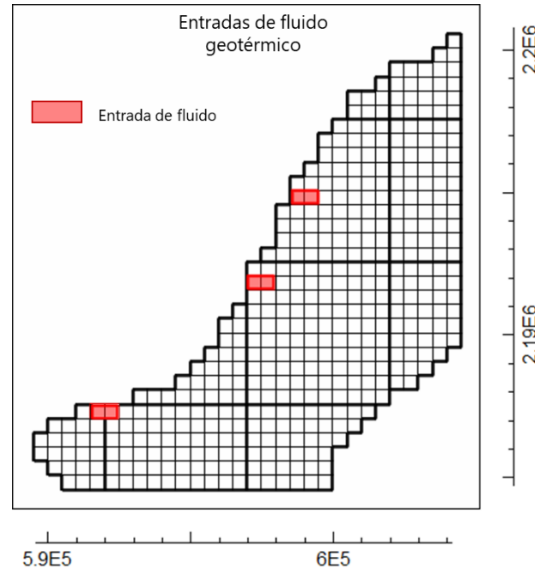


Figura 6.7 Ubicación de los puntos donde se ubica la entrada de fluido geotérmico.

El cálculo de las trayectorias que realiza *MODPATH* se basa en un método que calcula los principales componentes del vector de velocidad en cada punto dentro

del campo de flujo, en función de las tasas de flujo entre las celdas del modelo. La trayectoria de cada partícula se calcula rastreando su posición de una celda a la siguiente hasta que se alcanza un límite, sumidero o fuente.

### 6.9 Estimación de parámetros

El proceso de calibración de un modelo consiste en la modificación de los parámetros de entrada con el objetivo de que los valores calculados sean lo más parecido a los valores medidos (Hill y Tiedeman, 2007). Es por esto que para el presente modelo de flujo se realizó una calibración con el fin de obtener valores de carga hidráulica lo más parecido a las observaciones utilizadas, mediante parámetros que se encontraran dentro de valores aceptables para cada litología. Para el caso de este modelo, las observaciones asignadas de carga hidráulica no fueron valores reales, sin embargo, como se explicó en el apartado 6.7 se buscó simular un gradiente hidráulico acorde a la altura topográfica.

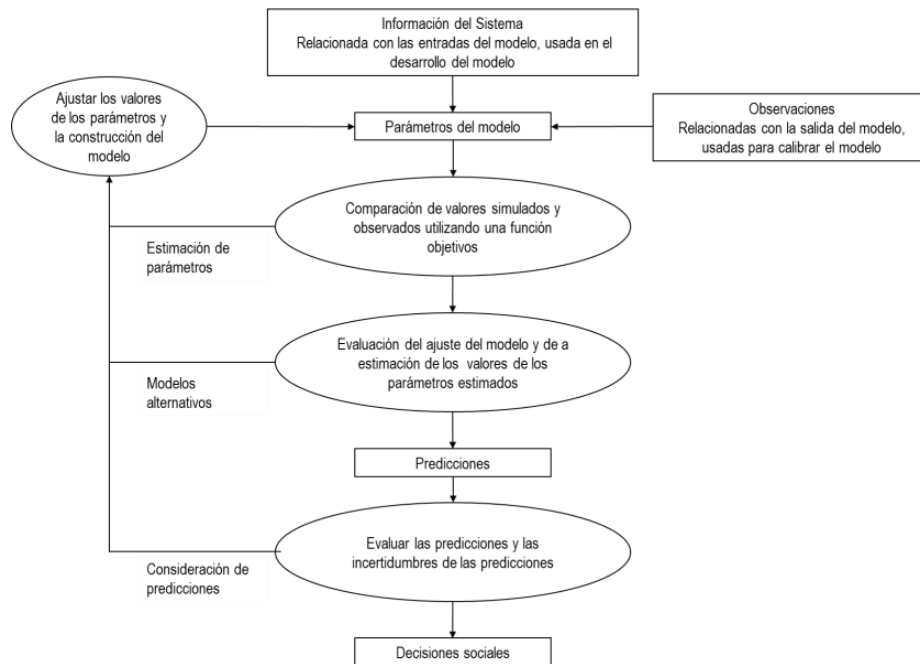


Figura 6.8. Diagrama del proceso general de calibración de modelos (modificado de Hill y Tiedeman 2007).

Para la estimación de parámetros se utilizó el software *UCODE\_2005* por medio de la interfaz gráfica *ModelMate*, ambos desarrollados por el USGS. El proceso de calibración según Hill y Tiedeman (2007) se resume en el diagrama de flujo de la figura 6.8, con base en este método se realizó el ajuste de los parámetros del modelo de flujo.

La fase inicial del proceso para ajustar las salidas del modelo consistió en ajustar el balance hídrico. El modelo se resolvió en estado estacionario, esto implica que se debe cumplir con el principio de conservación de la materia, que para este caso indica que, el volumen de agua que entra al sistema por medio de la recarga debe ser igual al volumen que sale del sistema, a través de la frontera de flujo constante.

El ajuste del balance hídrico del modelo fue a través del método de prueba y error. Primero, se buscaron valores de recarga que arrojaran un volumen de entrada adecuado a la realidad, posterior a esto, se probaron diversos valores de flujo constante de salida hasta que el volumen total de salida fue igual al de entrada.

