

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE GEOGRAFÍA



**“REGISTRO DE ALGUNAS MANIFESTACIONES GEOTÉRMICAS
EN EL ESTADO DE MÉXICO Y SUS CARACTERÍSTICAS
GEOLÓGICO-AMBIENTALES”**

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RECURSOS HÍDRICOS

PRESENTA

Antonio Cruz Alberto

ASESOR DE TESIS

Dr. en C. T. Edgar Ángeles Moreno

REVISORES DE TESIS

Dr. en C. Héctor Víctor Cabadas Báez

Dr. en C. I. José Luis Expósito Castillo

Toluca, Estado de México, octubre 2019

RESUMEN

La geotermia es un tipo de energía mucho más eficiente y con una suficiente capacidad para operar todos los días, las 24 horas del año además de que brinda energía, puede brindar otros servicios como secar madera, deshidratar frutas o también como centro de recreación utilizando sus aguas termales.

En este trabajo se exponen las características geológicas, hidrogeológicas compiladas y condiciones geológico-ambientales de algunas manifestaciones geotermiales en el estado de México como El Borbollón (Temascalcingo), San Pedro de Los Baños (Valle de Ixtlahuaca), Las Rajas (Sierra de Las Cruces) e Ixtapa-Tonatico. El objetivo principal fue registrar y evaluar estas manifestaciones geotermiales desde el punto geológico ambiental a través de la caracterización geológica para posteriormente reconocer algunos problemas geológico-ambientales relacionados con la manifestación geotermal. Las metodologías empleadas comprendieron investigación documental, geología de campo, fotointerpretación geológica e integración de resultados.

En cada área de la manifestación geotermal se realizó su cartografía geológica, alteración hidrotermal e inferencias de temperatura a partir de descripciones mineralógicas.

Los resultados de este trabajo muestran que algunas manifestaciones geotermiales han sido centros hidrotermales de larga vida, están dentro de contextos volcánicos no muy antiguos, y presentan un control de fallas y fracturas geológicas en el flujo del fluido hidrotermal, así como dependencia de la extracción de agua subterránea. Las alteraciones hidrotermales que se presentan son silicificación, argilización, y carbonatación. Se encontraron evidencias de varios problemas ambientales dentro y en los alrededores de las manifestaciones geotermiales, así como desaparición de algunas de ellas por abatimiento de niveles freáticos.

ABSTRACT

Geothermal energy is a more efficient source of energy and with a sufficient capacity to operate 24 hours a year, in addition to providing energy it can offer other services, such as drying wood, dehydrating fruits are also as a recreation center using his hot springs.

In this work the geological, hydro-geological compiled characteristics and geological-environmental conditions of some geothermal manifestations in the state of Mexico are exposed and they are: El Borbollón (Temascalcingo), San Pedro de Los Baños (Valle de Ixtlahuaca), Las Rajas (Sierra de Las Cruces) e Ixtapan-Tonatico.

The main objective was to register and evaluate these geothermal manifestations from the geological, environmental point through geological characterization, subsequently recognizing some geological-environmental problems related to the geothermal manifestation. The methodologies used included documentary research, field geology, geological photo-interpretation and integration of results.

In each area, geological mapping was prepared for each manifestation based on thermal alteration and temperature inferences beginning with mineralogical descriptions.

The results of this work show that some geothermal manifestation have been hydrothermal centers of long activity, are within not very old volcanic contexts and have a fault control, in addition to feeding on the flow of the hydrothermal fluid, as well as dependence on water extraction underground.

The hydrothermal alterations that are exhibited are silification, argillitization and carbonation. Evidence of environmental problems was found inside and outside these geothermal manifestations, as well as the disappearance of some due to the depletion of freatic levels.

Índice

Capítulo 1.	7
Introducción	7
1.1 Justificación	9
1.2 Hipótesis	11
1.3 Objetivos	11
1.3.1 Objetivo general	11
1.3.2 Objetivos específicos.....	11
1.4 Área de estudio	12
Capítulo 2.	14
Metodología	14
2.1 Investigación documental	14
2.2 Fotointerpretación geológica	14
2.3 Geología de Campo	15
2.4 Integración y análisis de datos	16
Capítulo 3.	17
Marco teórico	17
3.1 Historia de la geotermia.....	17
3.2 El desarrollo de la geotermia en México	18
3.2.1 La Faja Volcánica Transmexicana y sus características geotérmicas:.....	19
3.2.2 Algunos campos geotérmicos de otras partes de México Cerro Prieto, Tres Vírgenes	24
3.3 Estructura de un sistema geotérmico	27
3.4 Algunas clasificaciones de yacimientos geotérmicos	28

3.4.1 Sistemas hidrotermales.....	29
3.4.2 Sistemas geotérmicos mejorados (EGS) o de roca seca caliente.	30
3.4.3 Sistemas geopresurizados.....	31
3.4.4 Sistemas marinos.....	31
3.4.5 Sistemas magmáticos	32
3.5 Geología y manifestaciones geotérmicas en el Estado de México	33
3.5.1 Geología	33
3.5.2 Manifestaciones geotérmicas en el Estado de México.....	35
Capítulo 4.	37
Características geológico-ambientales de algunas manifestaciones geotérmicas en el Estado de México	37
4.1 San Pedro de los Baños.....	39
4.1.1 Geología	39
4.1.2 Hidrogeología.....	48
4.1.3 Características geológico-ambientales	52
4.1.4 Características geotermales	55
4.2 Temascalcingo (El borbollón)	56
4.2.1 Geología	56
4.2.2 Hidrogeología.....	63
4.2.3 Características geológico-ambientales	65
4.2.4 Características geotermales	67
4.3 Ixtapan de la Sal-Tonatico	69
4.3.1 Geología	69
4.3.2 Hidrogeología.....	72
4.3.3 Características geológico-ambientales	72

4.3.4 Características geotermales	73
4.4 Las rajás	75
4.4.1 Geología	75
4.4.2 Hidrogeología.....	80
4.4.3 Características geológico-ambientales	81
4.4.4 Características geotermales	81
Capítulo 5. Discusión: Problemas geológico-ambientales alrededor de las manifestaciones geotermales.....	85
5.1 El Borbollón.....	85
5.2 San Pedro de los Baños.....	87
5.3 Las Rajas.....	89
5.4 Ixtapan de la Sal – Tonicato.....	91
CONCLUSIONES	93
REFERENCIAS	95

Capítulo 1.

Introducción

La energía, ya sea de tipo eléctrica, fósil, mecánica o calorífica, son un componente esencial para la vida y desarrollo de las ciudades. El consumo de combustibles fósiles como una fuente de energía no renovable, se ha transformado en un problema ambiental porque es la principal fuente de emisión de gases invernadero siendo, además, el precursor en el cambio climático; por lo que la energía geotérmica surge como una solución al cambio climático y que se encuentra dentro del grupo de energías renovables con mayor eficiencia de producción de energía eléctrica favorable con el ambiente.

Actualmente existe un gran apoyo económico a proyectos geotérmicos a nivel mundial y nacional. En el caso de México existe una mayor participación por instituciones como, la Comisión Nacional de Electricidad (CFE), Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIGEO) e instituciones de investigación vinculadas a la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

En México existe la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) que es un arco volcánico activo que cruza de este a oeste el centro de México, en él se encuentran varios campos y manifestaciones geotérmicas; los campos geotérmicos más importantes son: Los Azufres, Los Humeros y El Pathé. El Estado de México en su mayor parte está formado por rocas volcánicas de la FVTM y muchas de estas rocas volcánicas son muy jóvenes geológicamente.

Un sistema geotérmico necesita contar con una fuente de calor que normalmente son rocas ígneas de edades geológicas recientes y también necesita contar con acuíferos que contengan un volumen de agua subterránea suficiente, que en el caso del Estado de México existen regiones, por ejemplo, la Cuenca de del Valle de Toluca, que es reconocida por contar con importantes recursos hídricos. Desde el punto de vista turístico se conocen algunas

manifestaciones termales en el estado como, por ejemplo: Ixtapa de la Sal, Temascalcingo, y Tonicato, sin embargo, estas manifestaciones termales no se han caracterizado desde el punto de vista geológico o geológico-ambiental por lo que se requiere de información básica para futuras evaluaciones más completas con un enfoque geotérmico.

Es por ello que este trabajo se planteó registrar y evaluar algunas manifestaciones geotérmicas del Estado de México con el enfoque geológico ambiental, a través de la caracterización geológica, además, de realizar el reconocimiento de algunos problemas ambientales relacionados con la manifestación geotérmica.

En este trabajo las zonas de estudio comprenden a varias zonas específicas en el que existen manifestaciones geotermales: San pedro de los baños (Ixtlahuaca), El Borbollón (Temascalcingo), Balneario de Tonicato (Tonicato), Ixtapan de la Sal y Las Rajas. Algunas de las manifestaciones anteriormente nombradas han sido estudiadas en trabajos previos con fines terapéuticos, en este trabajo se analizó desde el punto geológico ambiental para determinar sus características geológicas y geológico ambientales, así como algunos problemas de tipo geológico-ambiental que afectan a la manifestación geotermal.

1.1 Justificación

Recientemente la mayoría de las naciones han basado su crecimiento económico en los combustibles fósiles como si fuesen infinitos (International Solar Energy Society, 2002). Actualmente la economía y el sector nacional se ven atraídos por alternativas diferentes a los hidrocarburos, un ejemplo son las energías renovables, como la energía eólica, geotérmica y biocombustibles. Un aspecto importante con el uso de energía es reducir el impacto ambiental; aunque el pensamiento corporativo define que estas reducciones deberían ser conllevadas a futuro por las siguientes generaciones (REN´s 21, 2017).

En México se ha impulsado la transición energética por instituciones y organismos públicos como CFE, CONACyT, UNAM y CEMIGEO a energías renovables (Yáñez Dávila, 2016). En parte el impulso a esta transición se debe la ocurrencia de crisis energéticas en tiempos históricos, como lo ocurrido por los países productores de petróleo del Medio Oriente cuando declararan un embargo a los E.U.A. y otros países industrializados como respuesta a la guerra de Yom Kippur en 1973 (Salazar, 2009).

De acuerdo a Salazar (2009) a partir Yom Kippur sucedieron otras como: la segunda crisis energética – revolución iraní de 1979, guerra del Golfo Pérsico de 1990 y 1990 y 1999, crisis mundial de 2002 y crisis financiera inmobiliaria 2007-2008. En el mundo se buscan nuevas energías y la población, que es cada vez más consciente de que las energías renovables y la eficiencia energética, son críticas en sus acciones para atender los problemas del cambio climático, crear nuevas oportunidades económicas y proporcionar acceso a la energía a los miles de millones de personas que aún no cuentan con servicios modernos para el suministro de electricidad (Renewables Global Status Report, 2015).

La energía geotérmica en México de acuerdo con Hernández-Zúñiga (2014), es una opción sustentable con el ambiente ya que no genera un alto impacto en emisiones contaminantes sobre la atmosfera. Además, y de acuerdo con González Ruiz et al., (2015) es una energía renovable, prácticamente inagotable, con un sentido tecnológico sólido, limpia, versátil y útil para generar electricidad entre otras múltiples aplicaciones.

Debido a que las emisiones que genera la energía geotérmica se componen prácticamente de vapor de agua, su uso no presenta riesgo ambiental para nuestro planeta (Santoyo y Barragán, 2010). Hoy en día, la geotermia representa el 0.4 por ciento del total de la generación eléctrica mundial, aun cuando sólo se explotan los sistemas hidrotermales de alta temperatura, que constituyen una fracción muy pequeña de la inmensa cantidad de energía disponible en la Tierra (Santoyo y Barragán 2010).

De acuerdo con Beasley et al., (2010) la geotermia cumple con varias expectativas en eficiencia, de las cuales se han realizado comparaciones en su capacidad, confiabilidad de suministro de energía y la generación de impactos al ambiente, la energía geotérmica cumple con un 86% a 95% de capacidad además de que su suministro es continuo y confiable los impactos ambientales que genera en el uso del suelo y al ambiente son mínimos, en comparación con otras energías renovables (Tabla 1).

Fuentes de energía renovable	Factor de capacidad, %	Confiabilidad del suministro	Impacto ambiental	Aplicación principal
Geotérmica	86 a 95	Continuo y confiables	Mínima ocupación del suelo	Generación de electricidad
Biomasa	83	Confiable	Mínimo (manipulación de material no combustible)	Transporte, calefacción
Hidroeléctrica	30 a 35	Intermitente, depende del clima	Impactos debido a la construcción de diques	Generación de electricidad
Eólica	25 a 40	Intermitente, depende del clima	Antiestético para generación en gran escala	Generación de electricidad (limitada)
Solar	24 a 33	Intermitente, depende del clima	Antiestético para generación en gran escala	Generación de electricidad (limitada)

TABLA 1. Datos de factores de capacidad de Kagel A: *A handbook on the externalities, employment, and economics of geothermal energy.* Washington, DC: Geothermal Energy Association, 2006

El Estado de México tiene elementos geológicos y geológico-ambientales para contener recursos geotérmicos ya que una gran parte de su territorio se encuentra dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y las rocas volcánicas de este arco volcánico continental son muy jóvenes desde el punto de vista geológico (Siebe et al., 1992; Arce et al., 2003). El Estado de México es cercano a algunos campos geotérmicos importantes de la FVTM como los son Los Azufres (Birkle et al., 2001) y el Pathé (Gutiérrez-Negrín et al., 2000). Adicionalmente a nivel estatal se conocen desde el punto de vista turístico algunas manifestaciones termales en el estado, por ejemplo: Ixtapan de la Sal, Temascalcingo y Tonicato, sin embargo, es necesario caracterizar cada manifestación para que los habitantes de cada lugar les den un óptimo aprovechamiento a sus aguas sin repercutir en problemas geológico-ambientales.

1.2 Hipótesis

La caracterización geológico-ambiental de algunas manifestaciones geotermales del Estado de México puede representar un punto de partida en el conocimiento de sistemas geotérmicos a nivel estatal ya que se carece de información geológica básica de estas manifestaciones.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Registrar y evaluar algunas manifestaciones geotermales en el Estado de México, desde el punto geológico ambiental a través de la caracterización geológica para posteriormente reconocer algunos problemas geológico-ambientales relacionados con la manifestación geotérmica.

1.3.2 Objetivos específicos

- Registrar y copilar posibles manifestaciones geotérmicas en el Estado de México mediante las técnicas cartográficas de gabinete y campo para establecer una primera aproximación a las manifestaciones geotérmicas existentes en el estado.
- Realizar un mapa geológico para cada una de las manifestaciones geotermales tratadas en este trabajo mediante el empleo de metodologías de la geología para tener una base sólida de su contexto geológico.

- Determinar e inferir algunas propiedades geotermales (temperatura, extensión y tamaño) de las manifestaciones con base en sus características geológicas y que servirán de pauta en la caracterización de estas manifestaciones geotermales en la caracterización desde el punto de vista geotérmico.
- Describir y caracterizar algunas problemáticas ambientales alrededor de las manifestaciones geotermales mediante la interpretación de la cartografía geológico-ambiental.

1.4 Área de estudio

El área de estudio comprende a varias zonas individuales de acuerdo a la localización de algunas de las manifestaciones geotermales dentro del Estado de México (Figura 1.1) como son el Borbollón (Temascalcingo), San Pedro de Los Baños, Las Rajas e Ixtapan de la Sal-Tonatico. El Estado de México colinda con los estados de Querétaro, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, Ciudad de México, Morelos, Guerrero y Michoacán, además el estado cuenta con 125 municipios, de esos 125 municipios las manifestaciones geotermales tratadas en este trabajo de tesis se ubican en los municipios Ixtlahuaca (San Pedro de Los Baños), Temascalcingo (El Borbollón), Ixtapan de la Sal, Tonatico y Lerma (Las Rajas).

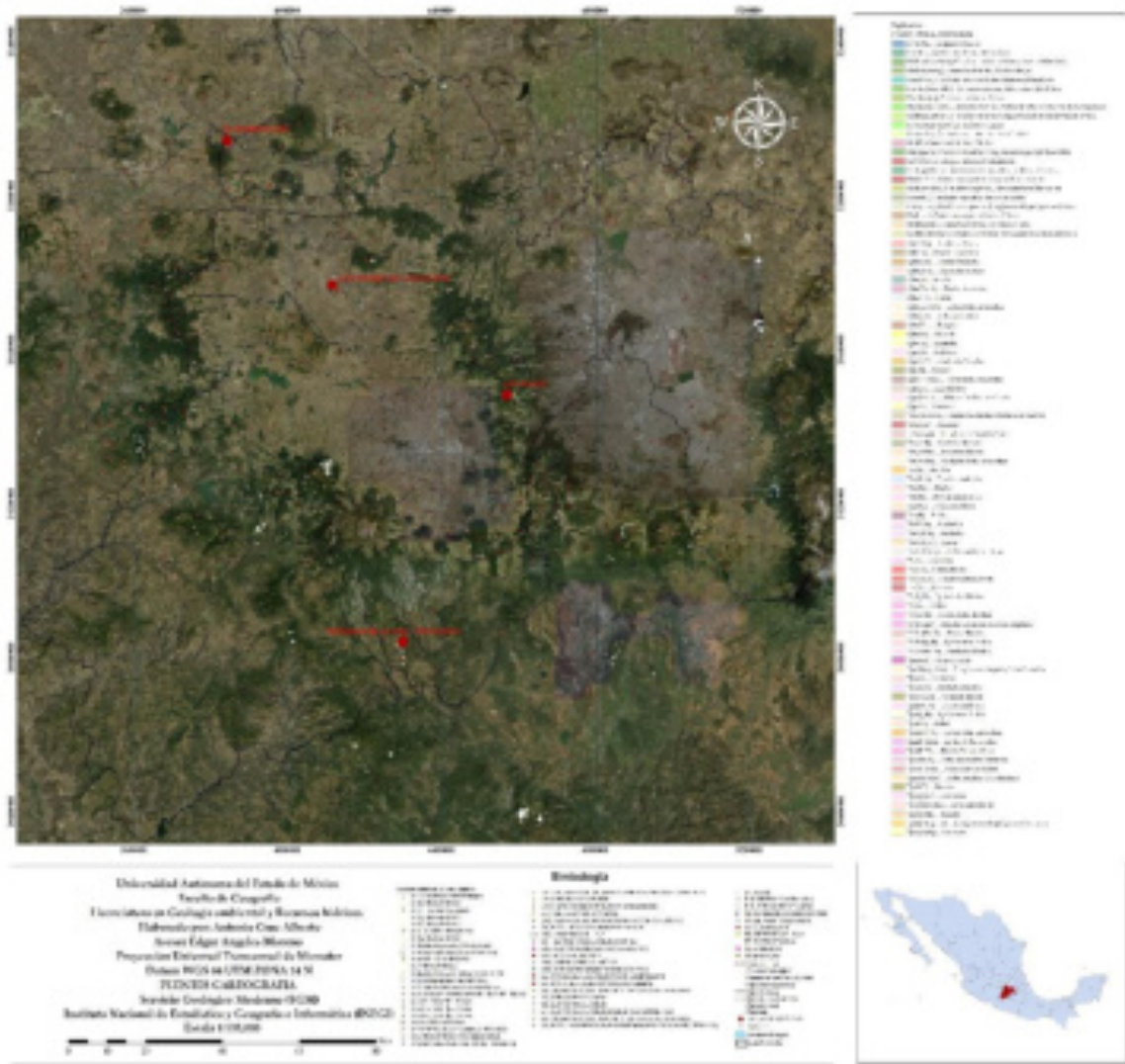


Figura 1.1 Ubicación de las áreas de manifestaciones geotérmicas tratadas en este trabajo en el contexto geográfico del Estado de México

Capítulo 2.

Metodología

2.1 Investigación documental

En este trabajo de tesis para lograr los objetivos planteados se emplearon las metodologías de investigación documental, fotointerpretación geológica, geología de campo y la integración y el análisis de datos. Estas metodologías llevan a concretar la caracterización geológico-ambiental de cada una de las manifestaciones geotermales tratadas en este trabajo (San Pedro de Los Baños, El Borbollón, Ixtapan de la Sal-Tonatico y Las Rajas).

La investigación documental se compone en la búsqueda bibliográfica como: libros, artículos, revistas, cartografía, investigaciones, informes y/o documentos (Hernández-Sampieri et al, 2014). A partir de los documentos encontrados se realizó una selección, integración y análisis de información. Esta investigación empleó en estudios previos relacionados a las componentes de un sistema geotérmico como la geología, hidrología y geofísica (Beasley et al, 2010); y también algunas investigaciones a nivel nacional e internacional desde el punto de vista geotérmico e hidrotermal (Hiriart Le Bert, 2011). Se realizó una búsqueda cartográfica y se emplearon algunos datos del Servicio Geológico Mexicano (SGM), IFOMEGEM, INEGI, CONAGUA, CFE y Servicio Geológico de los Estado Unidos (USGS).

2.2 Fotointerpretación geológica

La fotointerpretación geológica pretende obtener un mapa geológico-ambiental preliminar que sirva de guía durante el trabajo geológico de campo. La foto interpretación se realizó para cada zona de estudio con alguna manifestación geotermal utilizando la cartografía de

INEGI y las imágenes satelitales de Google Earth, así como de Landsat 7 y 8. Esta fotointerpretación consistió en identificar posibles estructuras y lineamientos geológicos, así como zonas de alteración. Algunas zonas de alteración se relacionaron con puntos geotérmicos dentro del contexto geológico. Estas primeras etapas sirvieron para obtener un mapa geológico preliminar que sirvió de base durante el trabajo geológico de campo y para al final tener un mapa geológico para cada área de manifestación geotérmica.

2.3 Geología de Campo

La geología de campo, de acuerdo a Compton (1985), comprende una serie de metodologías, técnicas y procedimientos que buscan resolver problemas geológicos; la geología de campo permite tres cosas: que los materiales geológicos y estructuras geológicas se pueden identificar más fácilmente cuando se establecen relaciones con otras características naturales, las interpretaciones realizadas en el campo pueden ser cotejadas con las relaciones geológicas que son predichas en el gabinete y el estudio de las relaciones actuales puede llevar a descubrimientos de nuevas relaciones geológicas y generación de nuevas ideas.

El trabajo geológico de campo que se desarrolló en la presente tesis, implicó varias etapas como fueron establecer el contexto geológico de las manifestaciones geotermiales, la revisión geológica en campo de afloramientos de materiales naturales relacionados con las manifestaciones geotermiales, la elaboración de mapas geológicos de campo y la correcta descripción de las características geotermiales reconocidas. En parte en este trabajo de campo se corroboraron los contactos geológicos, se realizaron algunas secciones esquemáticas. Se analizó la mineralogía y la identificación de tipo de alteraciones hidrotermales en los afloramientos; estos datos permitieron inferir las temperaturas de las zonas con las manifestaciones geotermiales. Algunos datos estructurales como fracturas, fallas o cualquier lineamiento de tipo estructural. Se colectaron algunas muestras de roca representativas para describir la mineralogía y las asociaciones minerales en alteraciones hidrotermales para tener identificada la alteración.

2.4 Integración y análisis de datos

Los resultados al hacer uso de las metodologías anteriormente expuestas se integraron y se analizaron en conjunto. Los productos obtenidos fueron la cartografía geológica para cada área de la manifestación geotermal, una columna estratigráfica del área en específico, características geotermales y un análisis geológico-ambiental, por último, una descripción de problemáticas ambientales entorno a la manifestación (Figura 2.1). Esta integración de datos se apoyó en el uso de herramientas geotecnológicas como el SIG (Sistema de Información Geográfica) representada por el software QGIS.



Figura 2.1 Esquema metodológico del desarrollo de este trabajo de tesis

Capítulo 3.

Marco teórico

3.1 Historia de la geotermia

La palabra “geotermia” proviene de los vocablos griegos “*geo*”, Tierra y “*termos*”, calor. Se define como la energía o calor natural que proviene del interior de la Tierra, este calor proviene básicamente del colapso gravitatorio que formó a la Tierra y de la desintegración radioactiva de los isótopos de uranio, torio y potasio en la corteza terrestre (Santoyo y Barragán, 2010).

En el siglo XIX el reconocimiento de la energía geotérmica inicio con el descubrimiento del elemento químico del boro en Larderello, Toscana (Italia) (Dickson & Fanelli, 2017). En este lugar se inició la utilización industrial de los recursos geotérmicos. En esa época se instaló la primera industria química, para la extracción de ácido bórico en Larderello “Italia”; el ácido bórico se obtenía mediante la evaporación del agua concentrada utilizando bateas de metal y madera como combustible, este proceso cambio con el diseño de Francisco Larderell (fundador de la industria geotérmica) en 1827, al utilizar un sistema de calor con los fluidos geotérmicos en el proceso de evaporación del ácido bórico. El vapor geotérmico se utilizó para algunas aplicaciones mecánicas como la impulsión de un elevador por presión y gas; este sistema más tarde fue remplazado por poleas junto con bombas reciprocas y centrifugas. En 1904 en la Toscana se realiza el primer experimento de energía eléctrica utilizando vapor geotérmico y en 1916 se instala la primera planta generadora llamada Larderello 1 (Lund, 2005). La planta de Larderello mantuvo el monopolio de 1850 a 1875 en la producción de ácido bórico. Los usos del vapor geotérmico se extendieron a los vapores de baja presión empleados entre 1910 y 1940; utilizándose para calefacción de invernaderos, industrias y residenciales en la Toscana.