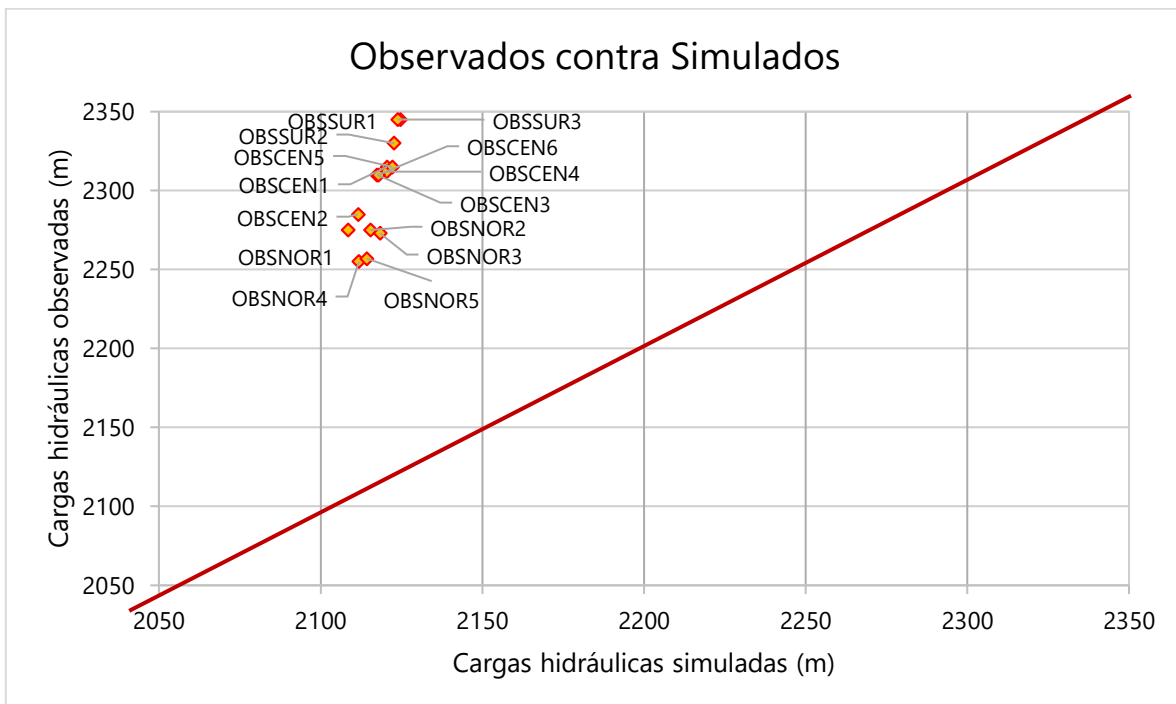


Figura 6.9. Valores de carga hidráulica observados contra simulados para la primera prueba.

Después de lograr el balance hídrico, se realizó el ajuste de los parámetros de acuerdo a la primera parte del procedimiento representado en el diagrama de la figura 6.8. La primera corrida del modelo se realizó con los valores de parámetros reportados en la literatura, los cuales se enlistan en la tabla 6.4 como “Valor antes del ajuste”.

Los resultados de carga hidráulica que se obtuvieron para la primera corrida se señalan en la tabla 6.3. En la figura 6.9 se muestran los valores observados contra calculados.

<b>No.</b>	<b>Observación</b>	<b>Nivel piezométrico (msnm)</b>
<b>1</b>	OBSCEN1	2120.49341
<b>2</b>	OBSCEN2	2124.59424
<b>3</b>	OBSCEN3	2111.57739
<b>4</b>	OBSCEN4	2122.73755
<b>5</b>	OBSCEN5	2117.41211
<b>6</b>	OBSCEN6	2120.38672
<b>7</b>	OBSNOR1	2122.19556
<b>8</b>	OBSNOR2	2117.8584
<b>9</b>	OBSNOR3	2108.51733
<b>10</b>	OBSNOR4	2115.41968
<b>11</b>	OBSNOR5	2118.36572
<b>12</b>	OBSSUR1	2111.85425
<b>13</b>	OBSSUR2	2114.21338
<b>14</b>	OBSUR3	2123.8103

Tabla 6.3 Valores de carga hidráulica para la primera corrida del modelo.

Posteriormente se creó un proyecto en *ModelMate* a partir de los resultados obtenidos de la primera corrida del modelo en *ModelMuse*. En *ModelMate* se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros de conductividad hidráulica mediante el cual se identificaron los parámetros que tenían mayor influencia en el cálculo de los resultados.

Los análisis de sensibilidad que calcula el software *UCODE\_2005* son parámetros estadísticos que sirven entre otras cosas para saber la influencia que tienen las observaciones en la estimación de cada parámetro. *ModelMate* calcula varios tipos de sensibilidades como la sensibilidad escalada adimensional, sensibilidad escalada compuesta y sensibilidad del uno por ciento. En este caso se revisaron los resultados de la sensibilidad escalada compuesta, la cual es adimensional, los resultados se muestran en la figura 6.10.