De acuerdo con Arellano-Gómez et al (2008), la idea de aprovechar la geotermia como fuente renovable, fue traída a México a finales de la década de los cuarenta, por el Ing. Luis de Anda que trabajaba para la CFE; esto porque la comisión federal de electricidad (CFE) se enteró de los logros obtenidos en el campo geotérmico de Larderello en Italia y en consecuencia esto motivo a que la CFE envíara al Ingeniero Luis para realizar estudios en ese lugar. El ingeniero Luis se familiarizó con las técnicas de exploración y explotación que allí se utilizaban. Más tarde en el mes de mayo de 1955 se formó la Comisión de Energía Geotérmica en México, cuyo director fue el mismo ingeniero Luis de Anda.

3.2 El desarrollo de la geotermia en México

La energía geotérmica en México se desarrolló a partir de la primera planta piloto llamada el Pathé en Hidalgo en 1959 a partir de ese año se inició la industria geotérmica en el país (González-Ruiz et al., 2015). De acuerdo con González-Ruiz et al (2015), de los 24 países en el mundo que en 2015 utilizaban la energía geotérmica para generar electricidad, México ocupaba un importante cuarto lugar a nivel mundial.

A lo largo de la primera mitad del siglo XX, ya se conocían manifestaciones de aguas termales en el territorio, pero sin un uso a nivel industrial y desde el punto de vista geotérmico. Las manifestaciones geotérmicas en México se pueden agrupar de acuerdo con Iglesias et al. (2011), en dos grupos, las manifestaciones termales y los campos geotérmicos. Una manifestación termal es una descarga de agua natural del que su temperatura difiere de la temperatura ambiente del lugar, las manifestaciones termales abundan a lo largo de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), el cual es un arco volcánico continental con volcanes y fallas activas (Figura 3.1) (Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego, 1990; Gómez-Tuena et al., 2005). Un campo geotérmico se considera cuando existen las manifestaciones superficiales como fumarolas o geisers que muestren una anomalía térmica con respecto al lugar o la temperatura ambiente, los campos geotérmicos mejor desarrollados en México están a lo largo de la FVTM y en el sistema de fallas de San Andrés en Baja California. Los campos geotérmicos mejor desarrollados son el Pathé, Cerro Los Azufres y Los Humeros localizados en la FVTM además de Cerro Prieto y Tres Vírgenes localizados en Baja California (Prol-Ledesma, 2002)



Figura 3.1 Localización de los campos geotérmicos a lo largo de la FVTM (Faja Volcánica Transmexicana) (Tomado de Prol-Ledesma, 2002).

3.2.1 La Faja Volcánica Transmexicana y sus características geotérmicas:

El Pathé, Los Azufres y Los Hornos

Algunos autores como Gómez Tuena et al. (2005), definen a la FVTM como un arco magmático continental constituido por cerca de 8000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos que se extienden de las costas de San Blas (Nayarit) y Bahía de Banderas (Jalisco) hasta las costas del Golfo de México en Palma Sola en el estado de Veracruz. La FVTM es considerada un sistema tectónico convergente con una diversidad magmática controlada por una placa oceánica y otra continental (Gómez-Tuena et al., 2005). Estas placas tienen movimientos independientes cuyos parámetros geofísicos y composicionales se modifican constantemente a lo largo de la trinchera por un régimen tectónico esencialmente distensivo que opera con distinta intensidad sobre la placa continental (Gómez-Tuena et al., 2005). La placa continental suprayacente está constituida de un basamento cortical con diferentes edades, espesores y composiciones por una fuente mantélica primaria de composición variable influenciada por los agentes químicos derivados de la subducción (Gómez Tuena et al., 2005).

La Faja Volcánica Transmexicana tiene una historia magmática desde el Mioceno tardío y hasta hoy día que corresponde con el Cuaternario (Gómez-Tuena et al., 2005) con rocas que han cambiado de composición desde andesítica, riolítica a basáltica. La FVTM es dividida en tres sectores de acuerdo a sus características volcánicas, de composición, por su basamento y edad de magmatismo (Gómez-Tuena et al., 2005). En la porción central de la FVTM dominan varias estructuras volcánicas como domos, conos cineríticos, estratovolcanes y calderas volcánicas. Las grandes calderas volcánicas originaron tobas pumiciticas e ignimbritas, de las más notables calderas se encuentran las calderas de Amazcala, Amealco,

Huichapan, Los Azufres, Zitácuaro, Apaseo y Los Agustinos (Gómez-Tuena et al., 2015). En el sector central de la FVTM, el volcanismo riolítico del plioceno temprano se asocia a algunas grandes calderas: Los Azufres, Amealco y Huichapan. Estas calderas se caracterizan por la alternancia de eventos de composición máfica a intermedia y eventos composición félsica de acuerdo con Gómez-Tuena et al., (2005) y también algunas de estas calderas tienen manifestaciones geotermales.

El Pathé

El Pathé se localiza en el municipio de Tecozautla, Estado de Hidalgo (Figura 3). El Pathé es considerado actualmente un campo geotérmico y es una de las primeras plantas geotérmicas que inició operaciones en 1959 con una capacidad de 3.5 MWe, en este mismo lugar se perforaron 17 pozos sin embargo nunca fue posible obtener suficiente vapor para generar más de 600 kW, por lo que la planta se mantuvo generando por debajo de 600 kW hasta 1973 (González Ruiz et al., 2015).

La zona del Pathé se ubica en la porción oriental de un graben (Gaben de Pathé) de orientación norte-sur y unos 10 kilómetros de anchura (Hiriart Le Bert, 2011). Esta área presenta una amplia zona con manifestaciones termales superficiales, entre ellas manantiales, géiseres extintos, y zonas de alteración hidrotermal; muchas de estas relacionadas con el cruce de estructuras orientadas en direcciones norte-sur y este-oeste, principalmente con la intersección de la falla Pathé con la fractura por la que corre el Río San Juan (Hiriart-Le Bert, 2011).

La alteración hidrotermal superficial en el Pathé cubre una superficie de 5 km² y está compuesta por minerales como caolín, clorita, sericita, zeolitas y en menor proporción epidota. En algunos de los manantiales y pozos dentro del área geotérmica, Hiriart-Le Bert (2011) obtuvo algunas temperaturas y composiciones con base en mediciones directas y la aplicación de algunos geotermómetros, en donde los manantiales tienen temperaturas superficiales de 28°C a 39°C con composición del agua bicarbonatada sódica. Hiriart Le Bert, (2011) también encuentra que en el pozo 1 del Pathé el agua es de tipo clorurada sódica con temperaturas para el agua del fondo en 191°C; esta temperatura la obtuvo usando un geotermómetro químico mineral de sodio-potasio.

En otro pozo (pozo 2) usando la geotermometría de gases (hidrógeno-argón), Hiriart Le Bert (2011) determina temperaturas del agua en el fondo de 221°C. Otros datos también presentados por Hiriart Le Bert (2011) muestra que en algunos pozos y barrenos perforados por la CFE en la década de los años cincuenta, mostraban una temperatura media de 150°C medida a unos 300 metros de profundidad. El pozo 1 para esos años tenía una temperatura mayor de 200°C a 230 metros de profundidad Hiriart-Le Bert (2011).

Birkle et al., (2001) describe geologicamente al campo geotermico del Pathé como un campo dentro de una secuencia volcanica del mioceno tardio al plioceno y en el interior tambien de una region de fallas normales activas.

Carrillo-Martínez (1998), realizo un trabajo estructural en el area, donde, las fallas del area las agrupa en dos direcciones aproximadas N-S y E-W. El grupo E-W es la extensión meridional de la semi fosa tectónica de Aljibes y cuya falla maestra tiene un desplazamiento vertical de 480 m. El fallamiento N-S define la fosa tectónica de San Francisco y cuyas fallas tienen desplazamientos verticales de alrededor de 30 m y de 180 m definidos en el subsuelo (Carrillo-Martínez, 1998). A lo largo de las fallas Carrillo-Martinez (1998) identificó diques y otras intrusiones subvolcanicas que siguen direcciones similares al grupo de fallas y determina que la producción de vapor generalmente ocurre en la zona de interseccion de las fallas N-S y fallas E-W en donde también encontró algunas alteraciones hidrotermales.

Los azufres

El campo geotérmico de los Azufres se encuentra localizado al Norte de Ciudad Hidalgo del Estado de Michoacán (Figura 3.2). De acuerdo con Barragán et al. (2012), los Azufres para el año 2012 contaban con una capacidad instalada de 188 MW y se habían perforado más de 80 pozos geotérmicos con profundidades de entre 600 y 3,544 metros. En algunos de estos pozos se habían medido temperaturas máximas aproximadas de 358°C (Arellano-Gómez et al., 2008). En esta zona, el flujo de calor promedio es de 0.22 W/m², lo cual corresponde a un gradiente local de 117°C/km (Arellano-Gómez et al., 2008).



Figura 3.2 Ubicación del campo geotérmico Los Azufres, estado de Michoacán (tomado de Birkle et al., 2001).

La columna estratigráfica en Los Azufres es de acuerdo a Dobson, (1984) descrita de la siguiente forma, el basamento del campo geotérmico de Los Azufres está constituido por un paquete de más de 2,000 m de espesor de derrames andesíticos-basálticos con intercalaciones de paleosuelos y aglomerados. Sobre las rocas anteriores yacen discordantemente rocas ácidas, formadas por ignimbritas, tobas y cenizas (Riolita Agua Fría) cuyas edades van de 1.05 a 0.84 Ma. Encima de las rocas volcánicas ácidas, se formaron depósitos lacustres del Pleistoceno.

Otras rocas volcánicas importantes en el área de Los Azufres y de acuerdo a Dobson (1984): son la Dacita San Andrés, cuya edad es de 0.3 Ma y depósitos ignimbríticos de 0.28 Ma. La última etapa volcánica en la región fue de composición básica evidenciada en afloramientos de derrames lávicos al este y oeste del campo y rocas cineríticas en los alrededores (González-Partida, 2000). Algunas rocas en el campo presentan una geoquímica de roca total calcialcalina en las diferentes unidades litoestratigráficas (Cathelineau et al., 1987).

Los Humeros

El campo geotérmico de Los Humeros se encuentra localizado en el extremo oriental del Cinturón Volcánico Mexicano, aproximadamente a 200 km al este de la Ciudad de México, entre los estados de Puebla y Veracruz (Figura 3.3). El campo geotérmico se encuentra relacionado a una caldera volcánica de una edad cercana a los 500 000 años (Yáñez G., 1980; Ferriz, 1982; Ferriz & Mahood, 1984; Martínez-S., 1993; Martínez-Serrano & Alibert, 1994).



Figura 3.3. Esquema geológico estructural de los Humeros Puebla.: 1-Aluvi3n, 2-Basalto de olivino, 3-Riodacita, 4-Lava Mastaloya, 5-Andesita, 6-Lava Post-Zaragoza, 7-Ignimbrita Zaragoza, 8-Toba Faby, 9-Riolita post-Xaltipan, 10-Ignimbrita Xaltipan, 11-Riolita pre-

Xaltipan, 12-Lava Teziutlán, 13-Mesozoico, 14-Pozo, 15-Falla, 16-Curva de nivel y 17-Cráter, tomado de González Partida et al., (1993).

En 1968, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), efectuó los primeros estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos en este campo (Carrasco-Núñez, et al., 2017). En 1982 se perforó el primer pozo profundo en este campo, con el objeto de confirmar los resultados de los estudios geológicos de superficie y fue hasta 1990 que se inició la explotación comercial del yacimiento, con la instalación de la primera unidad de 5 MWe (Arellano-Gómez, et al., 2008).

Hasta el año de 2007 se habían perforado más de 40 pozos, contando con capacidad instalada de 35 MWe, en 7 unidades de 5MWe cada una (Figura 3.3) (Gutierrez-Negrin y Quijano-León, 2005; Gutierrez-Negrin, 2007; Arellano-Gómez et al., 2008).

La geología regional del campo geotérmico de los humeros se conforma por las rocas antiguas que son granito y esquistos del macizo de Teziutlán de edad del paleozoico, sobreyaciendo a estas se encuentran rocas de edad del jurásico medio conformada por depósitos de lutita negra carbonosa con intercalaciones de caliza arcillosa perteneciente a la Formación Santiago (Yáñez-Dávila, 2016). Estas rocas paleozoicas y mesozoicas son sobreyacidas discordantemente por rocas volcánicas del Cenozoico; estas rocas cenozoicas se componen de andesitas, dacitas, riolitas e ignimbritas que van en un rango de edades de cerca de 11 Ma a menos de 20 000 años (Yáñez y García, 1980 en Yáñez-Dávila, 2016).

3.2.2 Algunos campos geotérmicos de otras partes de México Cerro Prieto, Tres Vírgenes

Cerro prieto

El Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) es el segundo más grande a nivel mundial debido a la capacidad instalada en plantas geotérmicas y a su capacidad de generación de energía eléctrica de ca. 720 MW, no obstante, a nivel internacional, es rebasado por el complejo geotérmico *The Geysers* en Estados Unidos con una capacidad de 1584 MW (Bertani , 2015). El CGCP tiene el primer lugar en generación de electricidad a nivel nacional y es considerado como un yacimiento geotérmico de tipo líquido dominante alojado en un ambiente sedimentario (Aguilar-Dumas, 2009).

El CGCP empezó operaciones comerciales en 1973 y a partir de esa fecha se ha extraído vapor geotérmico que se distribuye a las diferentes centrales generadoras (Aguilar-Dumas, 2009). De acuerdo con Aguilar-Dumas (2009) se extraen aproximadamente 5800 toneladas por hora (t/h) de vapor para cumplir las demandas de producción. En el CGCP para el 2009 existían un total de 353 pozos perforados, de los cuales 172 se estaban contemplados para los procesos productivos (Aguilar-Dumas 2009).

El CGCP desde el punto de vista geológico está ubicado en una cuenca trans-tensional de tipo pull-apart, formada por los sistemas de fallas Cerro Prieto e Imperial (Figura 3.4) que son parte del sistema de fallas San Andrés (Macías-Vázquez y Rocha-López, 2013).

De acuerdo a Aguilar Dumas (2009), la geología del CGCP está definida por diferentes unidades litológicas del Mesozoico y Cenozoico. Las unidades del Mesozoico (Cretácico) se componen de rocas intrusivas de composición que varía de granítica a tonalítica que forman parte de las sierras Cucapa y El Mayor. Las rocas Cenozoicas comprenden rocas sedimentarias constituidas secuencias de lutita con intercalaciones de areniscas con edades que van de 13.5 a 1.8 Ma; en estas secuencias se aloja el yacimiento geotérmico. Otra unidad del Cenozoico es una unidad del pleistoceno constituidas de arenas, arcillas y gravas que son interpretados como depósitos aluviales con edades que van de 1.8 Ma. a 100,000 años (Aguilar-Dumas, 2009).

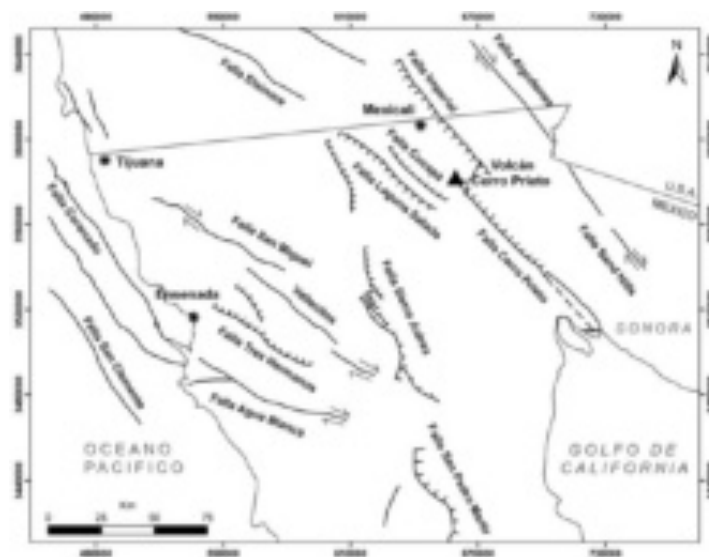


Figura 3.4 Estructuras cercanas al CGCP tomado de Macías-Vázquez. y Rocha-López, (2013)

Por último se encuentra las rocas volcánicas del cuaternario que comprende en parte al volcán Cerro Prieto de composición andesítica a riodacítica.

La geología estructural del CGCP de acuerdo a Macías-Vázquez y Rocha-López, (2013), se conforma por diferentes sistemas de fallas dentro del sistema de fallas de San Andres y estructuras como son las fallas Imperial, Cerro Prieto, Laguna Salada y Cucapa.

Campo Geotérmico Tres Virgenes

El Campo Geotérmico Tres Vírgenes (CGTV) está dentro del Campo Volcánico Tres Vírgenes (CVTV) que se localiza en la zona central de la Península de Baja California (Figura 3.5). Los estudios de exploración se iniciaron en 1982 y en 1986 se perforó el primer pozo exploratorio (Luque-Vergara, 2008).

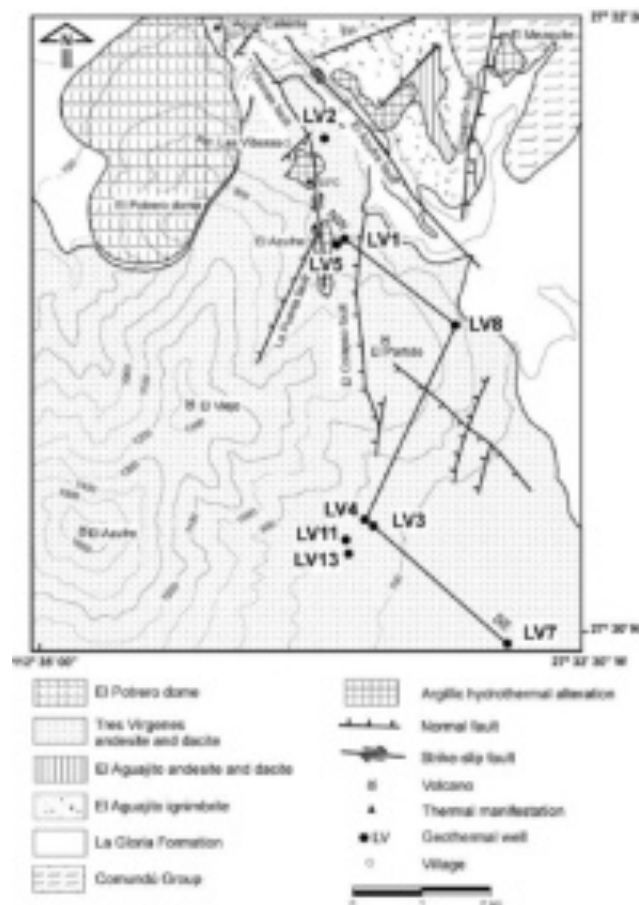


Figura 3.5 Tomado de y modificado por Verma et al., (2006), mapa simplificado del campo geotérmico Las Tres Vírgenes;(modificado después de López-Hernández, 1998 y Capra et al., 1998), presentación y ubicación de los pozos geotérmicos y fallas mayores.

De acuerdo a Luque-Vergara, (2008) reporta la instalación de dos plantas de 5 MWe del tipo de condensación mismas que iniciaron sus operaciones en julio de 2001, estas plantas generaron 32.8 GWh en 2003, cuya energía se distribuyó a ciudades como Santa Rosalía y otras poblaciones que están aisladas del sistema eléctrico nacional (Gutiérrez-Negrín y Quijano León, 2005; Gutiérrez-Negrín, 2007).

El CVTV se encuentra sobre un régimen tectónico transtensional del sistema de fallas San Andrés. El CGTV está sobre un basamento formado por rocas que van del Cretácico al Plioceno (Verma et al, 2006).

El basamento es sobreyacido por tres grandes complejos volcánicos con una evolución heterogénea, La Caldera de Reforma, Caldera del Aguajito y el Complejo Volcánico de Tres Vírgenes, en este último se definen dos subgrupos, Domos el Viejo y el Azufre (Figura 7); en estos dos domos es donde se ha desarrollado el campo geotérmico (Verma et al, 2006).

3.3 Estructura de un sistema geotérmico

Un sistema geotérmico natural consiste de varias partes como son un foco de calor, fluidos de trabajo (acuífero termal y acuífero de recarga) y una capa de roca sello que facilite la presurización del sistema (Santoyo-Gutiérrez et al., 1993) (Figura 3.6). La energía calorífica es producida por rocas ígneas con actividad volcánica reciente. El agua subterránea debe existir y es calentada en la profundidad, al calentarse disminuye su densidad y viscosidad provocándose fuerzas de empuje, se establece una convección natural con agua fría que baja y agua caliente que sube. Para que el agua ascienda debe haber rocas que tengan la capacidad de dejar fluir al agua y entonces debe haber alta permeabilidad y también rocas de baja permeabilidad para que se presurice el sistema natural. La permeabilidad en las rocas puede ser de tipo granular o también por medio la existencia de fracturas.

(Nicholson, 1993) establece un modelo conceptual de sistemas geotermales dominados por una fase líquida de alta temperatura y cuya fuente de calor de origen magmática, relacionada a un volcanismo reciente. De acuerdo a Nicholson (1993), la fuente calor se ubica generalmente a una profundidad de unos 8 km o más. La estructura hidrológica consiste en un ciclo en que las aguas meteóricas penetran en la superficie, a través de estructuras y zonas permeables, alcanzando profundidades de 5 a 7 km. A medida que descienden, éstas son calentadas y reaccionan con la roca circundante, y se produce una incorporación de solutos

al fluido geotermal. El calentamiento de estas aguas provoca que bajen su densidad por convección se produce un ascenso de estos fluidos que inicialmente son de tipo clorurados. Luego estos fluidos en ascenso son retenidos en un horizonte permeable formando un reservorio geotermal donde se alcanza el equilibrio fluido-roca. A medida que estas aguas cloruradas ascienden a la superficie se produce la ebullición, generándose una zona de dos fases (fase líquida y gaseosa). Estas aguas cloruradas residuales pueden ser descargadas en superficie como manantiales calientes en la zona de “upflow” o viajar en un flujo lateral y ser descargadas a kilómetros de distancia (“outflow”). Los gases generados en la zona de ebullición emergen a la superficie y son descargados en superficie como fumarolas.

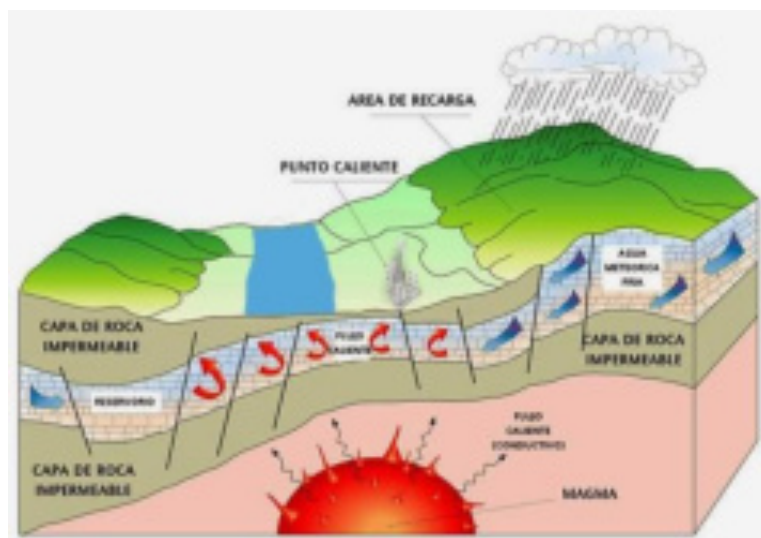


Figura 3.6 Partes de un sistema geotérmico natural.

3.4 Algunas clasificaciones de yacimientos geotérmicos

Los sistemas geotérmicos se pueden clasificar con base en criterios geológicos en relación a la transferencia de calor, con base en criterios geoquímicos o la temperatura del fluido (Santoyo-Gutiérrez et al., 1993). La clasificación de la temperatura es de dos tipos: con base en la temperatura del fluido endógeno (que se encuentra a profundidad), con base al fluido que se extrae, o del fluido que se inyecta para la extracción de calor de la roca (Santoyo-Gutiérrez y Barragán-Reyes, 2010). En esta clasificación quedan comprendidos los siguientes tipos: sistemas hidrotermales, sistemas geotérmicos mejorados, sistemas geopresurizados, sistemas marinos y sistemas magmáticos. Estos sistemas se describen a continuación:

3.4.1 Sistemas hidrotermales.

Los sistemas hidrotermales son los constituidos por una fuente de calor, fluidos, roca permeable y una roca sello (Santoyo-Gutiérrez y Barragán-Reyes, 2010). Las manifestaciones en superficie de estos sistemas son la presencia de manantiales calientes, fumarolas, geiseres, lodo caliente y suelo caliente.

Los sistemas hidrotermales son los más comunes y se pueden clasificar en tres tipos; vapor dominante, liquido dominante de alta entalpia y liquido dominante de baja entalpia.

Vapor dominante: estos sistemas producen vapor seco sobresaturado y ligeramente calentado a presiones superiores a la presión atmosférica, el agua y vapor coexisten, pero la fase de vapor domina el sistema.

Líquido dominante (alta entalpía): son sistemas de salmuera súper calientes, con temperaturas mayores a 180°C y estos en la naturaleza son más abundantes que los anteriores.

Líquido dominante (baja entalpía): son sistemas de salmuera calientes, con temperaturas menores a 180°C, son más abundantes en una proporción de 10 a 1. Estos sistemas se encuentran en casi todo el mundo.

Cuando en los sistemas geotérmicos se encuentran temperaturas superiores a los 200 °C, normalmente justifican la perforación de pozos geotérmicos que son apropiados para la generación de geotermoeléctricas (Santoyo-Gutiérrez y Torres-Alvarado, 2010) (Tabla 2).