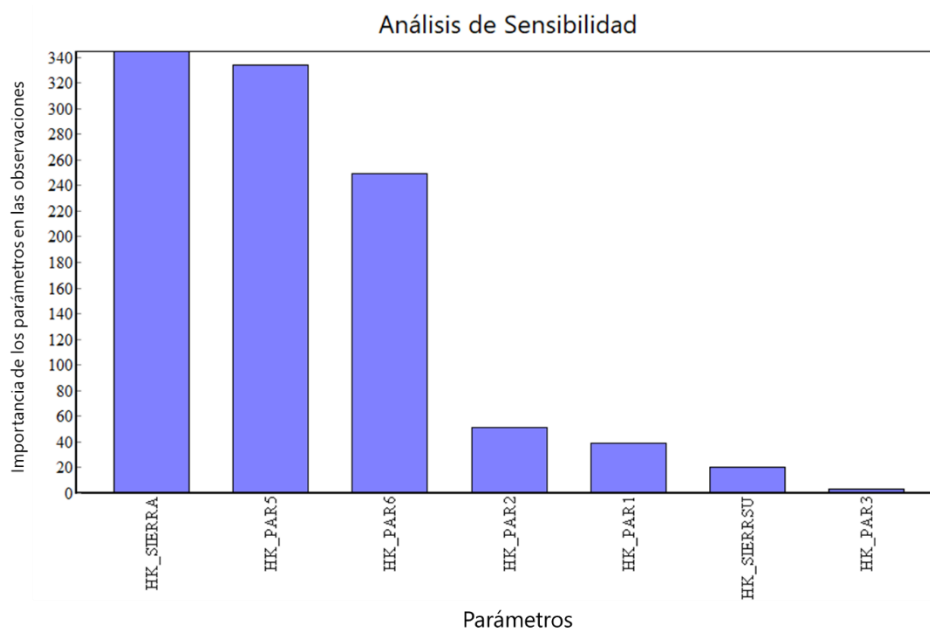


Figura 6.10 Sensibilidades escaladas compuestas de la primera prueba

Por último, teniendo en cuenta la importancia de cada parámetros, se realizó la estimación de parámetros, en la primera prueba en particular se incluyeron todos los parámetros de conductividad hidráulica a excepción de la conductividad hidráulica del basamento. Los nuevos valores de conductividad hidráulica que se obtuvieron se reintrodujeron en *ModelMuse* y se realizó una nueva corrida con lo que se obtuvieron nuevos resultados.



El proceso descrito anteriormente se realizó reiteradamente hasta que se obtuvieron los resultados que más se ajustaban a las observaciones definidas en un principio. Los valores finales de los parámetros se enlistan en la tabla 6.4.

<b>Parámetro</b>	<b>Zona</b>	<b>Valor antes del ajuste</b>	<b>Valor después del ajuste</b>
<b><i>HK_Par 1 (m/s)</i></b>	Rellenos aluviales	1E-5	7.624E-8
<b><i>HK_Par 2 (m/s)</i></b>	Calizas	5E-5	6.547E-6
<b><i>HK_Par 3 (m/s)</i></b>	Basalto	1E-6	1.235E-8
<b><i>HK_Par 4 (m/s)</i></b>	Basamento	1E-15	1E-15
<b><i>HK_sierra (m/s)</i></b>	Sierra norte primer estrato	4.5E-4	1.883E-5
<b><i>HK_sierrasu (m/s)</i></b>	Sierra sur segundo y tercer estrato	1E-4	2.589E-7
<b><i>HK_Par5 (m/s)</i></b>	Sierra norte tercer estrato	5E-4	6.888E-6
<b><i>HK_Par6 (m/s)</i></b>	Sierra sur primer estrato	1.5E-4	7.593E-4
<b><i>RCH_par1 (m/s)</i></b>	Recarga norte segundo y tercer estrato	5.204E-10	1.204E-8
<b><i>RCH_par2 (m/s)</i></b>	Recarga sur	5.201E-8	7.201E-8
<b><i>RCH_par3 (m/s)</i></b>	Recarga norte primer estrato	3.293E-9	4.293E-9

Tabla 6.4 Valores de los parámetros de recarga y de conductividad hidráulica para el modelo numérico.

### **6.10 Salidas modelo numérico hidrogeológico**

Los resultados obtenidos de la simulación en estado estacionario se presentan en el siguiente apartado. Los valores de carga hidráulica que se obtuvieron después del ajuste de parámetros se enlistan en la tabla 6.5. Estos valores muestran un mejor ajuste en los niveles piezométricos calculados por el modelo con respecto a la primera simulación.

<b>No. Observación</b>	<b>Nivel piezométrico observado (msnm)</b>	<b>Nivel piezométrico estimado (msnm)</b>	
<b>1</b>	OBSCEN1	2315	2388.78
<b>2</b>	OBSSUR1	2345	2440.90
<b>3</b>	OBSCEN2	2285	2273.89
<b>4</b>	OBSSUR2	2330	2412.81
<b>5</b>	OBSCEN3	2310	2337.04
<b>6</b>	OBSCEN4	2312	2374.17
<b>7</b>	OBSCEN5	2315	2399.35
<b>8</b>	OBSCEN6	2310	2337.38
<b>9</b>	OBSNOR1	2275	2233.73
<b>10</b>	OBSNOR2	2275	2299.76
<b>11</b>	OBSNOR3	2273	2326.95
<b>12</b>	OBSNOR4	2255	2258.87
<b>13</b>	OBSNOR5	2257	2268.31
<b>14</b>	OBSSUR3	2345	2430.03

Tabla 6.5. Valores de cargas hidráulicas observadas y simuladas para la simulación final.

En la figura 6.11 se muestra la gráfica de valores observados de carga hidráulica contra valores simulados de carga hidráulica. Los valores de carga hidráulica calculados se encuentran en general sobrestimados para la mayoría de las observaciones, en particular para las observaciones SUR se calcularon los valores más altos con respecto a las observaciones.

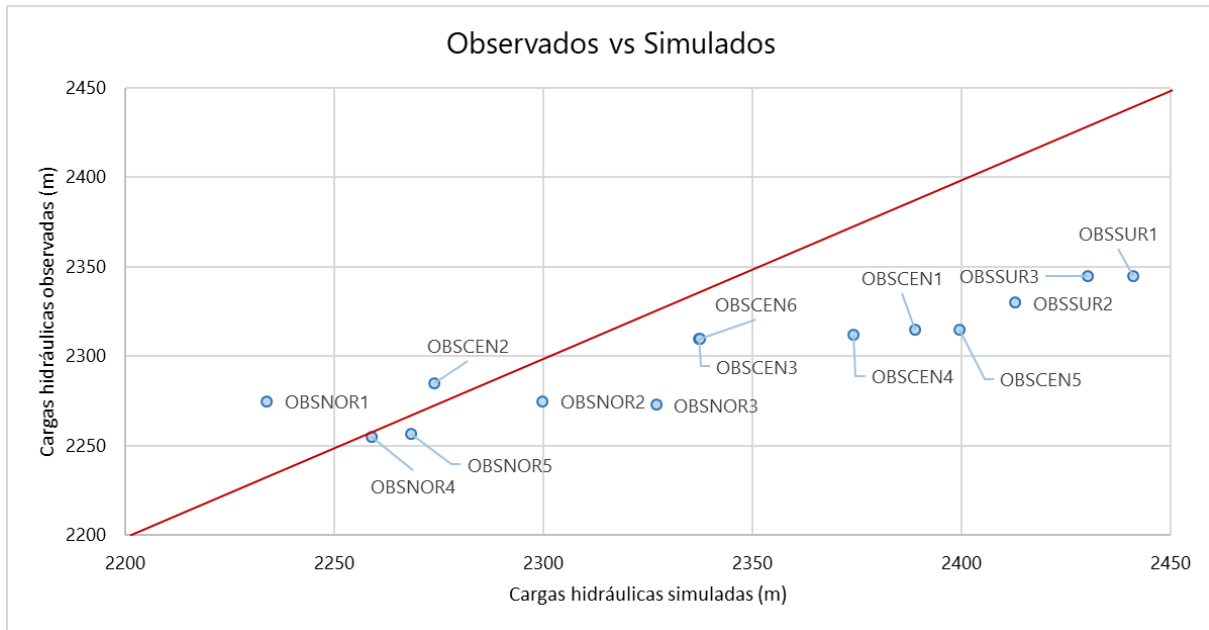


Figura 6.11. Comparación de los valores de carga hidráulica observados contra simulados para la simulación final.

El mapa de isolíneas de la carga hidráulica estimada en la última simulación, está representada en la figura 6.12. El área delimitada en color naranja representa la zona activa del modelo, por lo que esta zona es la más importante y se puede observar un gradiente de nivel de oeste a este, desde los 2440 msnm en la parte oeste hasta los 2210 msnm en el este. Lo anterior concuerda con el gradiente topográfico, pues es en la parte suroeste donde existen mayores elevaciones como se observa en el mapa de la figura 6.6. Este gradiente en la carga hidráulica indica que el flujo subterráneo de agua ocurre de oeste a este al igual que el gradiente topográfico.