		Rango de Temperaturas en Terreno	Utilización
Baja Baja Entalpía	Subsuelo (con y sin agua)	10°C < T < 20°C	Calefacción, ACS, Climatización
	Aguas Subterráneas	20°C < T < 22°C	
Baja Entalpía	Aguas Termales	22°C < T < 30°C	Balnearios, Acuicultura
	Zonas Volcánicas	T < 200°C	District Heating
	Abrascos Sedimentarios Profundos		
Medial Entalpía		100°C < T < 150°C	Generación Eléctrica: Ciclos Binarios
Alta Entalpía		T > 150°C	Generación Eléctrica

Tabla 2. Temperaturas del fluido geotérmico en relación con sus múltiples aplicaciones.

3.4.2 Sistemas geotérmicos mejorados (EGS) o de roca seca caliente.

Los sistemas geotérmicos mejorados o por sus siglas en inglés (*Enhanced Geothermal System*), consisten en roca seca a muy alta temperatura ca. 650°C localizada entre 2 y 4 kilómetros de profundidad y con la característica particular de no contar con fluidos suficientes en el fondo para transportar el calor hacia la superficie (Santoyo-Gutiérrez y Barragán-Reyes, 2010). Para su aprovechamiento se requiere que la roca tenga fracturas se requiere que la roca tenga fracturas. Estos sistemas se caracterizan por la presencia de basamentos rocosos muy calientes con permeabilidades bajas y requieren procesos de fracturamiento hidráulico para conectar los pozos de inyección de agua con los pozos de producción (Beasley et al., 2010) (Figura 3.7).

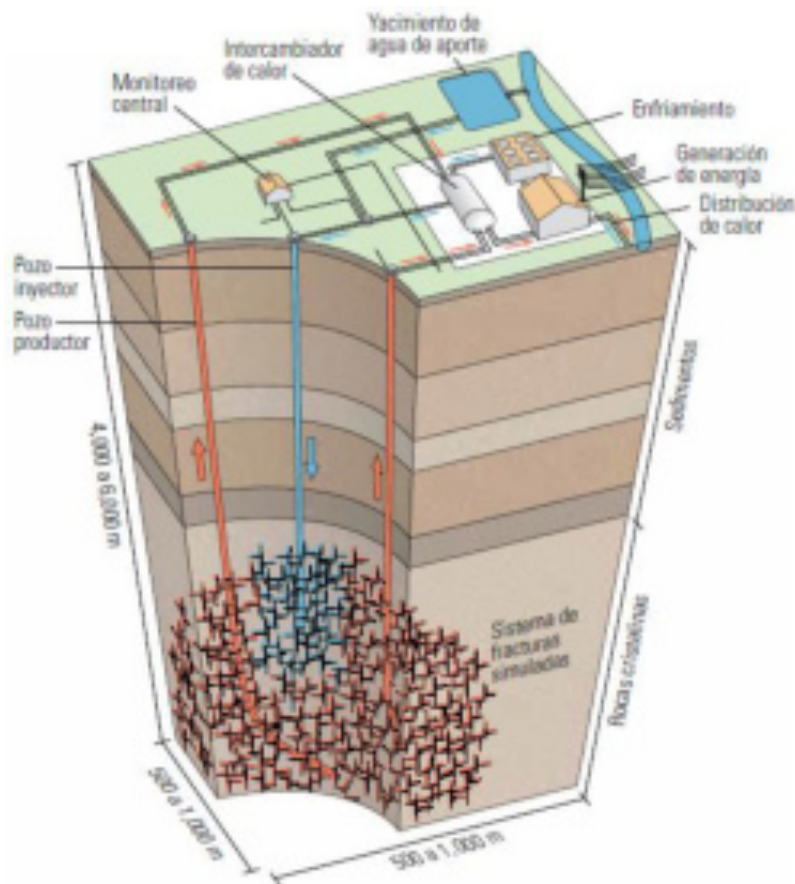


Figura 3.7 Sistema de roca seca caliente, las fracturas son generadas en un pozo de inyección (azul) perforado en un yacimiento de baja permeabilidad de roca cristalina profunda. Los pozos de producción (rojo) se perforan luego en la zona fracturada. El agua inyectada se calienta a media que fluye desde el pozo de inyección hacia los pozos de producción, tomado de Beasley et al, (2010).

3.4.3 Sistemas geopresurizados

Estos sistemas geopresurizados contienen agua y metano disuelto a alta presión (unos 700 bares) y mediana temperatura (entre 90°C y 200°C). Actualmente estos recursos no se explotan en el país y se desconoce su existencia en México (Santoyo-Gutiérrez y Barragán-Reyes, 2010).

3.4.4 Sistemas marinos

Se localizan en el fondo del mar, se manifiestan como descargas, fumarolas o chimeneas hidrotermales. Se han identificado en el golfo de California, en México, con temperaturas hasta de 350°C, por el momento no se explotan comercialmente (Santoyo-Gutiérrez y Barragán-Reyes, 2010). Un sistema hidrotermal submarino se alimenta del calor de una cámara magmática subyacente, el agua circula por el sistema calentándose y después ascendiendo a lo largo de vetas y fracturas formando respiraderos hidrotermales (Pirajno, 2009) (Figura 3.8).

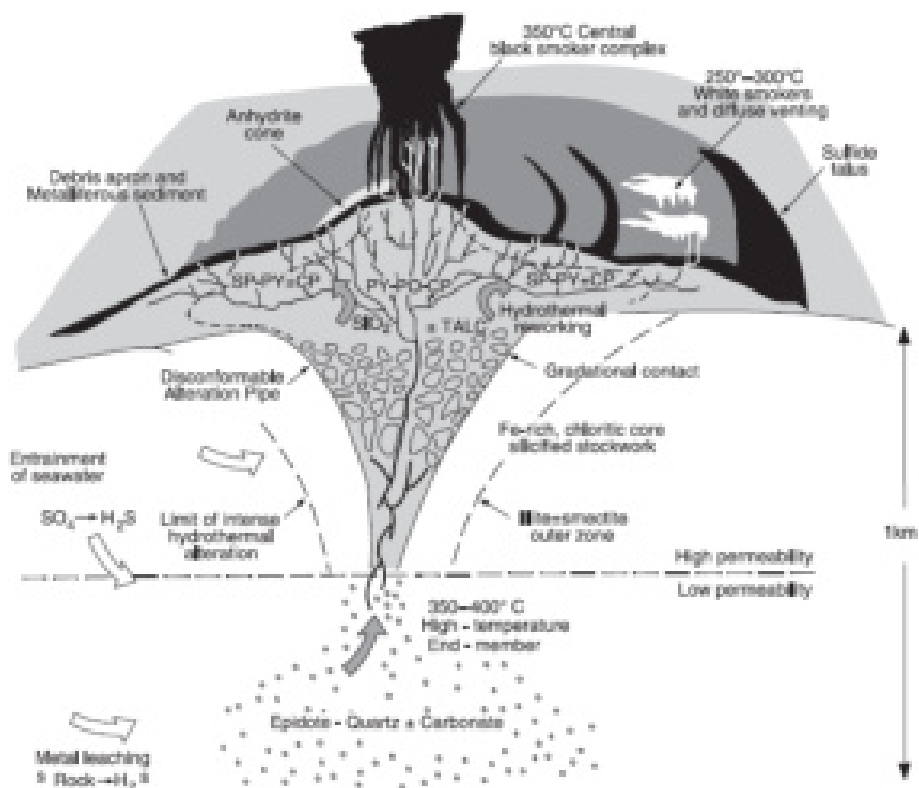


Figura 3.8 Esquema de un sistema hidrotermal submarino, tomado de Pirajno, (2009).

3.4.5 Sistemas magmáticos

Consisten de roca fundida (a unos 800°C) y están asociados con aparatos volcánicos activos. Para extraer el calor de estos sistemas se han desarrollado algunos proyectos piloto en Hawái e Islandia, pero su explotación comercial requiere la búsqueda de materiales adecuados que resistan la corrosión y las altas temperaturas (Santoyo-Gutiérrez y Barragán-Reyes, 2010). La fuente de calor de un sistema magmático se origina por la existencia de una cámara magmática y en la zona superficial circundante se manifiestan vapores hidrotermales (Figura 3.9). Por debajo de los vapores ocurre condensación del agua y los límites de cada isoterma marcan las temperaturas aproximadas junto con el tipo de alteración ya sea argílica, filica, propilitica y potásica (Glassley, 2014).

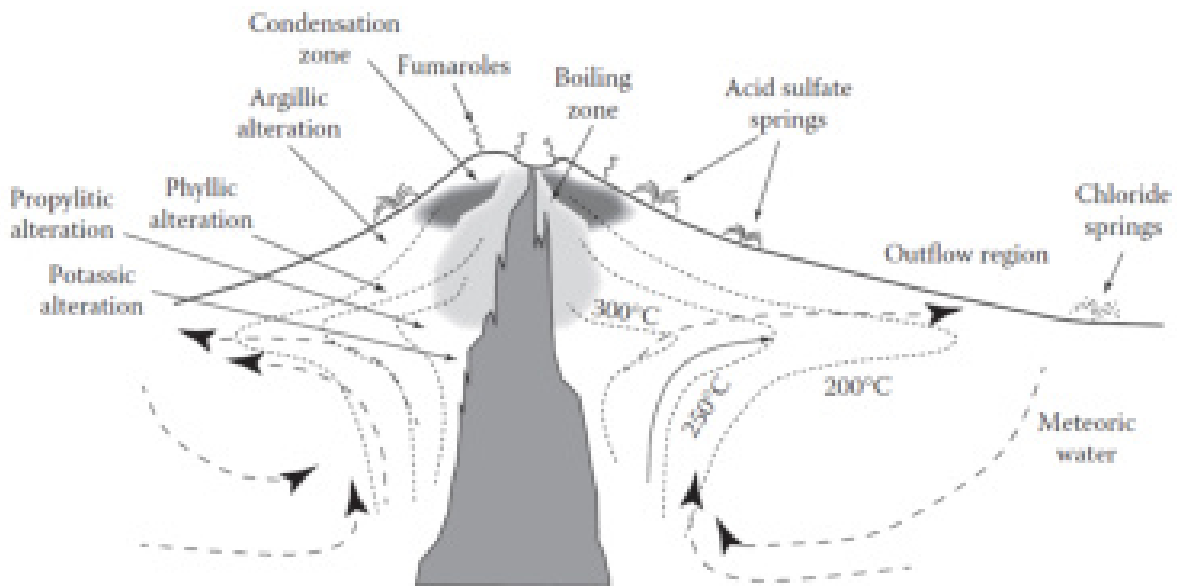


Figura 3.9 Esquema de un sistema magmático, tomado de Glassley, (2014).

3.5 Geología y manifestaciones geotérmicas en el Estado de México

3.5.1 Geología

El estado de México contiene en una gran parte de su territorio rocas volcánicas que pertenecen a la provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). La FVTM tiene una longitud cerca de 1000 km y un ancho variable entre 80 km y 230 km, se distribuye con una dirección preferencial Este-Oeste para su parte central y oriental además de la parte occidental con una dirección Norponiente-Suroriente (ONO-ESE) (Figura 3.10).

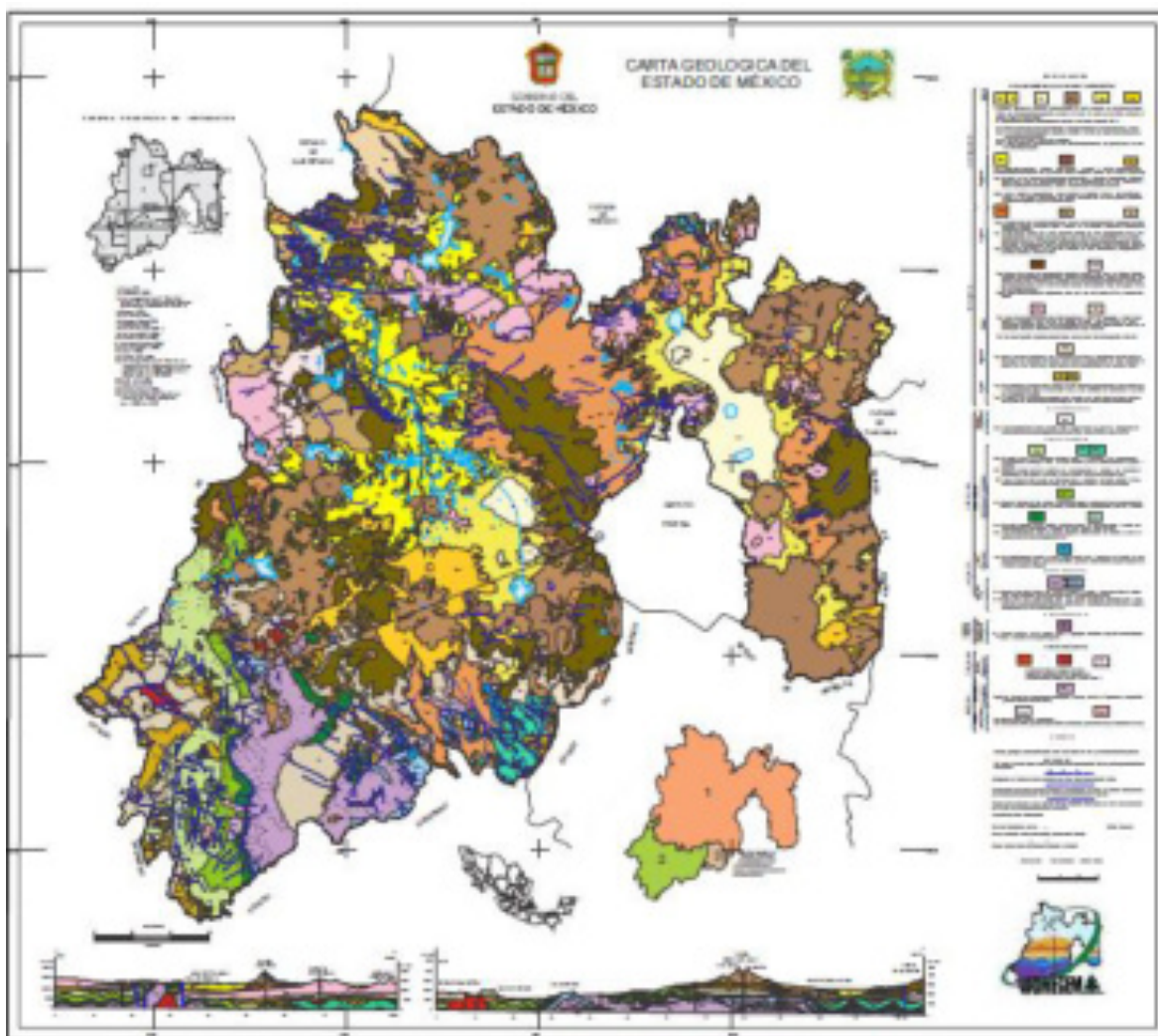


Figura 3.10 Geología del Estado de México tomado de INFOMESEM, (2009).

La geología del Estado de México está constituida de rocas con edades que van desde el Cretácico al Cenozoico y sus rocas son de tipo metamórficas y volcánicas en la parte sur del estado. El resto del estado abundan rocas ígneas de tipo volcánicas como hasta andesitas, basaltos y dacitas que van en edades del Mioceno al Cuaternario (Mapa geológico compilado de INFOME GEM, 2009). En muchas partes del estado también se presentan volcanes cineríticos del Cuaternario (INFOME GEM, 2009). La FVTM regionalmente cubre a rocas de los terrenos tectonoestratigráficos Guerrero, Mixteco y Sierra Madre Oriental, que se encuentran expuestos en algunas regiones como como ventanas estructurales, en afloramientos reducidos. En el estado de México la FVTM cubre a rocas del terreno Guerrero en la parte sur del estado y en algunas partes son cubiertas por conglomerado y areniscas de la formación Balsas del Eoceno y la Riolita Tilzapotla (Rivera-Ruiz, 2001).

El estado de México, en la propuesta de Torres-Rodríguez (2000), es parte de la provincia geotérmica número cuatro que es la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). Las características geológicas y edades jóvenes en rocas volcánicas sugieren que en el territorio del estado de México puede haber zonas potenciales a algunas manifestaciones termales.

En el Estado de México se encuentran varios centros volcánicos del Plio-Cuaternario que son parte de la FVTM y se distribuyen en todo el estado. Algunos de estos centros volcánicos por ejemplo son: la Sierra de Las Cruces, campo de volcanes Atacomulco, campo volcánico de la Sierra de Chichinautzin, campo volcánico de Nevado de Toluca-San Antonio y la Sierra Nevada. Estos centros volcánicos contienen varios tipos de volcanes como domos, volcanes tipo escudo y conos cineríticos. En algunos de estos centros volcánicos también se tienen grandes estratovolcanes como: Popocatépetl, Iztaccíhuatl, Nevado de Toluca, San Antonio, Jocotitlán entre otros.

Volcanes de edad Cuaternaria sobreyacen a volcanes del Plioceno en varios de estos centros volcánicos evidenciando un magmatismo joven (Márquez et al., 1999, García-Palomo et al., 2008) que está presente en varias partes del estado de México y esto es una componente importante en un sistema geotérmico como es la fuente de calor y abundancia de volcanes jóvenes desde el punto de vista geológico.

La mayoría de los varios tipos volcanes del estado están inactivos, pero algunos como los estratovolcanes han tenido actividad volcánica en tiempos históricos considerándose dormidos (García-Palomo et al., 2000) y otros como el volcán Popocatepetl está activo.

3.5.2 Manifestaciones geotérmicas en el Estado de México

La ocurrencia y distribución de las manifestaciones geotérmicas en el Estado de México son escasas, de acuerdo a las publicaciones existentes y en parte puede deberse a la dificultad en su identificación de estas en el territorio estatal. No así ocurre por ejemplo en los estados de Michoacán, Jalisco y Puebla debido a la amplia actividad geológica.

González-Ruiz et al. (2015) en su trabajo menciona algunas manifestaciones termales registradas en su cartografía y que consideró como guías de prospección. Estas manifestaciones que consideró son 6 ubicados en los municipios de Ixtlahuaca, Ixtapan del Oro, Ixtapan de la Sal, Sultepec y Tonatico (Figura 3.11). Estas manifestaciones Gonzalez-Ruiz et al. (2015) menciona que se caracterizan por presentarse como brotes de agua caliente y en que algunos de estos han desaparecido debido a la construcción de pozos de agua muy cercanos a la fuente.

En el trabajo de Gómez de Jesús (2015) se trato con las manifestaciones hidrotermales ubicadas en Temascalcingo (San José Ixtapa), Ixtlahuaca, Donato Guerra, Ixtapan del Oro, Tenango del Valle, Atizapán e Ixtapan de la Sal. De estas manifestaciones Gómez de Jesús (2015) recopiló información y después se realizó un estudio geográfico de tipo multicriterio en el cual se integró la información de geología, edafología, aguas subterráneas, áreas naturales protegidas y su uso para ese tiempo actual; esto con el fin de categorizar estas manifestaciones y buscar relaciones entre ellas al asignarle parametros bajo ciertos criterios y que el trabajo fuera referente en la conservación y aprovechamiento sustentable. Las manifestaciones de Ixtlahuaca que trato Gómez de Jesús (2015) no coinciden con las manifestaciones geotermiales tratadas en este trabajo y son otras. En este trabajo de tesis tampoco se trataron las manifestaciones hidrotermales de Donato Guerra, Ixtapan del Oro, Tenango del Valle y Atizapán de Zaragoza, ya que en parte por el tiempo calendarizado de trabajo, el objetivo diferente (más hacia una caracterización geológica y geológico-ambiental) y el interés del trabajo hacia otras zonas de manifestaciones geotermiales.

Martínez-Florentino (2015) en su trabajo presenta una caracterización hidrogeoquímica de los manantiales termales de Ixtapan de la Sal y Tonicato, y su correspondiente interpretación de procesos hidrogeoquímicos. Ella determina que las aguas son de tres tipos: a) aguas que tienen temperaturas entre 30°C a 40°C, cloruradas sódicas y con presencia de As, Li y B; b) Aguas de pozos con temperaturas entre 22°C y 24°C de tipo bicarbonatadas cálcicas y c) aguas no termales con temperatura similar a la temperatura ambiente, con altos contenidos de iones como Ca, K, Mg y Na, de tipo bicarbonatada clorura sódica cálcica. En las aguas termales Martínez-Florentino (2015) interpreta que existe una componente magmática y que su firma geoquímica atraviesa rocas carbonatadas y que es probable un canal por fallas geológicas; adicionalmente estas aguas termales mencionan están mezcladas con aguas superficiales, además de la existe afectación antropogénica.

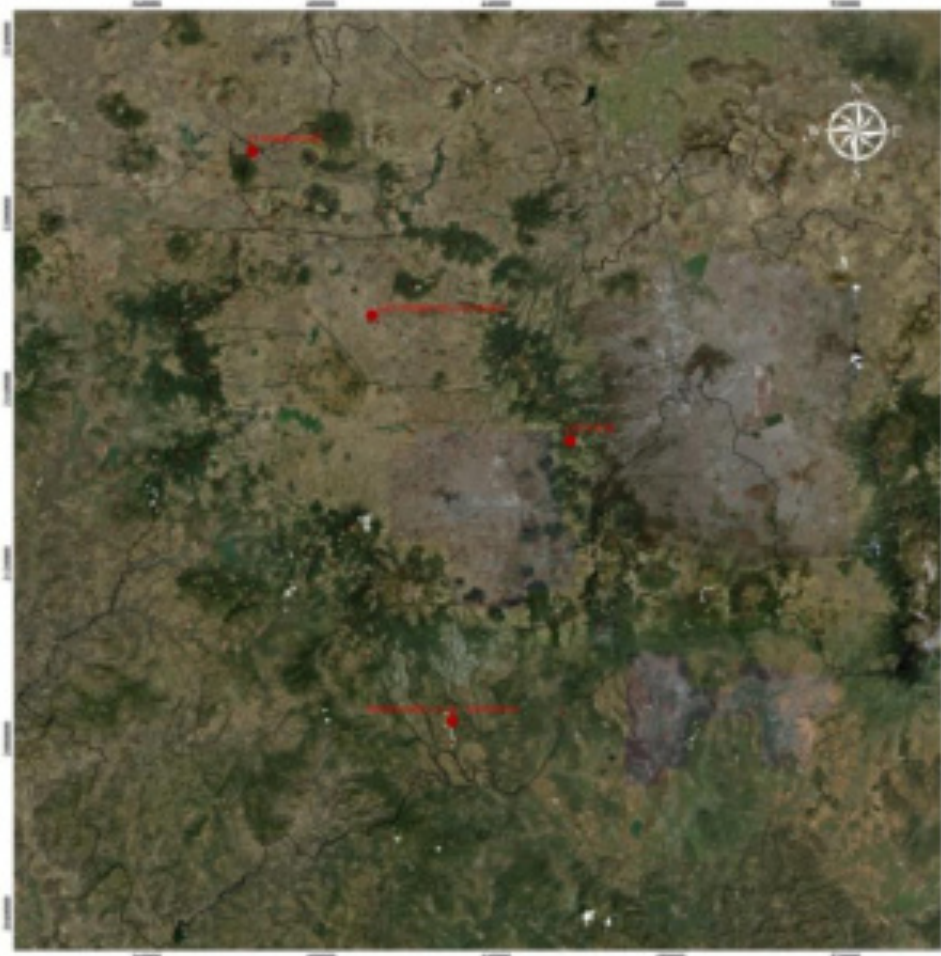


Figura 3.11 Mapa de ubicación de los puntos geotérmicos del Estado de México

Capítulo 4.

Características geológico-ambientales de algunas manifestaciones geotérmicas en el Estado de México

Gran parte del territorio del estado de México se encuentra sobre la FVTM y este arco volcánico contiene varios campos volcánicos como son: campo volcánico de Michoacán-Guanajuato, Sierra de Las Cruces, campo volcánico Chichinautzin y el campo volcánico de la sierra Nevada. En varios de los volcanes en el estado de México existen o existieron fuentes geotérmicas o manantiales hidrotermales, tal es el caso del volcán Altamirano que debido al contexto geológico del graben de Acambay que tiene fallas activas que son algunas de ellas zonas permeables para aguas termales. Las manifestaciones geotermales tratadas en este trabajo son: El borbollón (Temascalcingo), San Pedro de Los Baños (Valle de Ixtlahuaca), Las Rajas (Sierra de Las Cruces) e Ixtapan de La Sal-Tonatico (Sur del estado de México). Estas manifestaciones geotermales se muestran su ubicación en el contexto de la geología del estado de México en la figura 4.1. Los resultados de este trabajo muestran que en gran parte las manifestaciones tienen una relación con estructuras volcánicas o sistemas de fallas y fracturas.