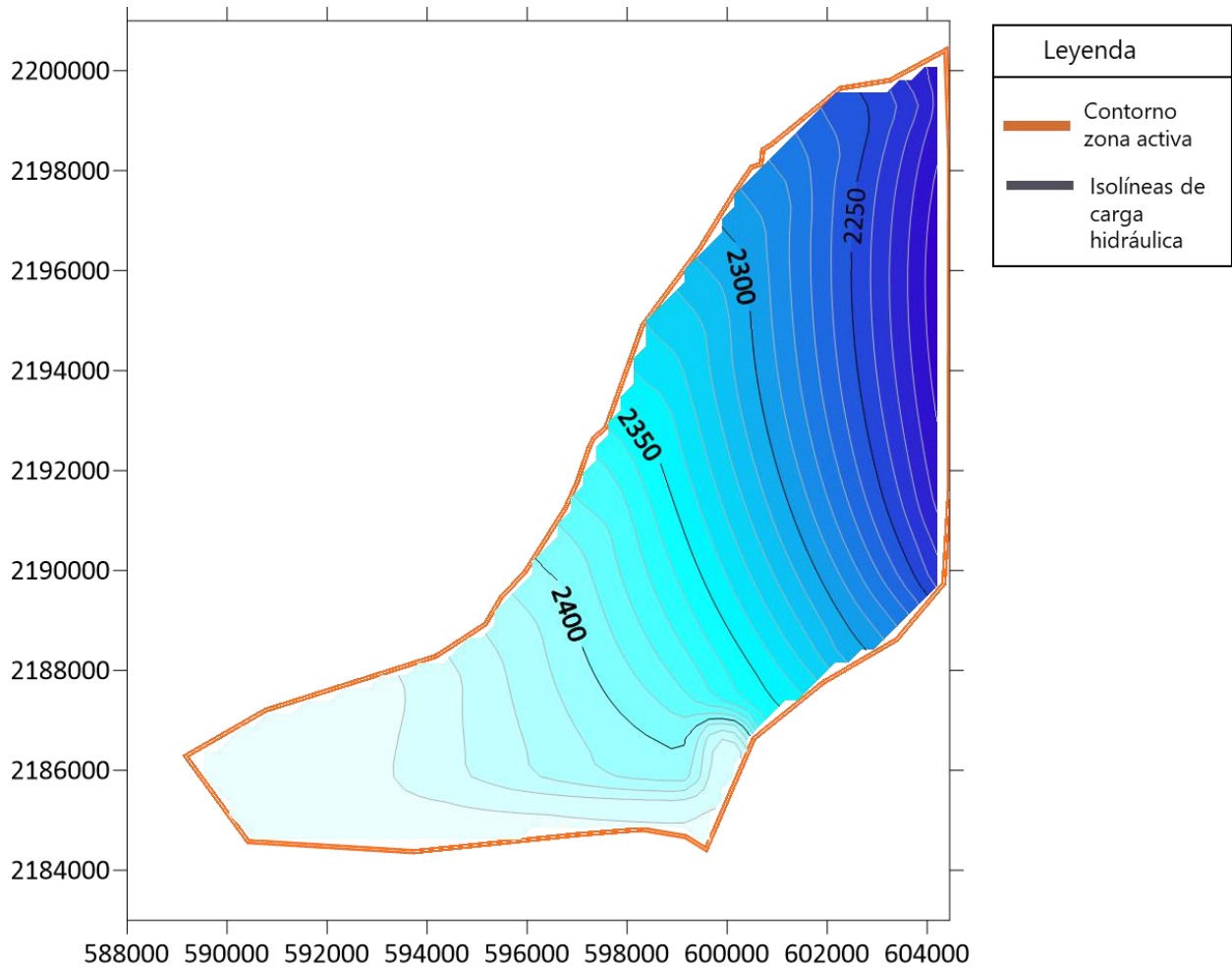


Figura 6.12. Mapa de isolíneas de carga hidráulica del modelo de flujo.

La tabla 6.6 muestra los resultados del balance hídrico. En la parte derecha de la tabla se enlista el volumen de agua que recarga al sistema por cada paso de tiempo ( $1.6324 \text{ m}^3/\text{s}$ ), en la parte izquierda se enlista el volumen total del período de estrés ( $16.3239 \text{ m}^3$ ).

<b>VOLUMEN ACOMULADO</b>		<b>VOLUMEN CADA PASO DE TIEMPO</b>	
<b>ENTRADAS</b> <b>m<sup>3</sup></b>		<b>ENTRADAS</b> <b>m<sup>3</sup>/s</b>	
<i>STORAGE</i>	0	<i>STORAGE</i>	0
<i>WELLS</i>	0	<i>WELLS</i>	0
<i>RECHARGE</i>	16.3239	<i>RECHARGE</i>	1.6324
<i>SPECIFIED FLOWS</i>	0	<i>SPECIFIED FLOWS</i>	0
<i>TOTAL ENTRADAS</i>	16.3239	<i>TOTAL ENTRADAS</i>	1.6324
<b>SALIDAS</b>		<b>SALIDAS</b>	
<i>STORAGE</i>	0	<i>STORAGE</i>	0
<i>WELLS</i>	0.44	<i>WELLS</i>	4.40E-02
<i>RECHARGE</i>	0	<i>RECHARGE</i>	0
<i>SPECIFIED FLOWS</i>	15.8839	<i>SPECIFIED FLOWS</i>	1.5884
<i>TOTAL SALIDAS</i>	16.3239	<i>TOTAL SALIDAS</i>	1.6324
<b>ENTRADAS - SALIDAS</b>	<b>1.91E-06</b>	<b>ENTRADAS - SALIDAS</b>	<b>0</b>

Tabla 6.6 Balance hídrico de la última simulación.

### 6.10.1 Salidas MODPATH

Los resultados de la simulación del flujo de partículas para la simulación del flujo de fluido geotérmico se presentan en las siguientes figuras. En la figura 6.13 se observan las líneas de la trayectoria del flujo que siguieron las partículas a través de la capa 3 que corresponde a las rocas calizas, mediante la cual según la literatura consultada es más probable que exista un flujo proveniente de la Caldera.

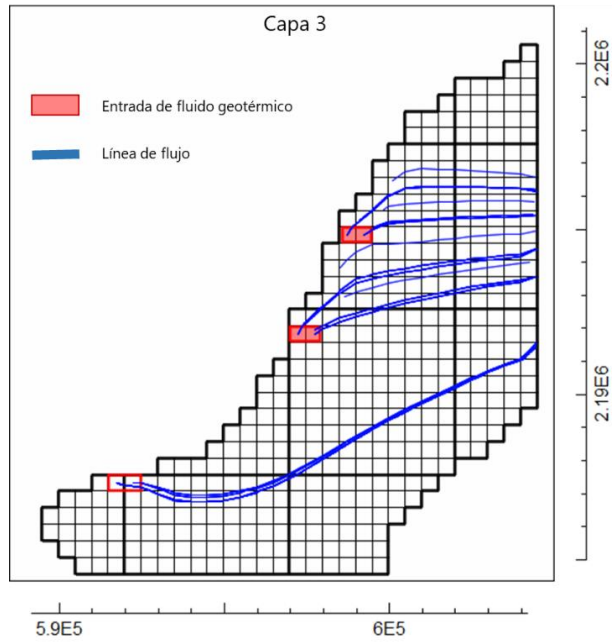


Figura 6.13. Líneas de flujo calculadas por *MODPATH* para la capa 3.

Por otra parte, el mapa de la figura 6.14 representa las líneas de trayectoria de las partículas a través de la segunda capa del modelo, donde se observa la ausencia de líneas de flujo en comparación con las líneas representadas en la tercer capa, indicando que el flujo de agua ocurre prioritariamente a través de esta última.

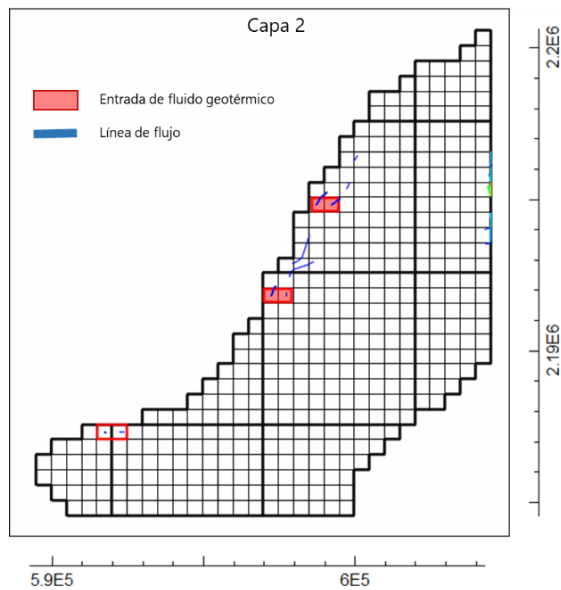


Figura 6.14 Líneas de flujo calculadas por *MODPATH* para la capa 2.

Finalmente, la figura 6.15 es una representación en tres dimensiones de las líneas de flujo de las partículas. Las líneas de flujo en tercera dimensión evidencian lo que se representa en los dos mapas anteriores, pues se puede ver que las trayectorias, indicadas en color azul viajan principalmente a través de la tercera capa.

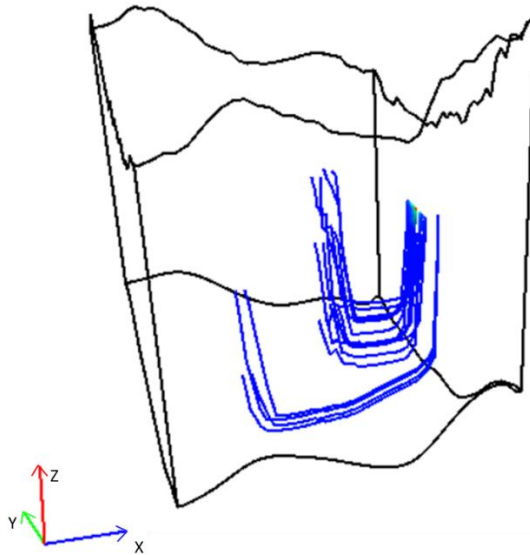


Figura 6.15 Representación 3D de las líneas de flujo calculadas por *MODPATH*.

Los resultados obtenidos tanto en el modelo de flujo subterráneo como en el cálculo de la trayectoria del fluido hidrotermal mediante *MODPATH* están limitados al alcance de los datos con los que se construyeron.

El programa *MODPATH* es un software que calcula las trayectorias de partículas imaginarias, por lo que no toma en cuenta parámetros que son importantes en la simulación de fluidos termales, un ejemplo es la temperatura. Lo anterior implica que el resultado obtenido es una aproximación teórica limitada al alcance del software *MODPATH* y *MODFLOW 2005*.

## 7. Conclusiones

El objetivo general de la tesis es realizar un modelo integral geométrico de la estructura interna de la caldera de Acoculco, teniendo en cuenta toda la información geológica, geofísica, geoquímica e hidrogeológica de la zona, y además reproducir el comportamiento hidrogeológico de las manifestaciones termales en el graben de Chignahuapan.

El modelo integral geométrico que se planteó como objetivo principal en conjunto con el modelo de flujo del Graben de Chignahuapan, permitió evaluar el sistema hidrogeológico de la Caldera de Acoculco, y fue completamente alcanzado. Después de desarrollar el modelo conceptual de la zona y de un riguroso análisis de las condiciones hidrogeológicas de la caldera se llegó a la conclusión de que no existen las condiciones adecuadas para el funcionamiento de un sistema hidrogeológico estacionario en la Caldera.

Se realizó un modelo integral geométrico de la estructura interna de la caldera de Acoculco usando *Voxler*, con base en la integración de la información geohidrológica y geoquímica y la correlación de la misma con los estudios geofísicos y geológicos de la zona.

Debido a las características físicas de las rocas que conforman la estructura interna de la caldera y de los estratos superiores (aproximadamente 1000 m), particularmente su baja permeabilidad no permite que se presenten condiciones favorables para que exista un flujo hidrotermal ascendente dentro de la misma; lo que implica baja probabilidad de albergar un sistema acuífero en la zona de la caldera.

La baja temperatura, la composición química e isotópica de los manantiales ubicados dentro de la Caldera, son otra evidencia de que no existe ascenso vertical de fluido geotérmico.

Con base en los estudios geoquímicos y su integración con el análisis de las fallas mayores ubicadas en la periferia de la Caldera, se dedujo que existe una estrecha



relación entre el Graben de Chignahuapan con el sistema geotérmico de la caldera de Acoculco.

Se elaboró un modelo de flujo del Graben de Chignahuapan, a partir de las evidencias que indican una mayor actividad hidrotermal en los alrededores de la Caldera, un ejemplo de estas es el manantial de Chignahuapan.

La diferencia en alturas entre el graben y la Caldera de Acoculco, en combinación con la orientación de algunas fallas como la de Manzanito, y la continuación del estrato de rocas calizas del Cretácico desde la Caldera hasta el Graben, son las pruebas más destacables con base en las cuales se realizó el modelo de flujo.