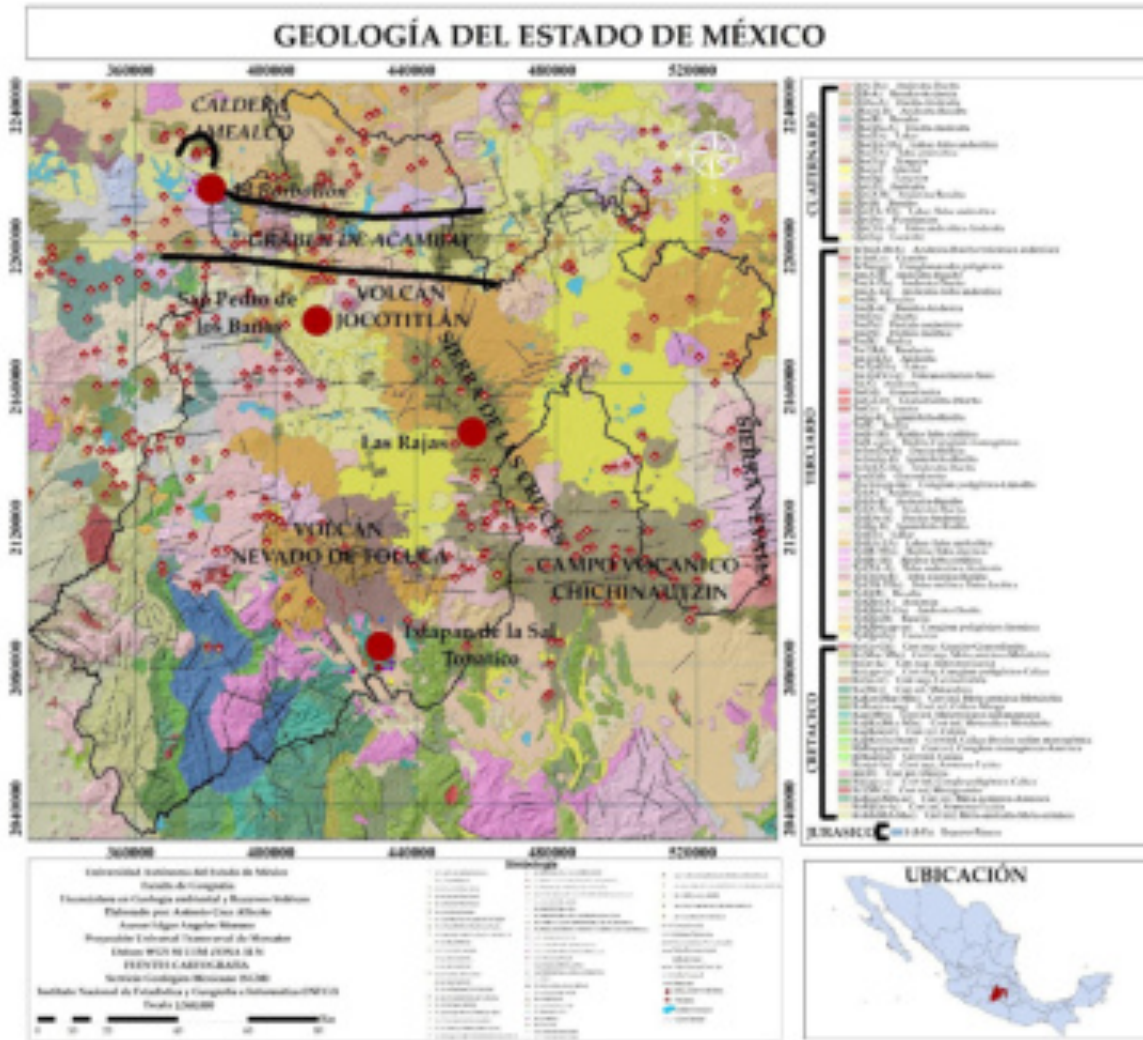


Figura 4.1 Mapa geológico del estado de México con ubicación de las manifestaciones trabajadas. (Mapa compilado a partir de datos del Servicio Geológico Mexicano e Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática)

4.1 San Pedro de los Baños

4.1.1 Geología

San Pedro de Los Baños se ubica dentro del valle de Ixtlahuaca a 14 km al noroeste de la población de Ixtlahuaca y a una distancia 3.8 km al surponiente de la población de Mavoro que se ubica a lo largo de la carretera Ixtlahuaca-Atacomulco (Figuras 4.1 y 4.2). San Pedro de Los Baños está al lado de la población Concepción de Los Baños y ambas poblaciones desde el punto de vista geológico, encuentran entre el volcán Jocotitlán y el escarpe de la falla Perales, específicamente se localizan a 12 km del poniente del volcán Jocotitlán y a 22 km al este de la falla perales (Figura 4.2). De acuerdo a trabajos geológicos realizados en la región por Salinas-Sánchez (2013), De Jesús García (2018) y Colín Rubio (2018), la geología del valle de Ixtlahuaca está conformada por rocas metamórficas de bajo grado de edad Cretácica que solo afloran al pie de la falla Perales, estas rocas mesozoicas son sobreyacidas por rocas volcánicas del Oligoceno (que no afloran) y sobre estas se encuentran rocas volcánicas del Mioceno y por último encima de estas rocas volcánicas se tienen rocas volcánicas de edad Plio-Cuaternaria. En algunas partes del valle Ixtlahuaca se han descrito sedimentos con diatomeas y que se han considerado como depósitos comerciales de diatomita (SGM, 2000). En el área de los poblados de San Pedro y Concepción de Los Baños De Jesús García (2018) realizó observaciones de campo geológicas describiendo y definiendo a la unidad Concepción-San Pedro de Los Baños como una unidad compuesta de sedimentos fluvio lacustres y depósitos volcánicos y paleosuelos que fue afectada por fluidos hidrotermales.

En este trabajo se realizó un mapa geológico de mayor detalle para las unidades en los alrededores de la manifestación hidrotermal (Figura 4.2 mapa geológico) y se elaboraron dos columnas estratigráficas esquemáticas.



Figura 4.2 Mapa geológico de San Pedro de los Baños (Elaboración propia con datos levantados en campo y la integración de algunos datos del Servicio Geológico Mexicano e Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática).

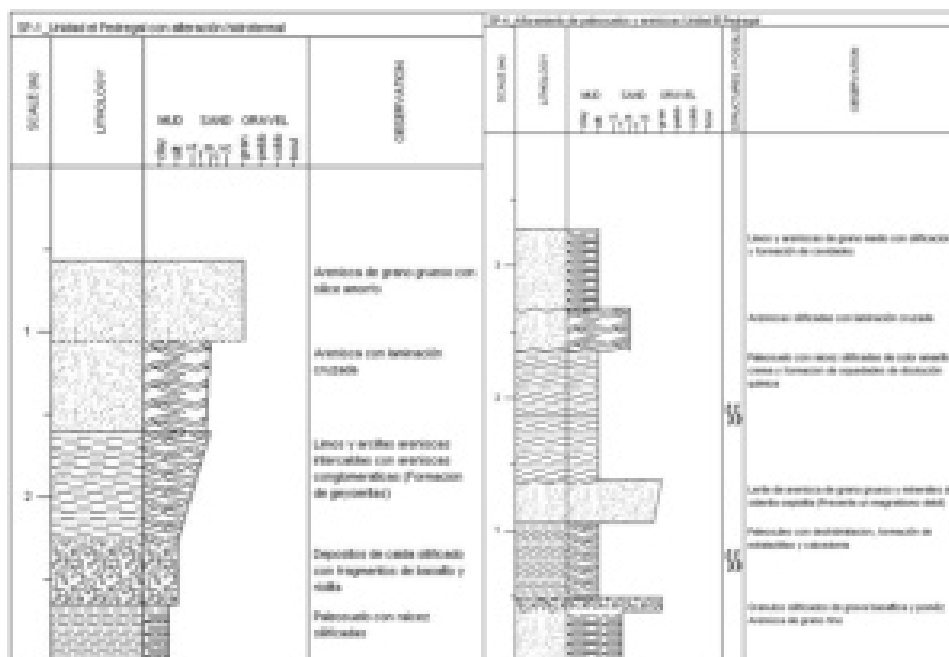


Figura 4.3 Columnas estratigráficas esquemáticas en puntos de la zona SP-1 y SP-4, para la unidad El Pedregal.

➤ Unidad Concepción-San Pedro de Los Baños

La unidad Concepción-San Pedro de Los Baños definida por De Jesús-García (2018), se ha dividido en dos unidades con base en los resultados de este trabajo, la unidad El Pedregal y La unidad San Pedro. La unidad El Pedregal comprende a litologías y sedimentos afectados por hidrotermalismo con desarrollo de depósitos de geiseritas (facies Los Baños) mientras que la unidad San Pedro no está afectada por hidrotermalismo.

Unidad El Pedregal (Qup)

La unidad el pedregal aflora en la parte Noreste de la Laguna Los Baños y también presente a la base de la iglesia La Concepción (Figura 4.2). La unidad abarca un área aproximada de 1.5 km². Los trabajos como antecedentes realizados en esta unidad son los De Jesús García (2018) que describió una secuencia de paleosuelos, sedimentos fluvio-lacustres y depósitos volcánicos afectados por hidrotermalismo, en el que este hidrotermalismo desarrolló depósitos y precipitaciones hidrotermales como las geiseritas; algunas de estas capas, antes de la alteración hidrotermal, las interpreta como una secuencia fluvio-lacustre que fue silificada. Los depósitos y litologías de esta unidad se extienden desde la iglesia La Concepción hasta las cercanías del centro del pueblo de San Pedro de los Baños.

En este trabajo se describe a la unidad compuesta de capas de areniscas, areniscas conglomeráticas, capas de limos, capas de arcillas, paleosuelos y depósitos piroclásticos (Figuras 4.3 y 4.4).

Las areniscas y areniscas conglomeráticas presentan un color gris claro a gris oscuro en los afloramientos. Están compuestas por partículas de cuarzo, fragmentos de rocas volcánicas, cristales de magnetita y otros cristales de feldespatos. Los fragmentos volcánicos en las areniscas están compuestos de rocas de riolita, andesita y dacita; existen fragmentos de color muy blanco que son riolitas afectadas por hidrotermalismo. Las areniscas presentan laminación cruzada y laminación paralela.

Las capas de limos y arcillas presentan un color al intemperismo gris claro a beige, una granulometría fina, bien clasificado y en estratos. Estas capas aparecen intercaladas con las areniscas y areniscas conglomeráticas, además ambas están afectadas por silificación.

Los paleosuelos se presentan en un tono amarillo crema al intemperismo. Estos paleosuelos se presentan también silicificados, pero se pudieron reconocer en ellos antiguas raíces de plantas. Se observaron también algunas oquedades de disolución química. Las capas de paleosuelos tienen espesores que varían de 20 cm a 40 cm.

Las rocas piroclásticas que se pueden distinguir a pesar de la alteración hidrotermal son depósitos de caída volcánicos que fueron transformados a suelos, sin embargo, la alteración hidrotermal no permite diferenciar otros tipos de capas derivadas de depósitos piroclásticos.

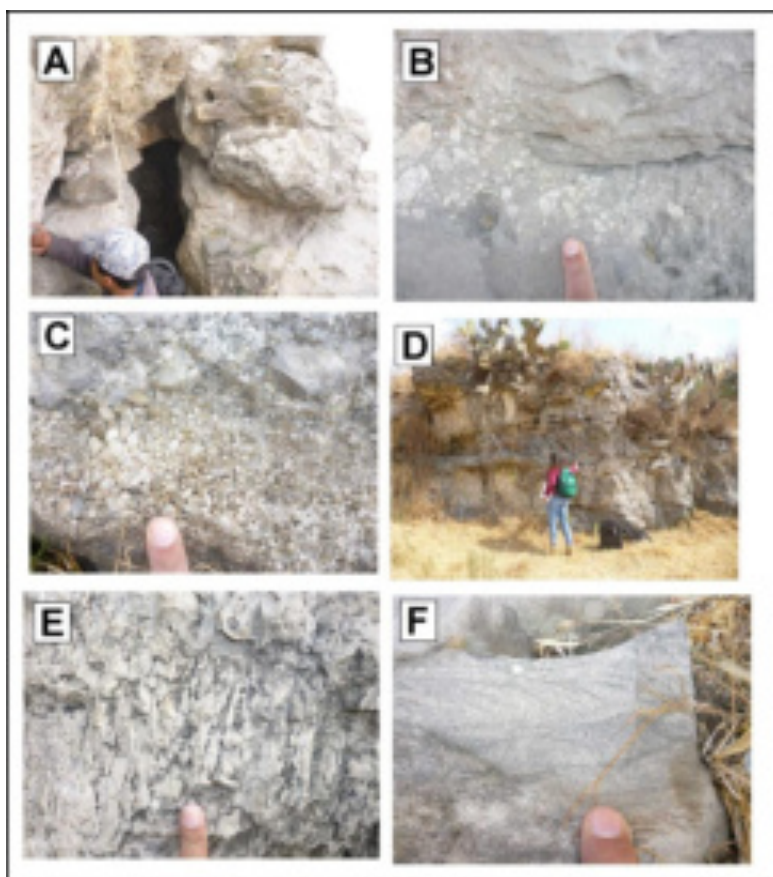


Figura 4.4 Diferentes características geológicas de la unidad El Pedregal. (A), Afloramiento debajo de la Iglesia La Concepción, areniscas silicificadas y cavidad donde salía agua termal. (B), areniscas conglomeráticas con partículas de cuarzo, líticos de roca volcánica y fragmentos de riolita. (C), arenas y gravas con líticos de andesita, dacita y piedra pómez. (D), afloramientos de paleosuelos, capas de cenizas volcánicas y arenas que se encuentran silicificadas. (E), raíces fosilizadas afectadas por silicificación en capas de paleosuelos. (F), laminación cruzada de areniscas.

➤ Evidencias de hidrotermalismo (geiseritas): facies Los Baños

La unidad El Pedregal contiene alteración hidrotermal (facies Los Baños) que es el resultado de una sobre posición de fluidos hidrotermales en la secuencia sedimentaria y volcánica previa. La facies “Los Baños” está compuesta por minerales de origen hidrotermal, estructuras de disolución y estructuras de precipitación.

Las alteraciones hidrotermales que se pudieron reconocer son silicificación, argilización y sulfatos.

La silicificación se presenta en un color pardo claro a oscuro cambiando a tonalidades grises al intemperismo. La apariencia es de sílice amorfo en capas. La silicificación se presenta reemplazando a las areniscas en los alrededores de la iglesia de La Concepción y se observa este reemplazamiento en la matriz de las areniscas. La silicificación también afecto a paleosuelos y cenizas volcánicas.

La argilización se presenta como arcillas de color blanco que se encuentran en ocasiones rodeadas por sílice amorfo. En ocasiones se puede observar que estas arcillas se intemperizan formando arcillas de color blanco de tipo supergénico. Los sulfatos no son abundantes y solo se observaron algunos en la cavidad o foco hidrotermal por debajo de los cimientos de la iglesia Concepción.

Las texturas de disolución que se observan son cavidades, pequeños orificios y surcos en las areniscas y a veces por encima de capas de sílice amorfo. Las estructuras de precipitación estas hechas de sílice amorfo como estalactitas, estalagmitas y cortinas (Figura 4.5).

La unidad El Pedregal en la parte de la Iglesia La Concepción presenta basculamientos de las areniscas que solo se pueden dar por la presencia de una falla geológica ya que el ángulo de inclinación es por arriba de 40° y este dato también lo observó De Jesús-García (2018).

La falla lleva un rumbo NW-SE, y un echado de más de 45° con dirección al SW con base en la interpretación de la rotación de las capas; esta falla fue nombrada como falla San Pedro de Los Baños por De Jesús-García (2018).

La unidad El Pedregal en el área de estudio no se observó a qué rocas sobreyace porque no hay afloramientos de estas rocas sin embargo con base en la integración estratigráfica en el

Valle de Ixtlahuaca que realizó De Jesús-García (2018) se interpreta que la unidad El Pedregal se encuentra sobreyaciendo a depósitos fluvio-lacustres y volcánicos del valle de Ixtlahuaca que son más antiguos; y a su vez la unidad El Pedregal subyaciendo a la unidad piroclásticos Jocotitlán. Las relaciones estratigráficas permiten inferir que la edad de esta unidad es ca. de 10 mil años y concuerda con las interpretaciones de Jesús García (2018).

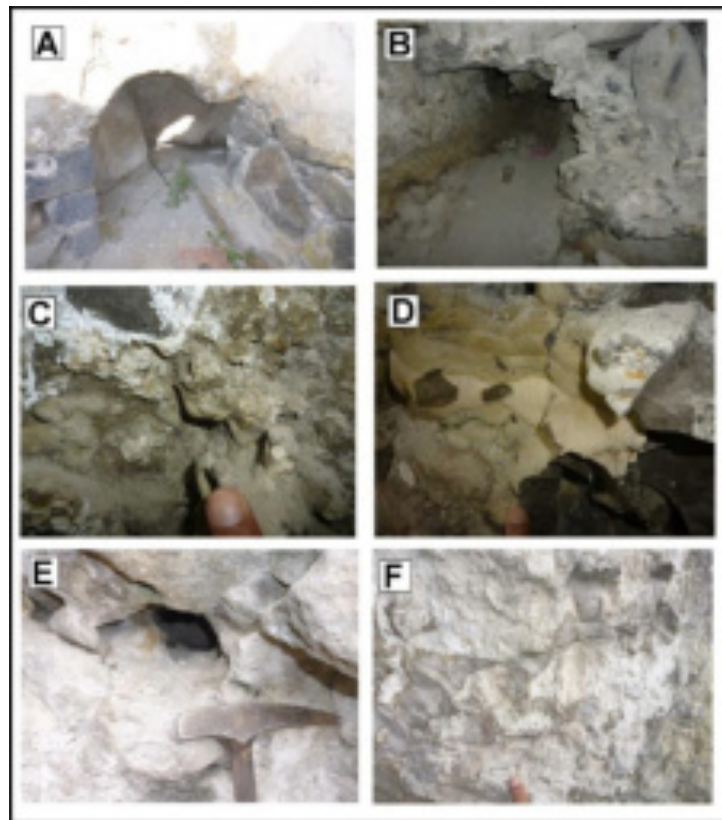


Figura 4.5 Texturas, alteraciones hidrotermales y estructuras relacionadas a la facies hidrotermal Los Baños de la unidad El Pedregal. (A), salida de manantial hidrotermal en la parte trasera de la Iglesia La Concepción. (B), salida de fuente hidrotermal en la base de la Iglesia La Concepción. (C), precipitación de sílice amorfo de color pardo en la cavidad hidrotermal. (D), capas botroidales y cortinas de precipitación de sílice amorfo. (E), cavidades de disolución hidrotermal. (F), parches de reemplazamiento hidrotermal en afloramientos silicificados.

Unidad San Pedro (Qsp)

La unidad San Pedro es una unidad distribuida en los alrededores de la unidad Concepción-San Pedro de Los Baños. La unidad fue incluida originalmente dentro de la unidad Concepción-San Pedro de Los Baños por De Jesús-García (2018). La unidad San Pedro es una secuencia de sedimentos fluvio-lacustres y paleosuelos intercalados con depósitos piroclásticos. Esta unidad aflora en los alrededores de la laguna Los Baños, así como en los cortes de caminos y carreteras cercanos a San Pedro de Los Baños y Concepción de Los Baños.

Los depósitos fluvio-lacustres están compuestos por arenas, limo-arcillosas y arcillas de tonos cafés claros y color beige; los depósitos se pueden observar en los cortes en las cercanías a la laguna, los depósitos fluvio lacustres están intercalados con los depósitos de caída y paleosuelos. En arenas de los depósitos fluviales se identificaron fragmentos de pómez y una matriz de ceniza retrabajada.

La secuencia de paleosuelos de la unidad San Pedro presenta un color pardo claro con una granulometría fina y se presentan intercalados algunas capas con los sedimentos fluvio-lacustres. La unidad San Pedro no presenta afectación por hidrotermalismo.

La unidad San Pedro es similar en algunas litologías a la unidad El Pedregal sin embargo las areniscas y arenas conglomeráticas ricas en partículas de cuarzo y líticos de riolitas parecen no estar presentes en la unidad San Pedro. La relación estratigráfica no es clara entre ambas unidades y existe la posibilidad de que haya un cambio lateral entre ambas unidades.

Unidad San José (Qpsj)

En este trabajo se decidió considerar como unidad San José a una secuencia de depósitos volcánicos, sedimentarios y paleosuelos que se ubican a 500 metros al Norte de la laguna de los Baños. Los afloramientos se localizan en cortes ubicados sobre las laderas de las márgenes de arroyos cerca de cultivos. La secuencia está compuesta capas de granulometría de limos, arcillas, arenas y gravas (Figuras 4.6 y 4.7). Las partículas en las arenas y gravas están compuestas de líticos de andesita, y dacita, así como pómez bien redondeada. Algunas capas son de paleosuelos ya que presentan estructura columnar y raíces antiguas.

Los paleosuelos intercalados con los depósitos piroclásticos se encuentran sin alterar, además su granulometría es de tamaño limos y presentan evidencias de pedogénesis. Los depósitos de arenas y gravas presentan estructura lenticular, también se observan lentes de limos-arcillas que definen una estructura flaser, así como estructuras de carga; y en algunos niveles se ven estructuras de flama y presencia de intraclastos de arcilla.

Los depósitos de arenas y gravas presentan estructura lenticular, también se observan lentes de limos-arcillas que definen una estructura flaser, así como estructuras de carga; y en algunos niveles se ven estructuras de flama y con presencia de intraclastos de arcilla.

Las capas anteriormente descritas se interpretan en este trabajo que pueden representar una secuencia de depósitos piroclásticos, oleadas piroclásticas (surge), paleosuelos y depósitos de ceniza que fueron re TRABAJADOS en aguas someras.

La unidad San José puede ser la misma unidad de San Pedro como un cambio de facies lateral ya que se encuentran al mismo nivel topográfico pero que no se puede comprobar la continuidad lateral de las unidades en los afloramientos.

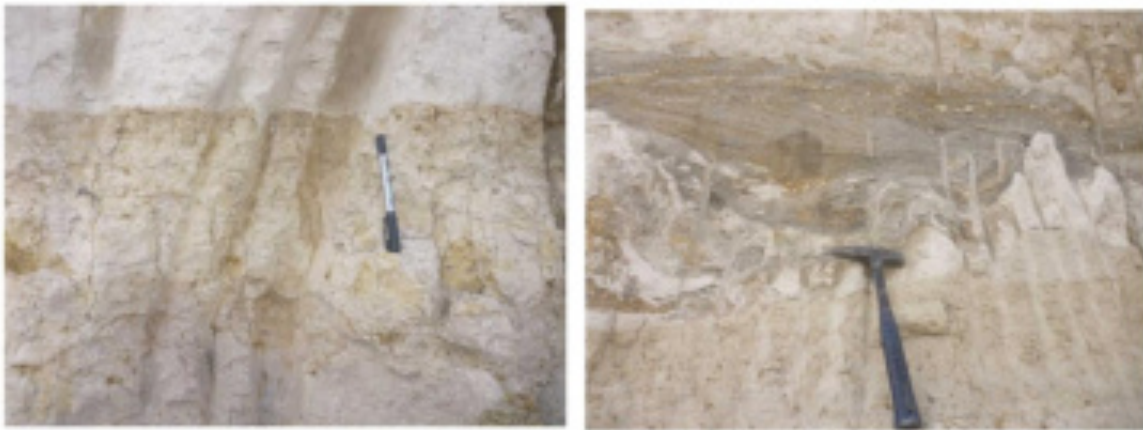


Figura 4.7 Afloramiento representativo de la unidad San José. Se observan las capas de paleosuelos, con capas de arenas, limos y arcillas en que algunas pudieron haber representado depósitos de oleadas piroclásticas y otros depósitos sedimentarios de origen fluvio-lacustre.

➤ Depósitos piroclásticos de caída basálticos

Las unidades Concepción-San Pedro de Los Baños, San Pedro y San José son cubiertas por depósitos de caída de composición andesítico-basáltica. Estos depósitos afloran la parte norte y oriente de San Pedro de Los Baños y se observaron cubriendo a las unidades San Pedro y San José. Estos depósitos piroclásticos máficos presentan un color oscuro y están compuestos de pómez intermedia, fragmentos líticos de basalto y andesita (Figura 4.8).

Se interpreta que estos depósitos piroclásticos provienen del volcán Jocotitlán, ya que se encuentra cercano este estratovolcán del área de estudio y que en el trabajo de Salinas-Sánchez (2013) describe estos depósitos en el poniente del Volcán Jocotitlán.



Figura 4.8 Depósitos piroclásticos de caída andesíticos-basálticos que cubren a la unidad Concepción-San Pedro de Los Baños.

➤ Depósitos lacustres de Laguna de los Baños

La laguna de Los Baños tiene un área de 1.4 km² y los sedimentos que contiene son arcillas, limos y arenas. En la parte norte de la laguna predominan arenas con algunas capas de limos y arcillas, algunos de estos sedimentos derivados de retrabajo de cenizas volcánicas; en el sur de la laguna la granulometría es de limos, arenas y arcillas. Las partículas reconocidas en estos sedimentos son líticos de roca volcánica y pómez. El tamaño de la laguna en función del tirante de agua cambia con respecto a las temporadas de lluvias y estiaje, en algunas partes se observa cambios en la proporción de materia orgánica de plantas debido a estos cambios estacionales. En algunas partes se observó que la profundidad de la laguna es de 1.5 m, pero en otras partes debe ser mayor.

➤ Depósitos fluviales recientes

Los depósitos de sedimentos fluviales recientes se encuentran en varios arroyos que se localizan dentro del área de estudio. Estos depósitos están conformados por material de arenas, limos y arcillas con pequeños fragmentos de cuarzo, basalto andesita y riolita; estas partículas producto de la erosión de los depósitos circundantes de flujos piroclásticos, caída de ceniza y otras rocas volcánicas. Los sedimentos fluviales son acarreados por ríos intermitentes

4.1.2 Hidrogeología

La zona de estudio de San Pedro de Los Baños se ubica dentro del Acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco (1502) (Figura 4.9). El acuífero del Alto Lerma es el que abastece de agua potable a la Ciudad de México (CONAGUA, 2015).

El acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco de acuerdo a CONAGUA (2015) presenta una red hidrográfica determinada por el desarrollo de un sistema de corrientes del tipo radial en las estructuras volcánicas, además presenta una red drenaje detrítico en las mismas estructuras, los depósitos de las laderas, existen corrientes tipo uniforme y corrientes paralelas al sur del valle (CONAGUA, 2002).

Desde el punto de vista hidrogeológico la litología del valle de Ixtlahuaca está conformada mayormente por material lacustre y depósitos aluviales, de granulometría y porosidad variable, la zona de estudio contiene material permeable como son los depósitos aluviales y piroclásticos (CONAGUA, 2015).

De acuerdo con los estudios de la CONAGUA (2002) se define al acuífero de Ixtlahuaca como un acuífero de tipo semi-confinado, sus valores de transmisividad varían de 0.14 a $74.05 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ con un coeficiente de almacenamiento de 0.008.

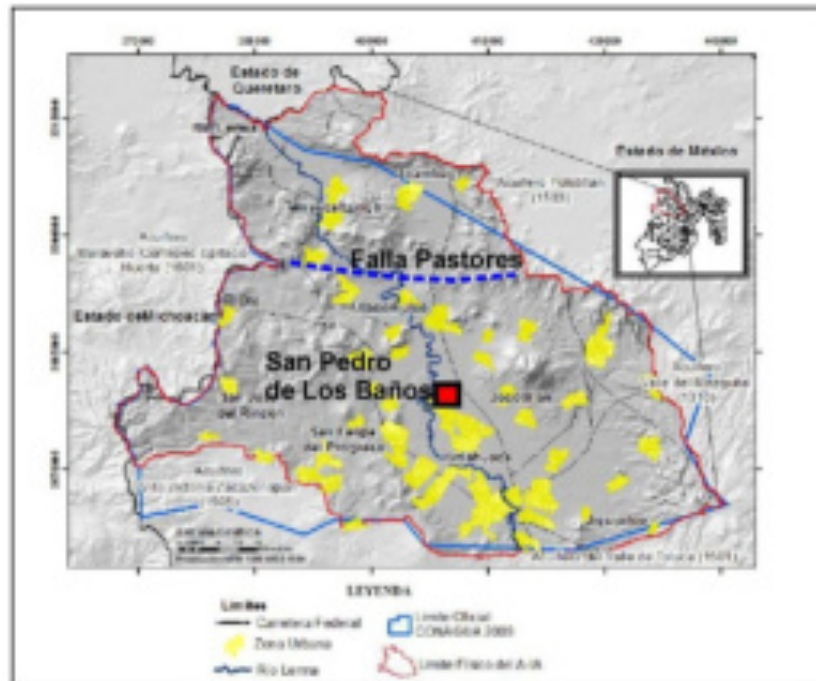


Figura 4.9 Ubicación de San Pedro de Los Baños en el contexto del Acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco (Figura modificada de Ramírez-Angeles, 2015).

El nivel freático del acuífero de Ixtlahuaca-Atlacomulco para la década de los 90's y de acuerdo a los datos de CONAGUA (2012) estaba en el Valle de Ixtlahuaca entre 15.2 m y 30 m de profundidad con respecto al valle y en la zona de San Pedro de Los Baños el nivel freático se ubicaba en entre 22.9 y 30.5 m.

En los datos de CONAGUA (2015) muestran que entre 1971 a 1996 ha existido abatimiento con valores que van de 5.0 m a 25 m. El área más afectada es en la parte noreste de Ixtlahuaca ya que hay más intensidad de bombeo, la cercanía entre pozos y cantidad de pozos de agua (CONAGUA, 2015). En el periodo de 1970 a 2010 Ramírez-Angeles (2015) determina abatimientos variables entre 0.5 m hasta 40 m para algunos pozos con base en datos de CONAGUA del año 2010 (Figura 4.10). San Pedro de Los Baños en este contexto quedaría entre rangos de abatimientos de 5 m a 20 m de acuerdo a los resultados de Ramírez-Angeles (2010) (Figura 4.10).

El acuífero del valle de Toluca se interconecta hidrológicamente con el acuífero del Ixtlahuaca-Atlacomulco (Figura 4.11) esto de acuerdo a CONAGUA (2015), el primer valle está compuesto por tres unidades que tienen una continuidad hidráulica, la cual permite el desarrollo de sistemas de flujo regional interdependientes que conectan y se extienden hasta el valle de Ixtlahuaca a través de la topografía de Perales (CONAGUA, 2015).

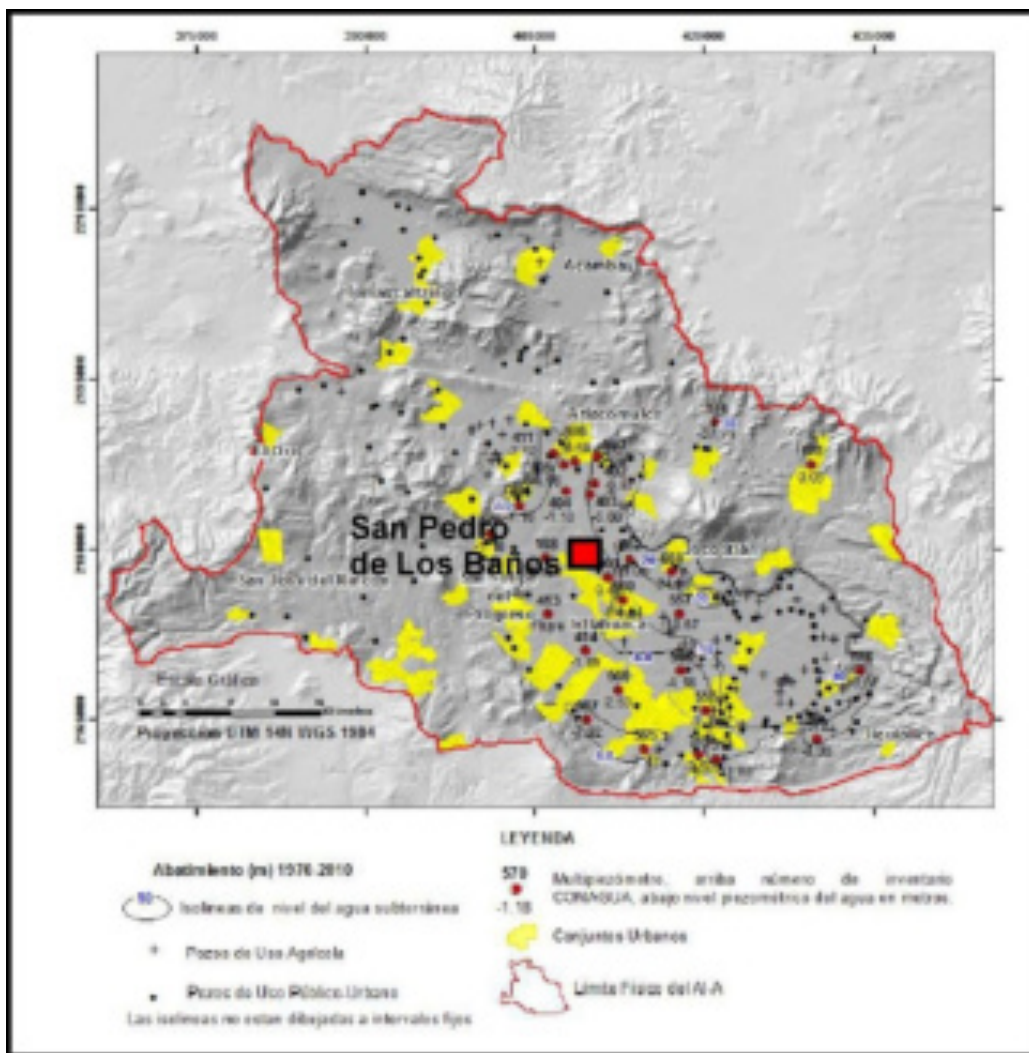


Figura 4.10 *Isolíneas de abatimiento del Acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco para el período 1970-2010 con datos de CONAGUA (2010) (Ramírez-Angeles, 2015).*

➤ Dirección del agua subterránea en san pedro de los baños

En el área de San Pedro de Los Baños y de acuerdo a los resultados de CONAGUA (2015) para datos de elevación del nivel estático de 1996 se puede ver que el flujo del agua va hacia dirección Norte y Noreste (Figura 4.11). En otros resultados de CONAGUA (2015) (Figura 4.11) se ve que existe una dirección del agua que corre desde el valle de Toluca en dirección al Valle de Ixtlahuaca con respecto al Norte y desde la sierra de las cruces (zona de recarga) corre la dirección NW del valle de Ixtlahuaca.

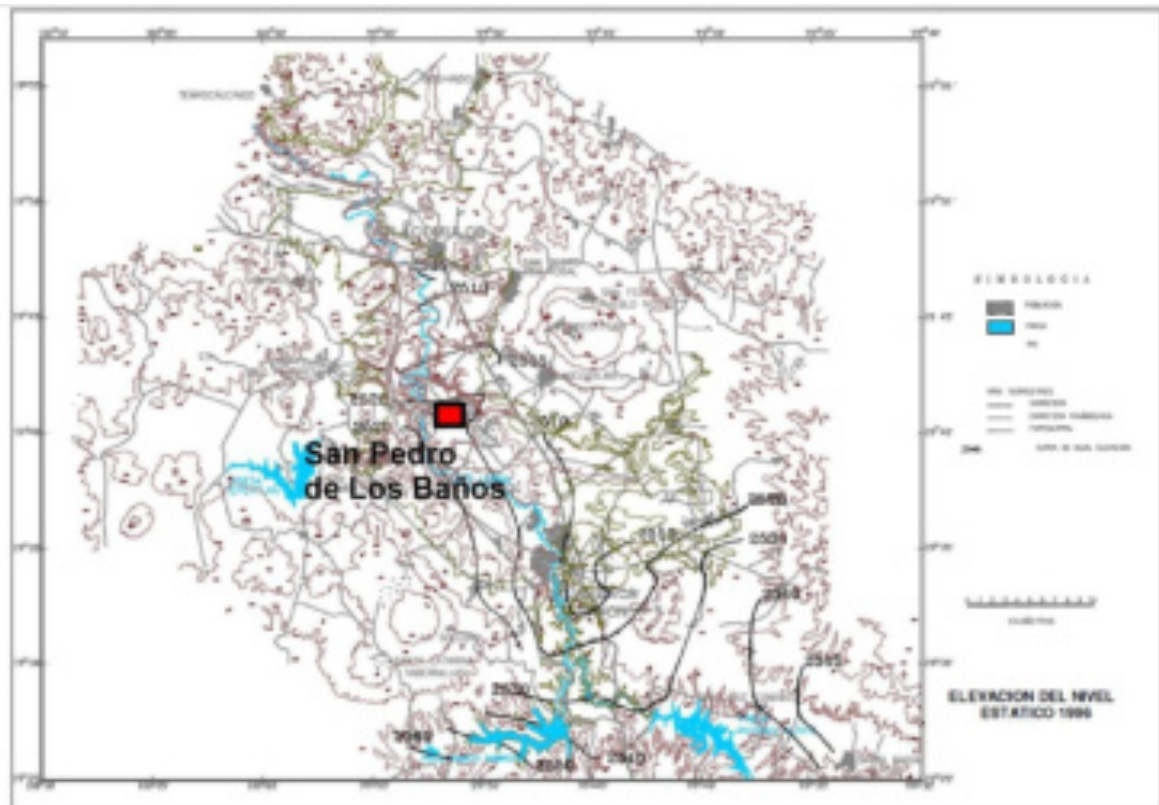


Figura 4.11 Elevación del nivel estático para 1996 y se ubica San Pedro de Los Baños (CONAGUA, 2015).

4.1.3 Características geológico-ambientales

➤ Sobre explotación de pozos de agua

La zona de estudio se encuentra sobre el acuífero Ixtlahuaca-Atlahcomulco, es uno de los acuíferos del Alto Lerma que abastece de agua potable a la ciudad de México, desde hace algunas décadas, constituye una de las fuentes externas de mayor relevancia en el suministro de agua subterránea de gran calidad para la zona metropolitana (CONAGUA, 2015).

De acuerdo a CONAGUA (2015), desde 1949, se inició la recolección de aguas de manantiales a lo largo del estado de México, con la captación inicio también la explotación de los acuíferos mediante pozos profundos y se construyó el túnel de Atarasquillo, para que, en 1951, abastecieran a la ciudad de México con un volumen de 4 metros cúbicos por segundo. Así, en 1981, se extraían del acuífero de Ixtlahuaca 190 millones de metros cúbicos (m^3), lo que ocasionó depresiones de 0.5 a 1 m, provocadas por el bombeo de las baterías de los pozos del Departamento del Distrito Federal, en la porción central del valle, donde confluye el agua subterránea; la profundidad al nivel estático oscilaba entre 20 y 100 m.

En 1988, la batería de pozos de agua potable del Distrito Federal, habían disminuido su caudal, con el fin de recuperar los niveles piezométricos originales, ya que se hizo presente un abatimiento al poniente de Ixtlahuaca; con estas medidas y con la infiltración de fugas y retornos de riego, se recuperaron los niveles del agua subterránea en el valle de Ixtlahuaca. Tres años después, en 1991, la recarga total del acuífero era de 32 m^3 y existía recuperación, producto de la disminución del bombeo y como respuesta del volumen aportado por las entradas subterráneas en la región (CONAGUA, 2009). Sin embargo, a pesar de cierta recuperación continua la sobreexplotación parece continuar ya que los datos del Diario Oficial de la Federación del año 2009 indican que la extracción es superior a la de la recarga, ya que se extraen 208 millones de metros cúbicos por año y la recarga es solo de 119 millones de metros cúbicos por año.

Estas actividades y medidas en el Acuífero Ixtlahuaca-Atlahcomulco afectaron a la zona de San Pedro de Los Baños, y existen testimonios de habitantes que mencionan que en la década de los años sesentas (60's) todavía existían las aguas termales (Figura 4.12) pero ya se venían desapareciendo estas aguas en estas fechas y para 1970 el nivel de agua era menor hasta que

el brote de las aguas termales desapareció (Miranda-Torres, 2018, nota periodística Sol de Toluca).

➤ Población e industria

Un aspecto importante y relacionado a la extracción de agua subterránea y que tiene implicaciones sociales y ambientales, es la presencia o establecimiento de industrias. Desde la época colonial ya existía una demanda por el agua de los alrededores de Jocotitlán y San Pedro de Los Baños, y esta originaba conflictos entre las haciendas existentes por el agua como la Hacienda Villejé, la Hacienda Pastejé y la Hacienda Tiacaque (Secundino-Estanislao, 2017). Hoy día las zonas industriales de Pastejé y la zona industrial de Atlacomulco parecen estar ejerciendo mucha influencia en la extracción de agua subterránea y de acuerdo con Ramírez-Angeles (2015) en Jocotitlán se concentran abatimientos muy grandes. La zona de estudio se encuentra en el municipio de Ixtlahuaca y tiene una población de 141,482 habitantes, las actividades económicas de la población se centran en dos sectores: agropecuario y minería, la primera solo genera erosión eólica por los cultivos el segundo sector minero genera un alto impacto a la remoción de material pétreo para su uso y aprovechamiento en la construcción.



Figura 4.12 Los Baños las instalaciones del actual templo de San Pedro (Iglesia La Concepción). (A), capas de areniscas silicificadas y basculadas por una falla geológica (falla San Pedro de Los Baños). (B), antiguas instalaciones de un pozo de agua subterráneo. (C), parte trasera del templo en donde se ven cuartos de vestidores y de baños. (D), antigua alberca de agua termal comunitaria. (E), alberca externa de aguas termales. (F), foto de 1970 de la alberca externa de aguas termales (Miranda-Torres, 2018). (G), Personas bañándose en los baños (Mediateca INAH).

➤ Extinción de los manantiales y aguas termales

Con la construcción de obras hidráulicas en el Estado de México para abastecer de agua en la Ciudad de México, la construcción de dichas obras, captaron el agua de los manantiales del cual generaron una disminución del nivel freático así como la desaparición de algunos manantiales de aguas termales, uno de los que desaparición fue el manantial de San Pedro de los baños; en este lugar se construyó un balneario y al lado del mismo una pequeña iglesia, ambas construcciones se sentaban sobre una caverna del cual brotaba el agua a una temperatura de 40°C según el cuidador de la iglesia, después de 1950 este balneario comenzó a disminuir su caudal y fue hasta años después que se construyeron pozos muy cerca de este balneario para explotar sus aguas dirigiendo todo su caudal al sistema de aguas de la Ciudad de México.

4.1.4 Características geotermiales

La construcción de obras hidráulicas en San Pedro de los Baños y Concepción de los Baños, así como la construcción de pozos de agua, permitieron tomar registros de temperaturas en la década de los 90's. Estos registros fueron colectados en específico en la zona de Pastejé muy cerca de Concepción de los Baños y tomaron el registro de un pozo profundo en la zona industrial a 320 m de profundidad dando con una temperatura de 37°C (INEGI, 2001).

La presencia de estas aguas termales en San Pedro de Los Baños y desde un punto de vista de un sistema geotérmico. La fuente de calor pueden ser intrusiones subvolcánicas o diques ígneos que están sepultados por sedimentos y depósitos volcánicos en el área de Concepción y San Pedro de Los Baños, ya que las últimas erupciones volcánicas en la región son algunas etapas eruptivas del estratovolcán Jocotitlán que van desde los 600 000 años hasta cerca de los 10 000 años (Salinas-Sánchez, 2015).

La presencia de una estratigrafía determinada por unidades piroclásticas, depósitos de ceniza volcánica, epiclásticos y posibles derrames lávicos a profundidad determinan que existan condiciones de impermeabilidad para acuíferos, y pueda haber rocas sello para el acuífero que alimento a las aguas termales de San Pedro de Los Baños.

La presencia de la falla San Pedro de Los Baños definida por De Jesús-García (2018) sería el canal permeable por el que las aguas termales alcanzaron la superficie. Este dato tiene

implicaciones importantes porque los pozos de agua subterránea en la región funcionan como conductos permeables para extraer agua termal del interior.

Las alteraciones hidrotermales y mineralogía de la unidad Concepción-San Pedro de Los Baños determinada por presencia de calcedonia, sílice amorfo, minerales arcillosos y sulfatos sugieren que las temperaturas pudieron variar entre 30°C a 100°C. Los registros históricos de los años 40's y 50's de las temperaturas de 30°C a 35°C son más recientes sin embargo debido a la mineralogía de alteración hidrotermal es probable que las temperaturas hayan sido mayores entre 50°C a 100°C. La presencia de sulfatos y que no haya carbonatos sugiere un pH ácido y esto sería coherente con la presencia de azufre en las aguas. Los minerales arcillosos de color blanco pueden ser una mezcla de caolinita y esmectita que son minerales asociados con sílice amorfo.

En la unidad Concepción-San Pedro de Los Baños la permeabilidad fue a lo largo de la falla principal y algunas fracturas relacionadas, pero también la permeabilidad fue alta a lo largo de las areniscas y areniscas conglomeráticas, así como de los contactos entre paleosuelos con las arenas y limos.

4.2 Temascalcingo (El borbollón)

4.2.1 Geología

El Borbollón es una manifestación hidrotermal que se encuentra en el valle del Solís ubicado en el municipio de Temascalcingo (Estado de México). El área del Borbollón se encuentra rodeada por cuatro grandes estructuras volcánicas (Figura 4.13): el volcán Altamirano, la caldera de Amealco, el volcán Temascalcingo y el volcán Ñado. En distancia el volcán Altamirano es el más cercano, la caldera de Amealco está a 28.7 km al Noroeste, el volcán Temascalcingo a 15.5 km en dirección Sureste y el volcán Ñado a 18.1 km en dirección Noreste. La manifestación hidrotermal El Borbollón se encuentra sobre la intersección de lineamientos estructurales asociados al sistema de fallas de Acambay-Tepuxtepec y Taxco-San Miguel de Allende (Alaniz-Álvarez et al., 2002). El trabajo de Suter et al. (1992) describe dos sistemas de fallas o lineamientos Perales-Amealco y San Andrés-Lago Solís (algunos inferidos), en el micro-sistema Perales-Amealco indica la posible existencia de manifestaciones geotermales.



Figura 4.14 Falla de tipo normal con desarrollo de salbanda. Parte del conjunto de fallas de Acambay que limitan la parte norte del valle El Solís.

En los alrededores del Borbollón en este trabajo se realizó la geología básica. Se definen varias unidades geológicas (Figura 4.15): Las rocas andesíticas Santa Rosa Solís (P-An), el basalto San Felipe (Q-Ba), rocas volcánicas del Volcán Altamirano, unidad San José Ixtapa (Q-afp), depósitos fluviales Lerma (Q-fvs) y los depósitos fluviales recientes (Q-fv).

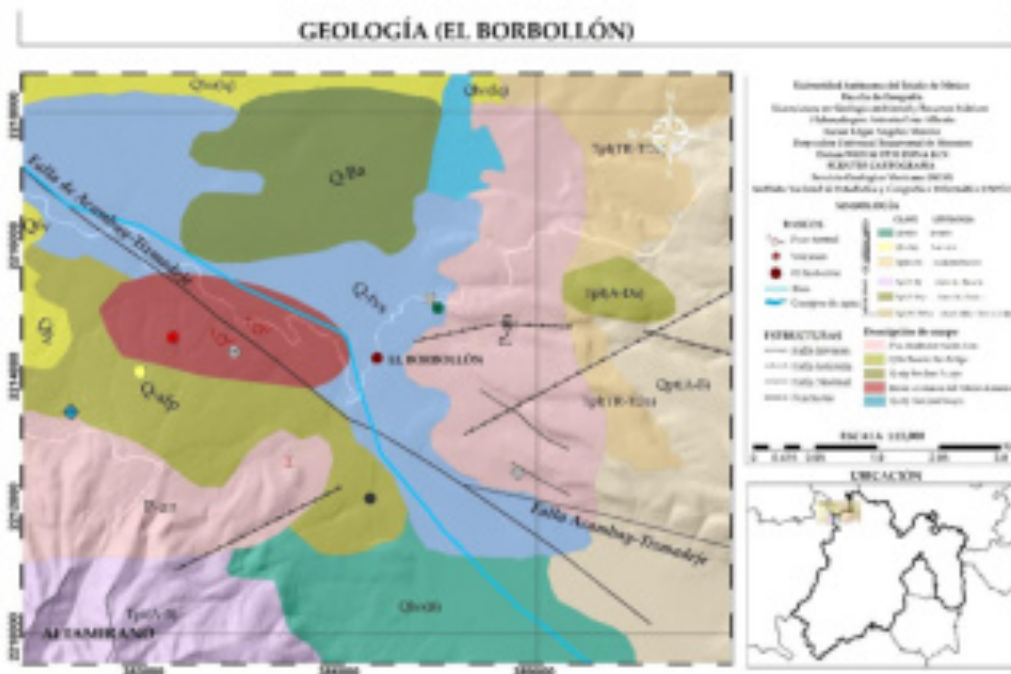


Figura 4.15 Mapa geológico de la manifestación geotermal El Borbollón (elaboración de este trabajo).

Unidad de Andesitas Santa Rosa (P-An)

La unidad de andesitas Santa Rosa se ubica en la parte noreste del Borbollón a una distancia de 4.5 km (Figura 4.15). La unidad está constituida de una secuencia de derrames lávicos andesíticos con autobrechas volcánicas. En afloramiento presentan un color pardo-rojizo al intemperismo y al fresco un color gris oscuro. La textura de la roca es afanítica con escasos cristales entre la matriz de plagioclasas. En algunos lugares las andesitas muestran diaclasas de enfriamiento que dan una apariencia de “lajas”. Las andesitas son afectadas por fracturas y fallas con orientación NW-SE, en las partes de piedemonte de las andesitas se observaron algunas fallas de tipo normal que afectan a depósitos de ceniza volcánica. La edad de estas andesitas puede ser post-ignimbrita de Amealco (4.68 ± 0.10 Ma, Aguirre-Díaz, 1996) ya que se observó en algunas partes a estas andesitas siendo cubiertas por estas rocas piroclásticas en Aguirre-Díaz (1996) señala una posible edad para estas andesitas de 5.7 Ma.

➤ Unidad Basalto San Felipe (Q-Ba)

La unidad basalto San Felipe se ubica en la parte norte de la manifestación geotermal El Borbollón a una distancia de 1.7 km. El basalto San Felipe está constituido de derrames lávicos basálticos que forman mesetas y lomas extensas localmente. La roca en afloramiento presenta una textura afanítica. Los flujos de derrames fueron emplazados hacia la dirección Sur hacia el valle fluvial del río Lerma y en una depresión en donde se cortan las fallas NW-SE que cortan a las andesitas Santa Rosa. Algunas partes de esta unidad son cubiertas por sedimentos lacustres que fueron aportados por el caudal del río Lerma.

➤ Rocas volcánicas del Volcán Altamirano

El volcán Altamirano está formado de derrames lávicos y depósitos piroclásticos de composición andesítico-dacíticos; es considerado como un estratovolcán del grupo de volcanes dentro del graben de Acambay que incluye al complejo volcánico Ñadó (Cabrera-Román et al., 2019), sin embargo, no está caracterizado desde el punto de vista volcánico o estratigráfico. En la carta geológico-minera del Servicio Geológico Mexicano de Querétaro escala 1: 250 000 de 1999 es colocado de edad Plioceno y compuesto de andesita y basalto.