La simulación del modelo de flujo en estado estacionario sugiere, por medio de la representación gráfica de las líneas de flujo, que es posible la existencia de un flujo geotérmico, a través de la capa de calizas, desde la Caldera de Acoculco hacia el graben. Cabe señalar que los resultados obtenidos del modelo de flujo subterráneo están limitados por el alcance de los datos con los que se construyeron y del software *MODFLOW 2005*.

El programa *MODPATH* es un software que calcula las trayectorias de partículas y sólo toma en cuenta los parámetros necesarios en la simulación de fluidos termales, sin considerar la temperatura, por lo que el modelo presentado es una aproximación teórica limitada al alcance del software *MODPATH*.

La integración de la información disponible de las disciplinas mencionadas anteriormente, fue fundamental para concebir el funcionamiento del sistema hidrogeológico desde un enfoque holístico, a partir del cual se elaboraron el modelo geológico digital y el modelo de flujo.

Los objetivos planteados al inicio de esta tesis se cumplieron gracias al uso de las herramientas computacionales que se tenían al alcance y a la información en las bases de datos disponibles en la red. Tal es el ejemplo del software de libre acceso *MODFLOW*, especializado en la modelación de flujo subterráneo; los softwares utilizados para la modelación de datos en tres dimensiones y del sistema de

información geográfica *QG/S*. Este último, fue pilar fundamental para el tratamiento de la mayoría de la información utilizada.

## Bibliografía

1. Anderson, M. P., Woessner, W. W., y Hunt, R. J. (2015). **Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport**. Academic press.
2. Avellán, D. R., Macías, J. L., Layer, P. W., Cisneros, G., Sánchez-Núñez, J. M., Gómez-Vasconcelos, M. G., ... y Osorio-Ocampo, S. (2019). **Geology of the late Pliocene–Pleistocene Acozulco caldera complex, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt (México)**. *Journal of Maps*, 15(2), 8-18.
3. Avellán, D. R., Macías, J. L., Layer, P. W., Sosa-Ceballos, G., Gómez-Vasconcelos, M. G., Cisneros-Máximo, G., ... y Pola, A. (2020). **Eruptive chronology of the Acozulco caldera complex—A resurgent caldera in the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt (México)**. *Journal of South American Earth Sciences*, 98, 102412.
4. Avendaño Cortés, J. (2017). **Modelo térmico y de conductividad eléctrica en la caldera Tulancingo-Acozulco, Puebla**. (Tesis de maestría). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México.
5. Boden, D. R. (2016). **Geologic fundamentals of geothermal energy**. CRC Press.
6. Bundschuh, J. (2010). **Introduction to the numerical modeling of groundwater and geothermal systems: fundamentals of mass, energy and solute transport in poroelastic rocks**. CRC Press.
7. Campos-Enríquez, J. O., Domínguez-Méndez, F., Lozada-Zumaeta, M., Morales-Rodríguez, H. F., y Andaverde-Arredondo, J. A. (2005). **Application of the Gauss theorem to the study of silicic calderas: The calderas of La Primavera, Los Azufres, and Los Humeros (Mexico)**. *Journal of volcanology and geothermal research*, 147(1-2), 39-67.
8. Canet, C., Arana, L., González-Partida, E., Pi, T., Prol-Ledesma, R.M., Franco, S.I., Villanueva-Estrada, R.E., Camprubí, A., Ramírez-Silva, G., López-Hernández, A., (2010). **A statistics-based method for the short-wave infrared spectral analysis of altered rocks: An example from the Acozulco Caldera, Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt**. *J. Geochem. Explor.* 105, 1–10.

9. Canet, C., Hernández-Cruz, B., Jiménez-Franco, A., Pi, T., Peláez, B., Villanueva-Estrada, R. E., ... y Salinas, S. (2015). **Combining ammonium mapping and short-wave infrared (SWIR) reflectance spectroscopy to constrain a model of hydrothermal alteration for the Acoculco geothermal zone, Eastern Mexico.** *Geothermics*, 53, 154-165.
10. Canet, C., Trillaud, F., Prol-Ledesma, R. M., González-Hernández, G., Peláez, B., Hernández-Cruz, B., y Sánchez-Córdova, M. M. (2015). **Thermal history of the Acoculco geothermal system, eastern Mexico: Insights from numerical modeling and radiocarbon dating.** *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 305, 56-62.
11. Colombier, M., Wadsworth, F. B., Gurioli, L., Scheu, B., Kueppers, U., Di Muro, A., y Dingwell, D. B. (2017). **The evolution of pore connectivity in volcanic rocks.** *Earth and planetary science letters*, 462, 99-109.
12. Farina, B., Poletto, F., Mendrinós, D., Carcione, J. M., y Karytsas, C. (2019). **Seismic properties in conductive and convective hot and super-hot geothermal systems.** *Geothermics*, 82, 16-33.
13. García-Palomo, A., Macías, J. L., Jiménez, A., Tolson, G., Mena, M., Sánchez-Núñez, J. M., ... y Lermo-Samaniego, J. (2018). **NW-SE Pliocene-Quaternary extension in the Apan-Acoculco region, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt.** *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 349, 240-255.
14. Guerrero-Martínez, F. J., Prol-Ledesma, R. M., Carrillo-De La Cruz, J. L., Rodríguez-Díaz, A. A., y González-Romo, I. A. (2020). **A three-dimensional temperature model of the Acoculco caldera complex, Puebla, Mexico, from the Curie isotherm as a boundary condition.** *Geothermics*, 86, 101794.
15. Harbaugh, Arlen W. (2005). **MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - the Ground-Water Flow Process.** In *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.
16. Hernández Arias, E. H. (2018). **Medición y análisis del flujo de CO<sub>2</sub> en las zonas geotérmicas Alcaparrosa y los Azufres en el estado de Puebla, México (tesis de licenciatura).** Universidad Nacional Autónoma de México. Temixco, México.

17. Hernández-Hernández, M. A., Sánchez Quispe, S. T., y López, H. (2017, November). **Caracterización física de los manantiales localizados al sur del Sistema hidrotermal de Aocolco (Puebla, México) (Physical characterization of springs located south of the Aocolco Hydrothermal System (Puebla, Mexico))**. In Ibero-American Seminar on Water and Drainage Networks (SEREA 2017).
18. Hill, L. L. (2006). **Georeferencing : the geographic associations of information**. The MIT Press.
19. Hill, M. y Tiedeman, C. (2007) **Effective groundwater model calibration: with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty**. Wiley, Nueva Jersey, EUA. 455 pp.
20. Kearey, Philip, et al. **An Introduction to Geophysical Exploration**, John Wiley y Sons, Incorporated, 2013.
21. Lewis, M. A., Cheney, C. S., y O Dochartaigh, B. E. (2006). **Guide to permeability indices**. *British Geological Survey report*.
22. López-Hernández, A., García-Estrada, G., Aguirre-Díaz, G., González-Partida, E., Palma-Guzmán, H., y Quijano-León, J. L. (2009). **Hydrothermal activity in the Tulancingo–Aocolco Caldera Complex, central Mexico: exploratory studies**. *Geothermics*, 38(3), 279-293.
23. Navarro, A. P. (2011). **Introducción a los sistemas de información geográfica y geotelemática** (Vol. 173). Editorial UOC.
24. Palomo, A. G., Macías, J. L., Tolson, G., Valdez, G., y Mora, J. C. (2002). **Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt**. *Geofísica Internacional*, 41(2), 133-150.
25. Parasnis, D. S. (2012). **Principles of applied geophysics**. Springer Science y Business Media.
26. Peiffer, L., Bernard-Romero, R., Mazot, A., Taran, Y. A., Guevara, M., y Santoyo, E. (2014). **Fluid geochemistry and soil gas fluxes (CO<sub>2</sub>–CH<sub>4</sub>–H<sub>2</sub>S) at a promissory Hot Dry Rock Geothermal System: The Aocolco caldera, Mexico**. *Journal of volcanology and geothermal research*, 284, 122-137.
27. Poletto, F., Farina, B., y Carcione, J. M. (2018). **Sensitivity of seismic properties to temperature variations in a geothermal**

- reservoir.** *Geothermics*, 76, 149-163.
28. Pollock, D.W., 2016, **User guide for MODPATH Version 7 -- A particle-tracking model for MODFLOW:** U.S. Geological Survey Open-File Report 2016-1086, 35 p.
29. Prol-Ledesma, R. M., y Morán-Zenteno, D. J. (2019). **Heat flow and geothermal provinces in Mexico.** *Geothermics*, 78, 183-200.
30. Pulido, C. L., Armenta, M. F., y Silva, G. R. (2011). **Caracterización de un yacimiento de roca seca caliente en la zona geotérmica de Acoculco, Pue.** *Geotermia*, 24(1), 59-69.
31. Quinto, A., Santoyo, E., Torres, V., González, E., y Castillo, D. (2015). **Estudio geoquímico-ambiental de los efluentes naturales producidos en la zona geotérmica de Acoculco, Puebla.** *Tecnología y ciencias del agua*, 10(3), 21-27.
32. Sánchez-Córdova, M. M., Canet, C., Rodríguez-Díaz, A., González-Partida, E., y Linares-López, C. (2019). **Water-rock interactions in the Acoculco geothermal system, eastern Mexico: Insights from paragenesis and elemental mass-balance.** *Geochemistry*, 125527.
33. Singhal, B. B. S., y Gupta, R. P. (2010). **Applied hydrogeology of fractured rocks.** Springer Science y Business Media.
34. Sosa-Ceballos, G., Macías, J. L., Avellán, D. R., Salazar-Hermenegildo, N., Boijseauneau-López, M. E., y Pérez-Orozco, J. D. (2018). **The Acoculco Caldera Complex magmas: Genesis, evolution and relation with the Acoculco geothermal system.** *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 358, 288-306.
35. Šperl, J., y Trčková, J. (2008). **Permeability and porosity of rocks and their relationship based on laboratory testing.** *Acta Geodyn Geomater*, 5(149), 41-47.
36. Stober, I., y Bucher, K. (2013). **Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development** (2013.a ed).
37. Tarolli, P., y Mudd, S. M. (2020). **Remote sensing of geomorphology (First edition).** Elsevier.

38. Telford, W. M., Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., y Sheriff, R. E. (1990). **Applied geophysics**. Cambridge university press.
39. UACH-INE (2002), **Estudio de Ordenamiento Ecológico Territorial de las cuencas hidrológicas de los ríos Necaxa y Laxaxalpan**, informe final, Universidad Autónoma Chapingo-Instituto Nacional de Ecología, México.
40. Viggiano-Guerra, J. C., Armenta, M. F., y Silva, G. R. (2011). **Evolución del sistema geotérmico de Acoculco, Pue., México: un estudio con base en estudios petrográficos del pozo EAC-2 y en otras consideraciones**. Geotermia, 24(1), 14-24.