Desde el punto de vista estructural en este trabajo se infiere que está ubicado en una zona de relevo estructural de las fallas normales del Graben de Acambay; en esta zona de relevo se

ubica también la manifestación geotermal El Borbollón y fue emplazado el basalto San Felipe.

El graben en el que se encuentra el Borbollón y el volcán Altamirano fueron controlados alguna vez por la actividad de la falla Epitacio Huerta y que su actividad pudo cesar hace aproximadamente 2.2 Ma, ya que Aguirre-Díaz (1999) fechó el material de un cono volcánico localizado sobre la traza de la falla.

Unidad San José Ixtapa: abanicos aluviales sobre flujos piroclásticos (Qafp)

La unidad San José Ixtapa está ubicada en el piedemonte de la parte Norte del volcán Altamirano (Figura 4.15). La unidad está compuesta de depósitos piroclásticos, algunos derrames lávicos andesítico-dacíticos y depósitos sedimentarios de abanicos aluviales. Los depósitos piroclásticos afloran hacia la abertura del cráter del volcán Altamirano, el cráter presenta una forma de herradura. En algunas partes de las laderas se observaron depósitos piroclásticos con pómez. Los depósitos sedimentarios están compuestos de arenas, limos y algunos bloques de roca volcánica y cubren discordantemente a los depósitos piroclásticos. La presencia de piedra pómez en depósitos volcánicos de caída sugiere que puede haber erupciones tipo pliniana, pero no hay certidumbre de que sea del volcán Altamirano y podrían más bien ser del volcán Temascalcingo (VT), que tiene depósitos de pómez dispersos por la región que arrojan edades de 20 mil años, de acuerdo con los datos que reporta Aguirre-Díaz et al (2015).

Los datos de depósitos volcánicos en la región de Aguirre-Díaz et al (2015), sobre el grado de desgaste entre los volcanes Altamirano y Temascalcingo le hacen suponer a él que ha tenido erupciones muy jóvenes con pómez. Aguirre-Díaz et al (2015) fecho los piroclastos del carbón vegetal dentro de los mismos por C14 y las edades que arrojó su datación están en el intervalo de 4000 años a 2500 años, es decir son muy recientes en tiempo geológico.

Unidad Valle del Solís depósitos fluviales y suelos (Q-fvs)

La unidad Valle del Solís está ubicada a lo largo de las márgenes del río Lerma y en la depresión del valle. Los afloramientos siguen una dirección NW-SE de acuerdo a la morfología en el valle y que parece tener mucho control de las fallas del graben de Acambay. La unidad se compone de depósitos sedimentarios y suelos residuales. Los depósitos sedimentarios son arenas, limos y arcillas de origen fluvial y lacustre. Estos sedimentos en el área son cubiertos por suelos de origen agrícola.

La edad de estos depósitos se infiere puede ser Plio-Cuaternaria ya que estos depósitos cubren a depósitos volcánicos del volcán Altamirano y a los derrames de basalto del basalto San Felipe.

Depósitos fluviales-recientes (Qfv)

Los depósitos fluviales y aluviales recientes afloran a lo largo de los cauces de ríos activos y ríos que conectan con el río Lerma. La unidad está compuesta de sedimentos de limos, arcillas y arenas con algunas gravas. Sedimentos arcillosos y limosos se observaron a la base de los arroyos que se encuentran cerca del balneario El Borbollón. Las arenas de los depósitos fluviales se componen de fragmentos redondos a angulares de rocas volcánicas que pueden provenir de diferentes fuentes volcánicas regionales.

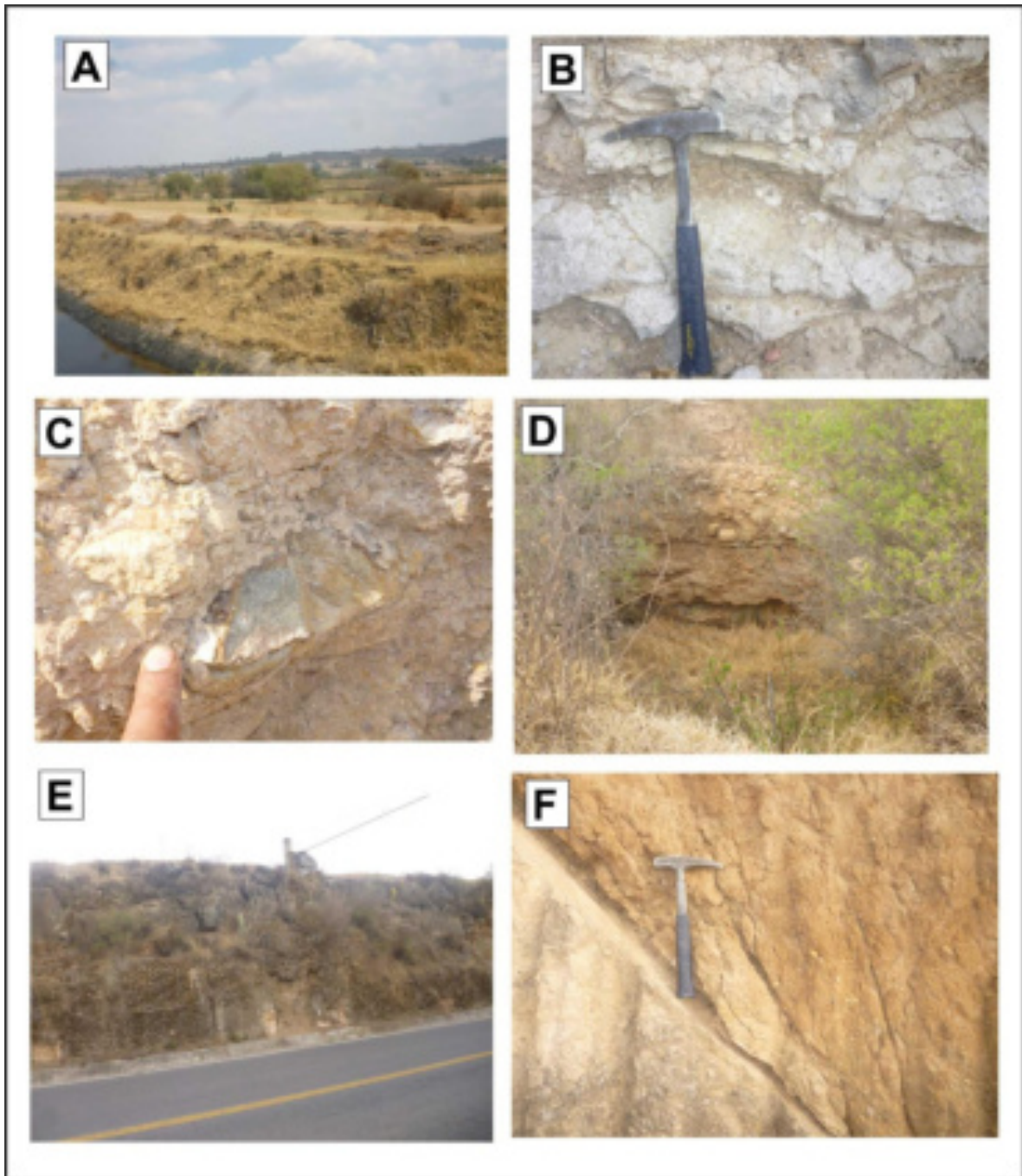


Figura 4.16 Afloramientos de las unidades descritas en este trabajo. A, unidad valle de Solís y depósitos fluviales recientes. B, depósitos volcánicos del volcán Altamirano. C, rocas volcánicas ácidas con alteración hidrotermal parte de las rocas volcánicas del Volcán Altamirano. D, gravas y arenas aluviales de la unidad San José Ixtapa. E, derrames andesíticos de la unidad Santa Rosa. F, contacto por falla normal entre roca piroclástica y depósitos de cenizas y epiclásticos.

De acuerdo a datos de CONAGUA (2015), el valle de Temascalcingo que interconecta con el valle de Amealco, tiene una conexión hidrogeológica similar, los niveles freáticos de la región de hace 20 años alcanzaban los 3-6 m, estos datos fueron colectados en norias y pozos de 15 m de profundidad.

La hidroquímica del balneario El Borbollón fue determinada por estudios como el de Cruz-González, (2017) define que las aguas son cloruradas sódicas clorurada sódica (Cl-Na), esto usando el diagrama de piper.

Los datos piezométricos del acuífero Valle de Amealco, que es en donde se encuentra el Borbollón, muestran que en el año de 1994 el nivel estático se encontraba a 10 m de profundidad y que el flujo del agua subterránea se movía desde la dirección de San Felipe hacia el poniente. Muchos registros del acuífero están entre 1994 y 2013 mismos que fueron levantados por CONAGUA.

Los niveles estáticos en San Miguel Tlaxcaltepec (Temascalcingo) se encontraban a los 90 m 2013 y en el valle del Solís para este mismo año los niveles estáticos marcaban valores entre los 80 m a los 130 m. En ambas regiones la dirección de flujo se interpretó Norte-Sur partiendo del volcán Ñado al volcán Altamirano, cabe mencionar que van de una zona volcánica de basaltos y andesitas a la zona lacustre del Borbollón cerca de la falla Epitacio-Huerta (Figura 4.18).

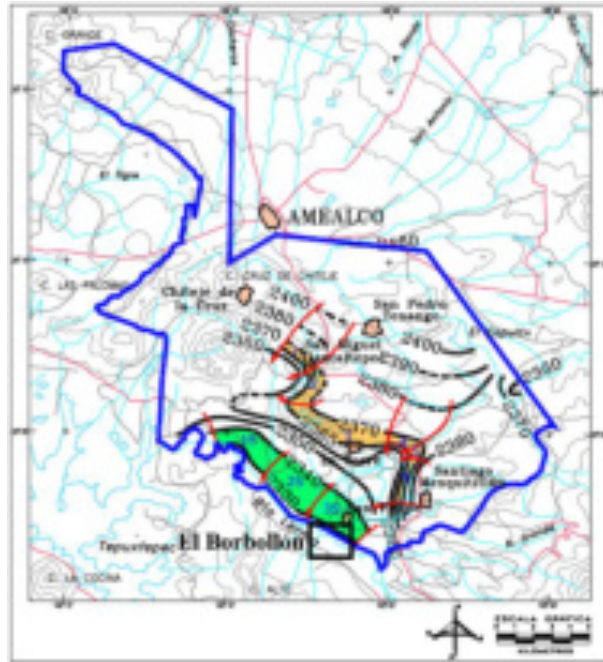


Figura 4.18 Ubicación de la manifestación geotermal El Borbollón en relación con el acuífero valle de Amecalco y las direcciones de flujo del agua subterránea (CONAGUA, 2015).

4.2.3 Características geológico-ambientales

La manifestación geotermal El Borbollón se localiza a lo largo del cauce del río Lerma y en una llanura de sedimentos de inundación. En los alrededores del Borbollón se pudo observar parcelas de actividad agrícola y se sabe que el río Lerma está compuesto de varios desechos y contaminantes que son derivados de actividades productivas de varias poblaciones e industrias a lo largo de su curso.

En la zona del balneario El Borbollón se observaron dos surgencias geotermales, una de estas se ubica dentro del cauce del río Lerma, el personal encargado del balneario y gente del Ejido de San José Ixtapa la cerco con barda para tratar de aislar el agua termal del agua fluvial (Figura 4.19). La otra surgencia se localiza dentro de las instalaciones del balneario y en una alberca, aunque por las observaciones del color del agua, la turbiedad y partículas suspendidas se interpreta que esta agua puede estar mezclada con agua fluvial del río Lerma (Figura 4.19).

En la surgencia geotermal dentro de aguas del río Lerma se observó que estas aguas termales parecen salir verticalmente y atraviesas sedimentos de la unidad de sedimentos fluviales y aluviales recientes, así de la unidad San José Ixtapa y la unidad Valle del Solís. Es probable que venga de mayor profundidad ya que en el área deben estar sepultadas fallas y fracturas que llevan orientación E-W y NW-SE de acuerdo a los estudios geológicos regionales en la región (Suter y Quintero, 1992; Aguirre-Díaz, 1996; Aguirre Díaz et al., 2000).

Las dos surgencias geotermales mantienen en promedio un promedio de gasto de 12 l/s a 15 l/s (Historia de Temascalcingo, 2018) no ha disminuido de manera alarmante, el riesgo hídrico latente se encuentra en la posible disminución a futuro del caudal de los pozos por el aumento de extracción de agua.

De acuerdo a la fuente, Historia de Temascalcingo (2018), en este documento se describe que algunos manantiales y posibles aguas termales en la localidad de pastores desaparecieron debido a la construcción hidráulica de algunos pozos de agua en las cercanías de la población Pastores acompañada de aprovechamiento de agua. Estos pozos localizados a lo largo de la traza de la falla de Pastores.

Desde el punto de vista de la calidad del agua se observó que en el balneario se han realizado estudios de químicos por parte de CIRA-UAEMEX (2010) para calidad del agua de acuerdo a las normas técnicas NMX-AA008-SCFI-2000 para pH, norma NMX-AA-42-1987 para coliformes totales y norma técnica NMX-AA-42-1987 para coliformes fecales. Los límites permisibles que estipula la norma NMX-127-SSA-1994 son para el pH valores 6.5 a 8.5 y el resultado de laboratorio CIRA-UAEMEX (2010) fue de 7.0. Para coliformes totales la norma NMX-127-SSA-1994 establece el límite permisible en 2NMP/100 ml y en el Borbollón se tiene 80NMP/100 ml. Para coliformes fecales se tiene de acuerdo a la NMX-127-SSA-1994 como no detectable NMP/100 ml y en El Borbollón se tiene 20NMP/100 ml. Los valores para coliformes están por arriba de lo permisible y esto apunta a que se necesitan soluciones para entubar a mayor profundidad las manifestaciones de aguas termales y protegerlas de la mezcla con aguas superficiales y posiblemente del acuífero libre, que no tienen la calidad de agua adecuada, esto si se quieren aprovechar.

4.2.4 Características geotermiales

Un sistema geotérmico está compuesto de un foco de calor, rocas que tienen permeabilidad, rocas sello y agua subterránea. En el caso de la manifestación geotermal El Borbollón es posible que la fuente de calor esté profunda. En el área del valle han realizado trabajos de geofísica a escala regional. De acuerdo con Arzate et al (2018), define que parte de la geometría de las estructuras proporcionan datos sobre anomalías térmicas relacionadas con la circulación, geometría y vulcanismo del Holoceno. En el trabajo de Arzate et al (2018), reporta que los vestigios morfológicos de las fallas principales están bien conservados al norte y al sur del graben Acambay, mismos que coinciden con las numerosas fuentes hidrotermales.

En el trabajo de Arzate et al (2018) por medio del método de resistividad de la corteza en la zona del graben de Acambay, identifica una zona de conductividad anómala en comparación con las resistividades de la corteza superior específicamente en el oeste y sureste de México, donde los valores de la corteza están consistentemente por encima de varios miles Ohms (unidad de resistencia eléctrica). En otras palabras, señala que la corteza se vuelve más conductiva y alcanza valores anómalos bajos, quizás como resultado de un proceso metasomático con una matriz hidratada, desencadenada por la proximidad de los volcanes Temascalcingo y Jocotitlán, por último, señala las evidencias geotérmicas de alteración al oriente del graben de Acambay como una zona con potencial geotérmico.

En el área del El Borbollón se observaron brotes del agua hidrotermal en sentido vertical. Una salida se encuentra a un lado del cauce del río Lerma y la otra en la alberca del balneario. Las temperaturas que se han documentado son de 35°C y 56°C (salida termal en el río Lerma) (Cruz-González, 2017). Se observaron abundantes algas y organismos no reconocidos, así como mezcla de aguas residuales con agua hidrotermal en la manifestación hidrotermal en el río Lerma. La ubicación de El Borbollón coincide a lo largo del lineamiento estructural Amealco-Perales de Suter et al. (1992) con orientación NW-SE.

Esta unidad se define por la presencia de rocas volcánicas extrusivas pertenecientes al volcán Altamirano, las rocas que afloran en los alrededores de la base del volcán son basaltos, cubiertas mayormente por Andesitas y Dacitas, dichas rocas están parcialmente alteradas y

contienen vestigios antiguos de hidrotermalismo, las evidencias mineralógicas son ópalo, calcedonia, feldespatos argilizados, trazas de pirita y limonitas supergénicas.

A una distancia de 2 km al Suroeste de El balneario El Borbollón se localizaron evidencias de hidrotermalismo más antiguo en rocas volcánicas dacítico-andesíticas en las faldas del volcán Altamirano. Las rocas se observan con alteración hidrotermal de tipo argílica y se observan vetas de cuarzos de espesores de 5cm a 8cm. Los minerales de alteración identificados son caolinita, ópalo, calcedonia y minerales arcillosos (¿illita?). Se observaron feldespatos argilizados, así como pirita diseminada (Figura 4.19).



Figura 4.19 *Vetas de cuarzo encajonadas en roca volcánica dacítica con alteración hidrotermal (alteración argílica y pirita diseminada) y presencia de limonitas supergénicas.*

4.3 Ixtapan de la Sal-Tonatico

4.3.1 Geología

La zona de estudio tiene una extensión de 18 km² y se ubica al sur del Estado de México, colinda con el estado de Guerrero. Entre las poblaciones de Ixtapan de la Sal y Tonatico existen varias manifestaciones de aguas termales.

Las rocas que aparecen alrededor de las manifestaciones geotermales, son en parte rocas de una secuencia vulcano sedimentaria con metamorfismo (Campa et al., 1974). Esta secuencia presenta rocas como: calizas, areniscas y conglomerados, también se encuentran rocas como: granodiorita, basaltos, andesitas, riolitas, lahares y otras rocas piroclásticas.

Las manifestaciones de aguas termales se localizan en una depresión estructural (graben) que afecta a una estructura mayor que es el horst Porfirio Díaz (García-Palomo et al., 2000) en su parte sur (Figura 4.20). En el graben y el horst afloran rocas metamórficas en facies de esquisto verde que son de edad Mesozoico. Las rocas metamórficas son cubiertas discordantemente por rocas piroclásticas y rocas sedimentarias del Cenozoico.

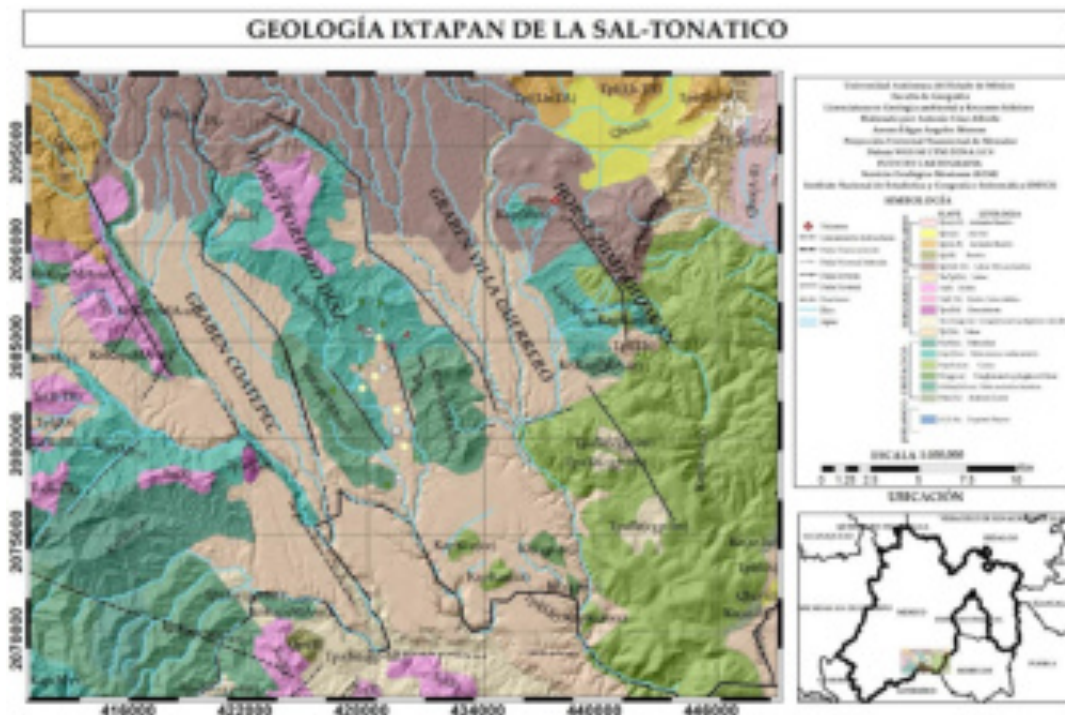


Figura 4.20 Mapa geológico compilado en este trabajo a partir de datos de campo, y datos SGM 1998, INEGI 2015 y García-Palomo et al., (2000).

En este trabajo se observaron depósitos sedimentarios y de travertino en el graben de Ixtapan de la Sal. El graben de Ixtapan de la Sal está limitado por fallas normales en su parte oriente y poniente; en su límite norte no se observa alguna falla que lo delimite, pero, parece desaparecer y en su parte sur el graben se vuelve más angosto.

En este trabajo se definieron cinco unidades geológicas en el área de estudio. Unidad metavolcánica, unidad metasedimentaria, rocas volcánicas del Cenozoico, conglomerado Tónico y travertino Ixtapa de la Sal.

➤ Unidad metavolcánica

La unidad metavolcánica aflora en la parte oriente y sur del graben de Ixtapa de la Sal. Las rocas están compuestas de metabasaltos que se presentan foliados y minerales de metamorfismo como clorita, albita y epidota. Estos metabasaltos se encuentran por debajo estructuralmente de la unidad metasedimentaria y a veces intercalados también estructuralmente. La unidad es de edad Mesozoica y pertenece al terreno tectonoestratigráfico Guerrero del sur de México.

➤ Unidad metasedimentaria

La unidad metasedimentaria aflora en la parte poniente y norte del graben de Ixtapa de la Sal. Las rocas que la constituyen son filitas con clorita y mica blanca, así como esquistos de clorita y a veces metareniscas. Esta unidad parece cabalgar a la unidad metavolcánica. La edad de esta unidad es mesozoica y también pertenece al terreno Guerrero.

➤ Rocas volcánicas del Cenozoico

Las rocas volcánicas del Cenozoico afloran en los alrededores al horst Porfirio Díaz está compuesto de depósitos de lahares y flujos piroclásticos de composiciones andesíticas. Estos depósitos volcánicos se observan encajonados en los valles de grandes barrancas. Es probable que algunos de estos depósitos volcánicos hayan sido derivados de erupciones del Nevado de Toluca lo que significaría una edad máxima de cerca 42 000 años de acuerdo a las erupciones registradas que ha tenido el volcán Nevado de Toluca (García-Palomo et al., 2000).

➤ Conglomerado Tonicico

El conglomerado Tonicico aflora en algunas partes del poniente y sur del graben de Ixtapa de la Sal. Esta unidad está compuesta de arenas, gravas y limos. Presenta un color blanco o pardo claro en afloramientos. Se observa estratificación cruzada, y laminación cruzada. En algunos lugares presenta estructura lenticular con los lentes compuestos de gravas. Los clastos que presentan las gravas y boleos son de caliza, así como de otras rocas metamórficas. El conglomerado Tonicico subyace al travertino Ixtapa de la Sal y sobreyace a las unidades metamórficas metavolcánica y metasedimentaria. La edad del conglomerado se infiere pueda ser del Cuaternario con base en su posición estratigráfica.

➤ Travertino Ixtapa de la Sal

El travertino Ixtapa de la Sal aflora dentro del graben Ixtapan y su extensión cubre parte de los municipios de Ixtapan de la Sal y Tonicico. De acuerdo a García-Palomo et al (2000) y tomando sus definiciones de estructuras, el travertino quedaría localizado dentro del Horst Porfirio Díaz. En gran parte de las poblaciones de Ixtapa de la Sal y Tonicico se puede ver el travertino, ya que se distribuye por debajo de las construcciones y la infraestructura de los poblados.

El travertino presenta una composición de aragonito y calcita principalmente pero también contiene minerales arcillosos. Presenta un color pardo oscuro a claro. Las estructuras y texturas que se reconocieron son estratificación paralela a ondulosa, laminación paralela, capas de oncoides en travertinos granulares, estructuras verticales filiformes (posible crecimiento orgánico o ebullición), textura esponjosa, y variación de textura masiva a laminada. En algunos afloramientos se pudieron observar fragmentos de antiguos restos de tallos de plantas (figura 4.21).

El travertino también presenta texturas de disolución y recristalización. Esto en parte por la afectación posterior por la acción de aguas de lluvias y escurrimientos en arroyos. En la parte norte del graben de Ixtapan se observaron a travertinos afectados por fallas y fracturas que provocan recristalización de los carbonatos del travertino.

En algunas partes del travertino también se observan texturas brechadas que puede sugerir surgencias de aguas termales a lo largo de fracturas. En comunicación personal con pobladores han mencionado que parece existir una conexión entre manantiales termales de la parte norte con las surgencias en la parte del centro de Ixtapa, si es esto cierto implicaría una conexión del agua termal del Norte al Sur a lo largo de una fractura u otro medio natural. En este trabajo se interpreta el origen del travertino de origen hidrotermal y que se depositó en una depresión fluvial-lacustre.

4.3.2 Hidrogeología

La zona de Ixtapan de la Sal y Tonicaco se localizan dentro del acuífero de Tenancingo. Estudios de la CONAGUA (2015), definen al acuífero Tenancingo de tipo libre, los paquetes volcánico-sedimentarios permiten una eficiente transmisión y recarga de agua al acuífero debido a sus propiedades de alta porosidad, las unidades hidrogeológicas principales son el basalto además de andesitas, dichas unidades tienen la capacidad de almacenar y transmitir volúmenes de agua (CONAGUA, 2015).

Las rocas calizas de la formación Morelos son una de transmisión lateral por tanto transmiten agua a otros materiales. Los materiales granulares no consolidados presentan espesores importantes, aunque estos generan horizontes saturados formando manantiales (CONAGUA, 2015).

Martínez-Florentino (2015) realizó estudios hidroquímicos a varios manantiales de aguas termales en Ixtapa de la Sal y Tonicaco, así como algunos pozos de agua subterránea. Este estudio muestra que las aguas son de tipo clorurada sódica (Cl-Na), con alto contenido de As, Li y B. Las temperaturas varían de 30°C a 40°C. Existe una interacción agua-roca y mezcla de agua meteórica con agua termal. Esta autora interpreta y sugiere que el agua termal de la zona es alimentada por el calor de fuentes ígneas a profundidad

4.3.3 Características geológico-ambientales

La red de pozos de agua son parte fundamental para el servicio de agua público de los balnearios, desde sus inicios hasta la actualidad se construyen más piscinas y se perforan pozos para alimentarlas, la problemática central es que una gran parte de estos pozos no reinyectan el agua nuevamente para seguir manteniendo la efusión de aguas termales.

A esto se le suma el crecimiento de la población del cual crea una mayor demanda de servicios, gran parte de estos servicios es el abastecimiento de agua y la construcción de viviendas, la construcción ha modificado el suelo y cubierto antiguas manantiales, algunos de los pozos ya son de orden privado por lo que se duda que tenga un correcto manejo dispuesto en la ley.

4.3.4 Características geotermales

La zona de estudio como se había mencionado se encuentra dentro de un graben que a su vez este está sobre un Horst con orientación NW-SE. Las temperaturas en las manifestaciones geotermales oscilan entre los 22.3 y 37.1°C (Cruz-González, 2017).

La presencia de fracturas y fallas en la zona sugiere que existe una permeabilidad de agua termal a lo largo de estas. Las posibles conexiones hidráulicas entre algunas surgencias apoyan estas aseveraciones. El que las fracturas corten a los travertinos y que se vean texturas de disolución por agua de lluvia o agua termal también sugiere que existe una permeabilidad a lo largo de fracturas. La presencia de graben y la presencia de diques ígneos que cortan a las rocas metamórficas en algunas partes por alrededor de Ixtapan de la Sal sugieren que la fuente de calor puede deberse a diques hipabisales emplazados en las fallas y fracturas.

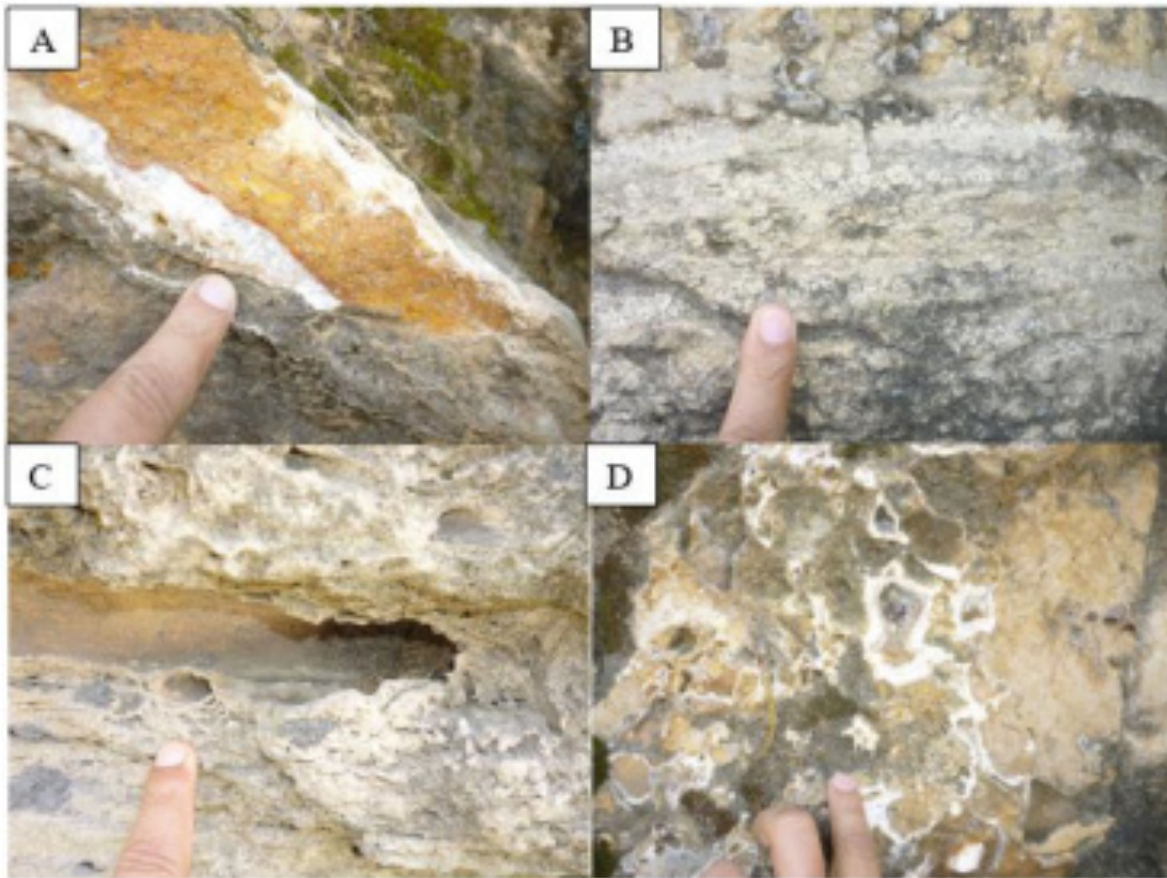


Figura 4.21 Afloramiento de la unidad Travertino Ixtapa de la Sal. A, vetas de calcita con limonitas que cortan a capas de travertino. B, capas alternadas de oncolitos y ooides con capas laminadas. C, travertino con textura tipo rudstones con presencia de fósiles de troncos y tallos de plantas. D, texturas de disolución y recristalización con calcita y aragonito.

En el área de estudio un trabajo de Morales-Arredondo et al, (2018), empleó geotermómetros para determinar las temperaturas. Las pruebas que realizaron en las aguas de Ixtapan de la Sal-Tonatico no mostraban un equilibrio con los minerales de sílice. En su trabajo explica que sus resultados, sugieren que Ixtapan-Tonatico es un sistema geotérmico de baja temperatura con un pequeño reservorio mínimo de 80°C y máximo 111°C, aunque hace énfasis que las temperaturas calculadas pueden no ser representativas debido a un proceso de mezcla.

En este trabajo se interpreta que el travertino sugiere un sistema geotermal más antiguo que el actual representado por los manantiales en los balnearios de Ixtapa y Tonicato. El sistema geotermal más antiguo implicó la presencia de aguas carbonatadas con hidróxidos de hierro; este sistema estuvo interactuando con formaciones calcáreas. La presencia de aguas

cloruradas en el actual sistema geotermal implica que parte de las surgencias vienen de mayor profundidad (Figura 4.22). En el caso del geotermalismo antiguo, carbonatado, es probable que existía una relación con rocas calizas (posiblemente de la formación Xochicalco), el agua meteórica al infiltrarse y calentarse en las profundidades, haciende por diferencia de presiones permitiendo arrastrar el carbonato de calcio de un sustrato grueso de roca caliza, cuando toda esta agua emerge deposita el travertino en la superficie desprendiendo CO₂ y gases de composición acida, lo cual evita la solubilidad del carbonato permitiendo que precipite en el anillo del margen extremo del manantial.

4.4 Las rajás

4.4.1 Geología

La zona de estudio, Las Rajas, se sitúa en la Sierra de Las Cruces. Esta sierra tiene una extensión de 110 km de largo y su ancho varía de 45 km en el Norte y 27 km en el Sur. Las Rajas es un poblado que se localiza dentro del municipio de Lerma y cercano al límite con el municipio de Huixquilucan. En longitud y dirección Este-Oeste, el área de estudio tiene una extensión que varía de 2.0 km a 3.0 km. De acuerdo al trabajo de García-Palomo et al. (2008) La parte de la Sierra de Las Cruces en donde se localiza Las Rajas, es el bloque central; esta zona se caracteriza por estar en un graben y muchos bloques escalonados y a menor escala con horts y grabenes (García-Palomo et al., 2008) así también se encuentra en la cercanía el volcán Chimalpa y volcán Salazar, así como domos volcánicos alineados N-S y NE-SW (García-Palomo et al., 2008).

En este trabajo se definieron cinco unidades geológicas con base en observaciones de geología de campo (figura 4.23): Complejo dómico Los Garambullos, volcán La Glorieta, volcanes El Guardita, unidad Huitzilapan y depósitos fluviales recientes.

➤ Volcán la Glorieta

El volcán La Glorieta se localiza en la parte sur de la población La Glorieta (figura 4.23). Este volcán está levemente erosionado y presenta derrames de lava andesítica y dacítica su estructura no presenta alteración hidrotermal. La expresión morfológica muestra una serie de lava-domes y domos que componen esta estructura volcánica. En algunas partes en los alrededores se observaron depósitos de ceniza.

Volcán Rajas (P-Vr)

El volcán Rajas es una estructura volcánica definida con base a su expresión morfológica y sus depósitos volcánicos. El volcán se encuentra entre las estructuras volcánicas del Complejo de domos Los Garambullos y el volcán La Glorieta (figura 4.23). Este volcán está formado por depósitos piroclásticos andesítico-basálticos. En algunos afloramientos se observaron depósitos de caída de escoria volcánica.

➤ Unidad Huitzilapan

La unidad Huitzilapan se localiza en la parte norte de la población Las Rajas (figuras 4.23 y 4.24). Los mejores afloramientos se localizan por detrás de la iglesia de Las Rajas. Esta unidad está formada de rocas andesíticas y dacíticas afectadas por hidrotermalismo en su parte Sur. En algunas partes presenta depósitos de ceniza volcánica que están alterados y presenta limonitas que indican lixiviación de minerales. Algunos minerales de alteración hidrotermal que se identificaron son illitas y esmectitas que componen a con una alteración argílica y en algunos afloramientos se observaron las texturas de lisigan.



Figura 4.23 Afloramiento de la unidad Huitzilapan, vista de minerales de illitas y esmectitas cortados por vetillas y con textura de Lisigan

➤ Depósitos de ceniza Huitzilapan

Los depósitos de ceniza Huitzilapan se ubican rodeando al poblado de Huitzilapan (figura 4.23). Estos depósitos están compuestos de cenizas volcánicas y otros depósitos piroclásticos de composición andesítica. Los depósitos cubren a derrames lávicos andesítico-dacíticos de los volcanes que le rodean. Estos depósitos no presentan una alteración importante, la erosión y degradación de los depósitos muestra efectos en el relieve, pero no se estudiaron a detalle debido a los pocos afloramientos accesibles.

Volcanes El Guardita (Vgta)

Los volcanes El Guardita se ubican a 1.5 km al norte del poblado Las Rajas (figura 4.23). Las rocas de estos volcanes son andesitas y dacitas. Los volcanes son una serie de domos volcánicos alineados NE-SW a E-W.

➤ Depósitos fluvio lacustres recientes

Entre los municipios de Lerma y Huixquilucan cruzan varios ríos, la mayoría son intermitentes y algunos forman pequeños cuerpos de agua debido a la poca permeabilidad, la topografía delimita algunos de estos antiguos cuerpos, los depósitos son arenas, gravas y limos de origen fluvio lacustres. Estos depósitos se ubican en las depresiones de los valles fluviales (figura 4.23).

➤ Alteración hidrotermal Las Rajas

La región de alteración hidrotermal que abarca de Las Rajas a Huitzilapan tiene una longitud de cerca 3 km en dirección Este-Oeste. La alteración hidrotermal afectó a rocas del complejo dómico Los Garambullos y a la unidad Huitzilapan. Las alteraciones hidrotermales que se observaron son arcillas blancas y de color crema que se infiere puedan ser esmectitas e illitas, así también aparecen varias limonitas como jarosita y goethita. En otras partes se presenta hematita. Se observaron vetillas de cuarzo hidrotermal con pirita y jarosita (figura 4.24). Las alteraciones hidrotermales están controladas por fallas y fracturas; en las fallas se observaron estrías de fallas que tienen un pitch de 90° y otras de 60° que sugiere un fallamiento normal y también la presencia de fallas oblicuas. Las orientaciones de las fracturas varían de N-S, E-W a NE-SW. La edad de estas alteraciones hidrotermales quedaría limitada posterior a las rocas andesíticas-dacíticas de los domos volcánicos Los Garambullos y anterior al volcán Las Rajas (cono cinerítico); esto sugiere una edad entre cerca de 3 Ma a 800 000 años de acuerdo a edades de la Sierra de Las Cruces (García-Palomo et al., 2008) y conos cineríticos de la Sierra de Chichinautzin que se presentan encima de las rocas más antiguas de la Sierra de Las Cruces.



Figura 4.24 Afloramiento de dacita con alteración de hematita y jarosita en una fractura.

4.4.2 Hidrogeología

La zona de estudio se encuentra en una zona de recarga desde el punto de vista de acuíferos en los valles de Toluca y Ciudad de México. Las rocas en la zona de recarga son rocas extrusivas tipo andesitas y dacitas además de los depósitos de piroclastos de acuerdo a lo descrito en anteriores apartados. Las propiedades geológicas de los paquetes volcánicos como contactos litológicos y fallas geológicas permiten una infiltración y recargar de agua a los acuíferos. La sierra de las cruces es una estructura que delimita dos valles por tanto puede aportar agua a los dos acuíferos. De acuerdo a CONAGUA (2015) aunque la sierra es mayormente volcánica, debido a su composición variada se les considera como una barrera o frontera de flujo de agua subterránea con permeabilidades bajas (CONAGUA, 2015).

Datos de níveles estáticos o piezométricos de la zona no se presentan en la zona, la razón es porque todos los pozos o la mayoría de ellos se encuentran la zona lacustre cercana a la sierra, en dicha zona se encuentra la batería de pozos del sistema Lerma instalada por Departamento del Distrito Federal (DDF hoy Departamento de Aguas de la Ciudad de México).

4.4.3 Características geológico-ambientales

➤ Deterioro de las zonas de recarga de los acuíferos

El poblado de las Rajas se sitúa en una zona forestal y muchos arroyos conectan a ríos principales y los pobladores aprovechan los caudales para sus actividades domésticas, los ríos y manantiales que una vez se llegaron a observar por la zona han ido desapareciendo debido a la extracción de agua por la batería de pozos del sistema Lerma y en la zona la deforestación, así como asentamiento de poblaciones del lado del Valle de Toluca y del lado de la Ciudad de México.

En el área se observó que existe modificación del suelo para cultivos y casas, gran parte de la zona se ha modificado para abrir espacios para diferentes actividades de lo cual la tala permite que el suelo se erosione y que la infiltración disminuya en algunas partes de la región ocasionando posibles derrumbes o desprendimientos.

4.4.4 Características geotermiales

Los afloramientos contienen minerales propios de una alteración hidrotermal, los minerales observables son arcillas blancas y cremas (esmectitas, illitas y caolinitas), limonitas (jarosita y goethita) y óxidos de hierro (hematita) (Figuras 4.24, 4.25 y 4.28). La intensidad de la alteración de la zona de estudio cambia conforme uno avanza de Este a Oeste y de Norte a Sur la alteración contiene otras fases de minerales como pirolusita y manganita.



Figura 4.26 Afloramiento de minerales de alteración. Se observan diferentes minerales, los colores blancos pertenecen a caolinitas, esmectitas e illitas. Los colores rojos son debido a la presencia de jarosita y hematitas y los tonos naranjas son del mineral supergénico goethita. Se observan vetas de silicificación de la roca.

En otros afloramientos las alteraciones observadas en campo muestran vetillas de arcillas y de azufre nativo con jarosita derivada de pirita. En algunas partes alrededor de las vetillas se observa pirita y jarosita diseminada fina y con silificación.

Se infiere que las fallas de la región puedan tener una estrecha relación con la alteración de la zona debido a que las fallas presentes en el lugar muestran un aprovechamiento como canal de depósito en el flujo hidrotermal (figura 4.26).



Figura. 4.27 Falla que presenta alteración hidrotermal con azufre nativo. (Altura de la persona 1.75m)

En algunos afloramientos se observaron diques andesíticos emplazados en antiguas fracturas y se observa a fracturas con alteración hidrotermal y presencia de jarosita y de azufre nativo. En algunas fracturas aparecen minerales arcillosos de color blanco. Entre la población de Las Rajas y La Glorieta se observó un afloramiento de capas de depósitos piroclásticos de caída con pómez y escoria andesítica que cubren a las zonas de alteración hidrotermal (figura 4.28); estos depósitos de pómez y escoria volcánica pertenecen al Volcán Las Rajas (cono cinerítico).



Figura 4.28 Corte en el que se muestra un contacto entre las capas de ceniza-pómez (capa delgada oscura y capa café claro con laminación) y la alteración hidrotermal subyacente (color café claro).

En el corte de carretera se observa un derrame de lava con alteración, en su estructura se conservan vetillas de color crema con presencia de minerales de jarosita, goethita y caolinita. Algunas de estas alteraciones observadas difieren en su estructura, algunas muestran entrelazamiento (Stockwork) otras vetillas de forma paralela y en algunos casos llegan a cruzar de forma perpendicular además de texturas de Lisigan (figura 4.29).

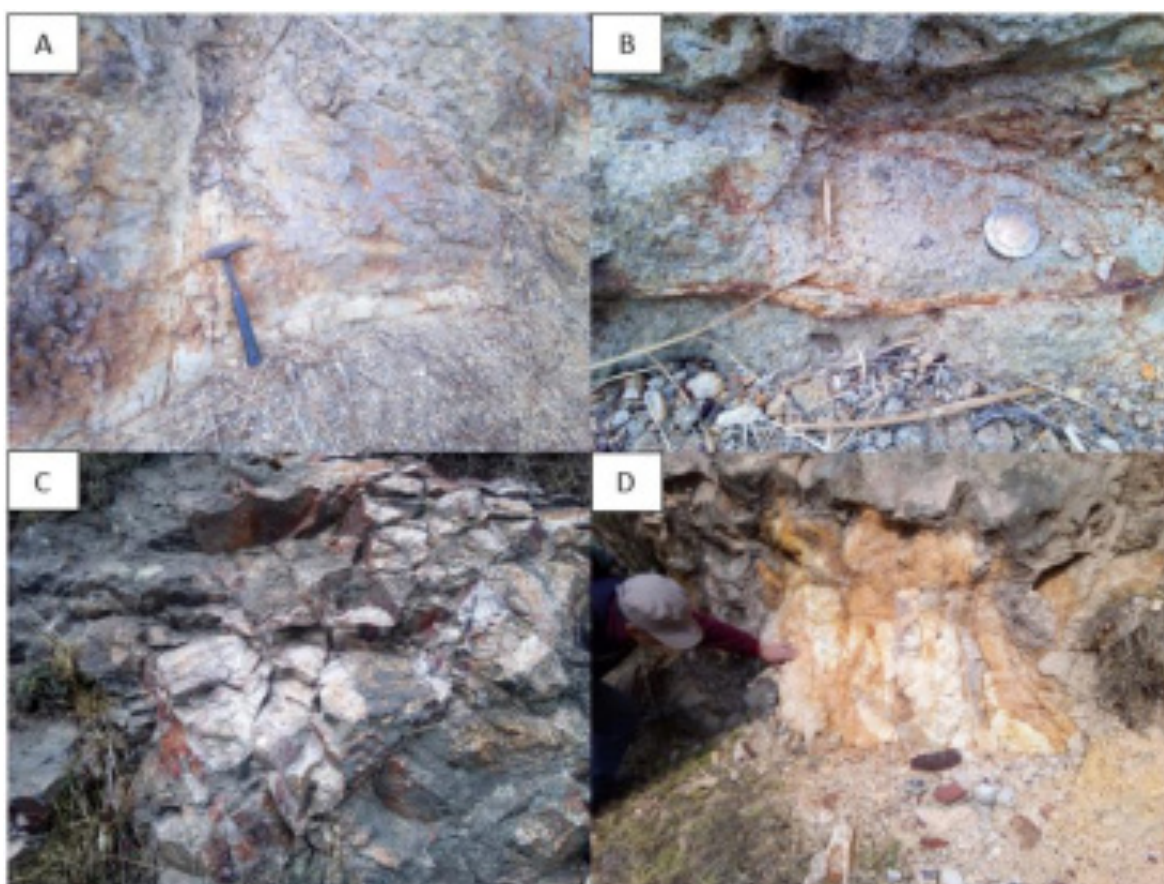


Figura 4.29 Muestra de diferentes afloramientos de la alteración hidrotermal Las Rajas. (A) Vista de un corte con vetas de arcilla de color blanco, jarosita color rojo y goethita color café. (B) Roca dacita cortada por vetillas de arcilla con jarosita en paralelo. (C) Afloramiento con fracturas rellenas de arcilla y hematita. (D) Vista de un corte, se detecta limonitas indígenas y exóticas ambas supergénicas, presenta una textura de Lisigan.

Capítulo 5. Discusión: Problemas geológico-ambientales alrededor de las manifestaciones geotermales

5.1 El Borbollón

❖ Mezcla aguas negras con aguas termales

El balneario contiene dos surgencias geotermales una de ellas se encuentra sobre el cauce del río Lerma y la otra se encuentra en la alberca principal del balneario. La surgencia que se encuentra en el curso del canal del río Lerma presenta evidencia directa de contacto de aguas negras con agua termal. Esto es demostrado por la presencia de coliformes totales y fecales, y que fue mostrado por el laboratorio de calidad del agua del CIRA en el año 2010. El río Lerma cruza varios poblados y algunas de sus industrias se asientan a las orillas del río vertiendo sus desechos por lo que la fuente está contaminada. Es probable que la mezcla de aguas este reflejada en el valor de $\text{pH} = 7.0$ ya que es una agua alcalina y no ácida. Las aguas negras pueden tener valores alcalinos. La otra surgencia también muestra un color turbio y es probable que también esté contaminada al igual que la surgencia sobre un canal del río Lerma.

Los ejidatarios han buscado la manera de proteger las surgencias verticales de aguas termales construyendo un cuarto con tabique y cemento para proteger del agua negra que circula por el canal sin embargo se desconoce hasta que profundidad puede estar la mezcla de aguas y es probable que la surgencia esté contralada por fracturas en el subsuelo y que esto origine también que haya una conexión hidráulica del acuífero libre con un acuífero más profundo.

Al ser un centro recreativo y de esparcimiento, el balneario el Borbollón aprovecha las aguas de la fuente geotermal una solución para poder usar las aguas termales sin riesgos a la salud podría ser la construcción de una planta de tratamiento de aguas y tratar el agua que se usa para las albercas, aunque la temperatura del agua podría ocasionar dificultades para el proyecto, pero podría ser una solución.

La composición de las aguas del balneario, por sus datos arrojan que las aguas son de composición clorurada sódica (Cl-Na). La presencia de Sodio y Cloro evidencian la componente de agua termal (Cruz-González, 2017).

❖ La presencia del balneario y el turismo

El balneario se ubica en el poblado de San Miguel Ixtapa perteneciente al municipio de Temascalcingo, esta zona de recreación cuenta con amplios lugares para acampar, piscinas, sala de temascal, asadores y cabañas. El lugar es principalmente recreativo y la época en la que tiene más gente es en semana santa, en el resto del año los visitantes son principalmente turistas provenientes de otros municipios o estados. Dada la importancia económica local es necesario que se busque una solución a esta problemática de la mezcla de aguas del río Lerma con las aguas termales.

La administración del balneario es llevada a cabo por todos los pobladores, el balneario se encuentra en una zona ejidal en el que todos los pobladores tienen derecho y responsabilidad de trabajar en el balneario.

❖ Fallas activas, sismicidad y temporalidad de la manifestación geotermal

Se sabe que los sismos llegan a modificar ciertas características geológicas, hidrológicas y morfológicas de la zona donde ocurre dicho evento. En la región existen fallas activas que van acompañadas de sismos (Sunye-Puchol et al., 2015) y esta actividad de las fallas puede hacer que las manifestaciones geotermales lleguen a desaparecer, emerger o cambiar en sus propiedades físicas o químicas (Hernández, 2018). Algunos ejemplos de la actividad de fallas son los movimientos que ocurrieron del sismo de 1912 (Urbina y Camacho, 1912) que modificaron condiciones del terreno. Un caso de relación de un terremoto con modificación de la posición de manantiales y la modificación de condiciones del agua en el suelo fue el terremoto del 17 de septiembre de 2017 cuyos efectos fueron en Tenango y Tenancingo en

donde se reportaron cambios en las coloraciones de agua (comunicación personal de habitantes en pueblos de Tenancingo).

En el Graben de Acambay existen evidencias documentadas de manantiales que desaparecieron por eventos sísmicos, por ejemplo, dos fuentes termales en el poblado de Acambay desaparecieron por el sismo de 1912 y un manantial localizado a 1.5 km al Norte de Acambay disminuyó su temperatura de 28°C a 24°C después del sismo (Rodríguez-Pascua et al., 2017).

Estos registros históricos de eventos sísmicos, así como la desaparición de algunos efluentes termales, indican que la actividad del graben y las fuerzas geológicas de la región pueden ocasionar cambios a futuro sobre la manifestación geotérmica del Borbollón. Debido a que El Borbollón está en un contexto de fallas geológicas activas estas pueden ocasionar que las aguas termales cambien su temperatura o migren a otra zona, en donde las características de permeabilidad, recarga hidrológica, fuente de calor, litología y estructuras sean favorables. También en un contexto de fallas las aguas termales se pueden extinguir lentamente.

El Borbollón está rodeado de fallas geológicas y existen registros de actividad sísmica. Un evento fue en 1912 ($M_w = 6.9$) y otro, el segundo, ocurrió en 1979 ($M_w = 5.3$), estos son los únicos eventos sísmicos recientes de los cuales el primero ocasiono 161 fallecimientos y extensos daños en de Acambay y pueblos vecinos (Urbina & Camacho, 1913; Singh et al., 1984; Langridge et al., 2013). La presencia de fracturas y fallas y el lineamiento de Perales-Amealco propuesto por Suter et al. (1995) sugieren que en el subsuelo en donde se encuentra El Borbollón puede haber una permeabilidad secundaria en acuíferos y que hay fracturas profundas que sirven como conductores hidráulicos para el agua subterránea.

5.2 San Pedro de los Baños

❖ Sistema hidrotermal de larga vida

La presencia de agua termal caliente todavía presente en algunos pozos de la región como la zona industrial de Pastejé (INEGI, 2001) y en algunas casas del poblado de San Pedro de Los Baños según versiones de pobladores, implica o sugiere un abatimiento del nivel freático que ha sido comprobado por estudios de CONAGUA (2015). Los resultados geológicos y de rocas de alteración hidrotermal de este trabajo evidencian una actividad hidrotermal anterior

y que fue controlada por fracturas y fallas geológicas con orientación NW-SE (De Jesús-García, 2018), ya que se presenta basculada y fracturadas las rocas en la Iglesia La Concepción. Estas evidencias hacen suponer un sistema hidrotermal antiguo en San Pedro de Los Baños de por lo menos cerca de los 10,000 años de acuerdo a las correlaciones con depósitos piroclásticos que cubren unidades afectadas por hidrotermalismo y que los depósitos piroclásticos son probablemente de las erupciones del Volcán Jocotitlán.

❖ Extinción del agua termal

La desaparición, de las fuentes termales pueden desaparecer por múltiples eventos, sean por acción geológica-hidroológica o de forma antrópica. En el caso del antiguo Balneario de San Pedro de los Baños, su extinción se debió principalmente a la construcción de obras hidráulicas en zonas industriales como la zona de Pasteje y la incorporación al Sistema de Cutzamala para abastecer de agua a la Ciudad de México (CONAGUA, 2015). Esta región además ha estado en constantes pugnas por el agua desde tiempos históricos que acarrea conflictos sociales (Secundino-Estanislao, 2017).

Como ya se describió en el capítulo anterior, del antiguo balneario emergían aguas de muy baja entalpia alrededor de los 40°C, sus aguas brotaban entre las rocas volcánicas muy cerca de un cuerpo lacustre, tiempo después con la construcción de un pozo a unos 50 metros de la fuente de agua, se extrajo agua para abastecer a las comunidades, a partir de la década de los 50's se siguieron construyendo más pozos para extraer el agua cerca de los efluentes con el fin de abastecer una parte a las comunidades y el resto llevarla a la ciudad de México.

La extracción del agua en el valle de Ixtlahuaca y parte del valle de Toluca han causado que los niveles piezométricos descendan y formen agrietamientos y subsidencias en el terreno, estos efectos fueron descritos y estudiados por una consultoría en 1996 (CONAGUA, 2015), el trabajo que realizo fue para estudiar la hidrodinámica y el diseño óptimo de las redes de observación del Acuífero.

❖ Conflictos por el agua en los alrededores

En el poblado de San Pedro de los Baños, las aguas de las pequeñas lagunas, ríos y pozos de agua sirven para abastecer a los pobladores, así como a sus cultivos de riego.

Los conflictos sociales por el abastecimiento de agua a diferentes pueblos y comunidades, algunos de estos conflictos se habían desarrollado desde la época de la colonia, esto a causa del conflicto por los propietarios de dos haciendas (Haciendas Villejé y Pastejé) (Secundino-Estanislao, 2017) cada hacienda busco obtener los derechos de todas las aguas del valle para sus cultivos y propio uso.

❖ ¿Existe agua termal todavía en San Pedro de Los Baños?

Se sabe que algunos pozos fueron construidos en Ixtlahuaca y aún mantienen aguas de baja entalpia, como el pozo en la zona industrial de Pastejé que mantuvo una temperatura de 37°C (INEGI, 2001) aunque la extracción de sus aguas somete a un posible problema de deshidratación del acuífero lo que nuevamente ocasionaría la perdida de otra manifestación termal o posiblemente geotérmica desde se aprovechó su agua.

Actualmente los conflictos por el agua han cesado pero los pobladores señalan que algunas casas tienen sus propios pozos, en la comunidad de Atotonilco muy cerca del poblado de San Pedro de los Baños, cuentan con agua caliente que emana de manera natural (se desconoce su temperatura).

5.3 Las Rajas

❖ Estructuras volcánicas, fallas y su relación con las manifestaciones geotermales

Las Rajas es una manifestación hidrotermal de acuerdo a los resultados de este trabajo y se encuentra en la Sierra de las Cruces, su desarrollo estuvo ligado con la presencia de domos volcánicos andesítico-dacíticos y fracturamiento. En los alrededores se infiere que las fallas tuvieron varios períodos de actividad porque se observaron varias orientaciones en las fracturas y esta actividad estuvo acompañada por la evolución de edificios volcánicos con derrames de lava y productos piroclásticos. La sierra de las Cruces presenta ocho grandes estructuras volcánicas, de sur a norte y son: Zempoala, La Corona, San Miguel, Salazar, Chimalpa, Iturbide, La Bufa y La Catedral (García-Palomo et al., 2008). Estas estructuras

son de tipo estratovolcán y la zona de estudio se encuentra regionalmente entre dos estructuras, los volcanes Chimalpa y Salazar.

Se infiere que la actividad hidrotermal en Las Rajas pudo estar cercana a los 3 Ma de acuerdo a los fechamientos existentes en la Sierra de Las Cruces y que se observó en campo que las alteraciones como argilización con limonitas y silicificación afectaron a rocas volcánicas andesíticas y dacíticas porfídicas de domos volcánicos de la Sierra de Las Cruces. La actividad volcánica de la sierra se ha fechado por diferentes autores, las edades que arroja fueron de 3.71 ± 0.40 Ma y 0.39 ± 0.16 Ma. (Mooser et al., 1974; Mora-Álvarez et al., 1991; Osete et al., 2000; Aguirre- Díaz, 2006; García-Palomo et al., 2008).

❖ La población que vive sobre rocas alteradas

Las alteraciones mineralógicas en el poblado de las Rajas muestran un grado susceptibilidad al construir sobre materiales poco consolidados en estado de erosión y degradación por acción geológica e hídrica, gran parte de los materiales que se encuentran aquí son de tipo volcánico pero han sufrido una alteración hidrotermal en su mineralogía, esto causa que las alteraciones en su última etapa formen arcillas, que desde el punto de vista geológico-ambiental, son inestables para la construcción de casi todo tipo de obras arquitectónicas.

Los daños que pueden generar al construir sobre este tipo de materiales son los agrietamientos y fracturas en las viviendas, así como subsidencias en las obras de carretera, cabe mencionar que los daños se generan al existir una sobre carga de agua en sus poros se expande posteriormente se compactan las arcillas al secarse.

Por último, el poblado se encuentra entre diferentes cuerpos volcánicos, así como los materiales de alteración, estos últimos materiales su grado de consolidación es baja debido a que son arcillas de grado muy fino y pueden dar origen a desprendimientos en los cortes de talud sobre la carretera.

5.4 Ixtapan de la Sal – Tonicico

❖ Contaminación

Los balnearios de Ixtapan de la Sal, así como Tonicico, utilizan una gran cantidad de aguas termales en parte del acuífero Tenancingo (CONAGUA, 2015) ya sea de los manantiales o pozos de agua subterránea, para la creación de centros recreativos y complejos turísticos. Debido a la presencia de aguas termales ha crecido turísticamente las poblaciones de Ixtapa y Tonicico propiciando la construcción de hoteles, posadas además del aumento de la mancha urbanística causando que disminuya la cobertura vegetal, el problema más grande es, con el aumento de la población junto con la demanda de servicios todos los desechos que se generan contaminan los acuíferos ya que existe una gran cantidad de hogares que no cuentan con el servicio de drenaje, por lo tanto las fosas sépticas son puntos de contaminación para las aguas termales.

El estudio de Martínez-Florentino (2015), señala que las aguas no termales y termales presentan una posible mezcla debido a que sus datos arrojan para los valores de As, Na, Cl, SO₄ y NO₃ por encima de los límites permisibles. Este estudio tomo como referencia la NOM-127-SSA1-1994 y determinó que la presencia de nitratos en dichas aguas puede ser por el vertido de aguas residuales propias de las fosas sépticas.

❖ Sobre explotación del acuífero

Un problema existente en la zona de estudio es la demanda de agua, con el crecimiento urbano de forma desordenada forma varios problemas, entre los que están son: la sobreexplotación de acuíferos, la eliminación de la cubierta vegetal en las posibles zonas de recarga además de la construcción de hogares sin estar conectados al sistema de drenaje público.

Estudios de la CONAGUA (2015), señalan que ya hay disponibilidad para más concesiones de agua a nivel regional del valle mas no señala el volumen disponible o no para las zonas con extracción hídrica para usos recreativos o turísticos, a pesar de ello no señala el control en la extracción de las aguas termales del orden público o privado para los municipios de la zona de estudio.

❖ Características de los sistemas termales

Los municipios de Ixtapan de la sal y Tonalico tienen múltiples puntos donde emana agua termal, sus características de acuerdo a los estudios de la CONAGUA (2018) muestran que la zona de recarga proviene posiblemente del Nevado de Toluca y que su control estructural se debe a que se sitúa la mayoría de las fuentes termales en el horst de Porfirio Díaz, en dicha estructura se encuentran dos fallas identificadas por García-Palomo et al (2000), estas fallas por el relieve y la estructura forman una micro fosa tectónica.

Los datos geológicos acerca del travertino Ixtapa de La Sal (nombrado en este trabajo) que fueron descritos, muestran que el travertino fue originado en un sistema hidrotermal anterior al actual sistema hidrotermal de los balnearios de hoy día. La distribución de los afloramientos del travertino y su asociación con sedimentos de gravas, arenas y limos lacustres y fluviales sugieren un ambiente lacustre y fluvial con emanaciones hidrotermales a lo largo de fracturas y fallas geológicas. El travertino presenta características texturales y de estructuras hidrotermales que evidencian una saturación en carbonatos y que sugiere una fuente profunda de contacto de aguas termales con rocas calizas a profundidad, que pudieran ser rocas metasedimentarias calcáreas del terreno tectonoestratigráfico Guerrero o calizas de la Formación Morelos. Estas aguas carbonatadas fueron transportadas a través de las fallas y fracturas del micro graben de Ixtapa depositándose en el interior y márgenes de salida carbonatos de los efluentes termales.

Por ultimo queda a discusión si la fuente que aporta el calor es un plutón u otro tipo de roca ígnea intrusiva e incluso subvolcánica que por decaimiento radioactivo aporta el calor a la capa de roca permeable a profundidad y al acuífero profundo, para ello es necesario un estudio de geoquímica isotópica de las aguas que pueden ser isotopos de sílice así como complementar con estudios de geofísica, ya que no se descarta que la fuente pudiera ser geotérmica debido a la gran cantidad de balnearios y manifestaciones en la región.

CONCLUSIONES

La zona de San Pedro de los Baños está constituida de depósitos piroclásticos, ceniza volcánica y depósitos fluvio-lacustres, algunos depósitos son del volcán Jocotitlán, además de derrames de lava sepultados por capas de sedimentos fluviales y lacustres en donde estos formaron una capa sello para el acuífero permitiendo que el calor pueda escapar a través de la falla San Pedro. Las alteraciones hidrotermales reconocidas son silificación y argilización, estas alteraciones definen a la unidad el Pedregal. Es probable que la fuente de calor hayan sido diques ígneos, ya que es muy puntual alteración.

El Borbollón ha sido una manifestación geotermal de larga actividad y se encuentra en una zona de relevo estructural con fallas normales dentro del graben de Acambay, la zona en la que se localiza es de actividad volcánica no antigua. La actividad geotérmica ha migrado debido a la actividad del sistema de fallas de Acambay-Tixmadeje y Venta de Bravo-Pastores, las evidencias mineralógicas de ópalo, calcedonia y pirita diseminada indican que su formación pudo estar sujeta a las temperaturas del sistema geotérmico de mediana entalpia, por otra parte, al tener dos surgencias verticales y estar conectadas con el acuífero estarían sujetas a contaminar los mantos acuíferos posiblemente por aguas del río Lerma.

La actividad geotérmica de baja entalpia en los poblados de Ixtapan de la Sal-Tonatico están controlados estructuralmente por las fallas normales del graben Ixtapan que las partes altas volcánicas al Norte. La presencia de depósitos de travertinos sugiere una manifestación hidrotermal que ha ubicado por largo tiempo en el mismo lugar. La surgencia vertical es controlada por fracturas y fallas profundas y es probablemente que los fluidos interactúen con la roca caliza o metacaliza. La fuente de aporte de calor podría ser un cuerpo ígneo que por el decaimiento radioactivo aporte el calor suficiente generando procesos de metasomatismo en el sustrato. La contaminación antropogénica ocurre constantemente y la mezcla de agua pluvial y agua de más profundidad se está dando en la zona.

En el poblado de Las Rajas se reconocieron zonas antiguas con alteración hidrotermales relacionadas a domos volcánicos dacítico-andesíticos. Las alteraciones reconocidas son silificación argilización y limonitas, asociadas con vetillas de cuarzo. Estas alteraciones hidrotermales fueron controladas por fracturas y fallas. Los domos volcánicos es probable que se hayan formado en algún periodo eruptivo de la Sierra de las Cruces.

REFERENCIAS

- Aguilar Dumas, A. (Julio-Diciembre de 2009). Áreas para exploración en los alrededores del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Revista Mexicana de Geoenergía*, 22(2), 2-9.
- Aguilar Dumas, Á. (2009). Áreas para exploración en los alrededores del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Revista Mexicana de Geoenergía*, 22(2), 2-9.
- Aguirre-Díaz. (1996). Volcanic stratigraphy of the amecalco caldera and vicinity, central mexican volcanic belt. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 10-51.
- Aguirre-Díaz, G., López-Martínez, M., & Rendón-Marquéz, G. (2006). La caldeera de La Catedral, Sierra de Las Cruces, una caldera al norponiente de la Ciudad de México (resumen). *Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana* (pág. 215). Puerto Vallarta, Jal: Geos.
- Aguirre-Díaz, G., Pedrazzi, D., Lacan, P., Roldan-Quintana, J., Ortuño, M., Zuñiga, R., & Laurence, A. (2015). Quaternary volcanism in the Acambay Graben, mexican volcanic belt: the possible danger volcanic center México. *UGA*.
- Aguirre-Díaz, G., Urrutia-Fucugauchi, J., Soler-Arechalde, A., & McDowell, F. (1999). Stratigraphy, K-Ar ages, and magnetostratigraphy of the Acambay graben, central Mexican Volcanic Belt. *Geological Society of America*, 1-12.
- Aguirre-Díaz, G., Zúñiga-Davila Madrid, F., Pacheco-Alvarado, F., Guzman-Speziale, M., & Nieto-Obregon, J. (2000). El graben de Querétaro, Querétaro, México. Observaciones de fallamiento activo. *Geos*, 2-7.

- Alaniz-Álvarez, S., & Nieto-Samaniego, A. (2002). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcanica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*.
- Arce, J., Macías, J., & Vázquez-Selem, L. (2003). The 10.5 ka Plinian eruption of Nevado de Toluca volcano, Mexico: Stratigraphy and hazard implications. *Bulletin Geological Society of America*, 230-248.
- Arellano Gómez, V. M., Iglesias Rodríguez, E., & García Gutiérrez, A. (2008). La energía geotérmica: una opción tecnológica. *Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas*, 102-114.
- Arzate, J., Lacan, P., Corbo-Camargo, F., Arango-Galván, C., Felix-Maldonado, R., Pacheco, J., & León-Loya, R. (2018). Crustal structure of the eastern Acambay graben, Central Mexico, from integrated geophysical data. *REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS GEOLÓGICAS*, 228-239.
- Barragán R., R. M., Arellano G., V. M., Aragón A., A., Martínez E., J. I., Mendoza C., A., & Reyes, L. (Julio-Diciembre de 2012). Variación isotópica ($\delta^{18}O$, δD) de fluidos del campo geotérmico de Los Azufres (1987-2010): Identificación de procesos de yacimiento. *Revista mexicana de geoenergía*, 25(2), 28-34.
- Beasley, C., Bertrand Du Castel, T. Z., Keita Yoshioka, R. L., Long, A., Juch Lutz, S., Riedel, K., . . . Sood, S. (2010). Aprovechamiento del calor de la tierra. *Oilfield Review*, 21(4), 4-13.
- Bertani, R. (2015). Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, (págs. 7-9). Melbourne, Australia.
- Bird, P. (2003). An updated digital model of plate boundaries, . *Geochem, Geophys, Geosyst.*
- Birkle, P., Merkel, B., Portugal, E., & Torres Alvarado, I. S. (2001). The origin of reservoir fluids in the geothermal field of Los Azufres, Mexico — isotopical and hydrological indications. *Applied Geochemistry*, 1595–1610.

- Cabrera-Román, J., Castro-Segura, J., Valdez-Moreno, G., & Arce-Saldaña, J. L. (2019). Complejo volcánico Ñadó, norte del graben de Acambay: evidencias de magmatismo oligocénico y su relación con el sector central del Cinturón Volcánico Transmexicano. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 76-94.
- Campa, M., Campos, M., Flores, R., & Oviedo, R. (1974). La secuencia mesozoica volcánico sedimentaria metamorfizada. *Boletín Sociedad Geológica Mexicana*, 7-28.
- Carrasco-Nuñez, G., López-Martínez, M., Hernández, J., & Vargas, V. (2017). Subsurface stratigraphy and its correlation with the surficial geology at Los Humeros geothermal field, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Elsevier; Geothermics*, 67, 1-17.
- Carrillo Martínez, M. (16 de January de 1998). Normal faulting in the Pathé geothermal area, Central México. *Geofísica Internacional*, 37(2), 103-111 .
- Cathelineau, Nieva Gomez, D., & Oliver Hernández, R. (1987). Geochemistry of volcanic series of Los Azufres geothermal field (México). *Geofísica Internacional*, 273-290.
- CIRA-UAEMEX. (2010). *Análisis CIRAAS303010207*. Toluca. Méx: Centro interamericano de recursos del agua.
- Compton, R. (1985). *Geology in the field*. New York: Wiley.
- CONAGUA. (2012). *Estadísticas del Agua en México*. México. D.F.: Subdirección General de Planeación.
- CONAGUA. (2015). *Actualización de la disponibilidad de media anual de agua en el acuífero Valle de Amealco (1501), Estado de Querétaro*. D. F. México: Subgerencia de evaluación de y Ordenamiento de Acuíferos.
- CONAGUA. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco (1502), Estado de México: Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos*.

- CONAGUA. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Polotitlán. Estado de México*. D. F. México: Subgerencia de evaluación y ordenamiento de acuíferos .
- CONAGUA. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Tenancingo. Estado de México*. México. D. F.: Subgerencia de evaluación y ordenamiento de acuíferos.
- Cruz-González, A. (Junio de 2017). Tesis-Composición química de las aguas termales en el estado de México: Implicaciones para sus usos. Toluca: UAEMEX.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (3 de 12 de 2017). *International Geothermal Association: What is Geothermal Energy*. Obtenido de https://www.geothermal-energy.org/print/que_es_la_energia_geotermica.html
- Dobson, P. (1984). Volcanic stratigraphy and geochemistry of the Los Azufres:. *Tesis de maestría en ciencias* . Stanford, California.
- Ferrari, L., Orozco Esquivel , M. T., Manea, V., & Manea, M. (2011). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction Zone. *Tectonophysics, Invented Review Paper*. doi:10.1016/j.tecto.2011.09.018, in press.
- Ferrari, Luca. (s.f.). Tectónica y vulcanismo en el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano. *Centro de Geociencias e Instituto de Geología de la UNAM*.
- Ferriz, H. (1982). Geological preliminary reservoir data on the Los Humeros Geothermal system, Puebla, México. *Proceedings, Eight Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Standford Uneversity*, 19-24.
- Ferriz, H., & Mahood, G. A. (1984). Eruptions rates and compositional trends at Los Humeros Volcanic center, Puebla, México. *J. Geophys, Res.*, 8511-8524.
- García Gutiérrez, A., Barragán, R. M., & Arellano Gómez, V. M. (5 de Agosto de 2009). *Situación y prospectiva de la energía geotermoeléctrica*. D.F., México.

- García-Palomo, A., Macías, J., & Garduño, V. (2000). Miocene to Recent structural evolution of the Nevado de Toluca volcano region, Central Mexico. *Tectonophysics*, 281-302.
- García-Palomo, A., Zamorano, J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R., & Macías, J. (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 158-178.
- García, J., Llanos, H., Franco, R., & Martel, R. (2017). Estimación de la vulnerabilidad del acuífero del Valle de Toluca mediante la combinación de un método paramétrico y el transporte advectivo. *Boletín Geológico y Minero.*, 30-33.
- Glassley, W. (2014). *Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environmental Impacts*. (A. Ghassemi, Ed.) CRC Press.
- Gómez Tuena, A., Orozco Esquivel, M. T., & Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la sociedad geológica mexicana*, 227-283.
- González Partida, E. (2000). Evidencias de evolución de un fluido básico a ácido a partir del análisis de la alteración hidrotermal del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 17(1), 76-82.
- González Partida, E., Barragán R., R. M., & Nieva G., D. (1993). Análisis geoquímico-isotópico de las especies carbónicas del fluido geotérmico de los Humeros, Puebla, México. *Geofísica Internacional* , 299-309.
- González Ruiz, L. E., Gonzalez Partida, E., Garduño Monroy, V. H., Martínez, L., Pironon, J., Díaz Carreno, E. H., . . . Romero Rojas, M. C. (2015). Distribución de anomalías geotérmicas en México: Una guía útil en la prospección geotérmica. *Revista Internacion de Investigación e Innovación Tecnológica.*, 31. Obtenido de www.riiit.com.mx
- Gutierrez-Negrin, L. C. (2007). 1997-2006: A Decade of Geothermal. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, 167-171.
- Gutiérrez-Negrín, L. C., & Quijano-León, J. L. (2005). Update of Geothermics in Mexico . *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, (págs. 1-10). Antalya, Turkey.

- Gutiérrez-Negrín, L. C., Garduño-Monroy, V. H., & Casarrubias-Unzueta, Z. (2000). Tectonic characteristics of the geothermal zone of Pathé, México. *Proceedings World Geothermal Congress*, (págs. 1189-1193). Kyushu - Tohoku, Japan.
- Heim, A. (1926). Notes on the Jurassic of Tamazunchale (Sierra Madre Oriental México). *Eclogae Geol. Helvetiae*, 20(1), 84-87.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la investigación*. D.F.: McGRAW-HILL.
- Hernández, B. (21 de Febrero de 2018). Las aguas termales cerca de Pinotepa Nacional se secan tras el sismo en México. *El país*.
- Hernández-Zúñiga. (2014). Potencial geotérmico de México. *Conferencia dictada en noviembre de 2014* (pág. Presentacion en pdf 10 laminas.). México. D.F.: Secretaria de Energia (SENER).
- Hiriart Le Bert, G. (2011). *Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía*. Mexico: IDB y CRE.
- Historia de Temascalcingo*. (7 de Diciembre de 2018). Obtenido de www.vivetemascalcingo.blogspot.com
- Huenges, E. (2010). *Geothermal Energy Systems*. Darmstadt: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- Iglesias, E. R., Torres, R. J., Martínez Estrella, I., & Reyes Picaso, N. (2011). Resumen de la evaluación de 2010 de los recursos geotérmicos mexicanos de temperatura intermedia a baja. *Revista Mexicana de Geoenergía*, 24(2), 39-48.
- INEGI. (2001). Síntesis de información geográfica del estado de México. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática*.
- INEGI. (2015). Datos vectoriales. *Limites estatales*.
- INFOMESEM. (2009). Carta geológica del estado de México. Toluca: Instituto de geología

- International Solar Energy Society. (2002). *Transitioning to a renewable energy future*. Germany.
- Langridge, R., Persaud, M., Ramón Zúñiga, F., Aguirre-Díaz, G., Villamor, P., & Lacan, P. (2013). Preliminary paleoseismic results from the Pastores fault and its role in the seismic hazard of the Acambay graben, Trans-Mexican Volcanic Belt. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 463-481.
- Lasaponara, R., & Masini, N. (2012). *Satellite Remote Sensing*. Dordrecht: Springer.
- Lund, J. W. (2005). 100 Years of geothermal power product. *Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 1-3.
- Lund, J. W., Freestone, D. H., & Boyd, T. L. (2010). Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review. *Proc. of the World Geothermal Congress 2010* (pág. 23). Bali, Indonesia: WR.
- Luque Vergara, N. A. (2008). Geotermia en México. *Proyecto de Investigacion*. Qro., Querétaro, México: UNAM, Centro de Geociencias.
- Macías Vázquez., J. L., & Rocha López., V. S. (Enero-Junio de 2013). Evolución Vulcanológica del Volcán Cerro Prieto, B.C. *Revista Mexicana de Geoenergía*, 26(1), 24-33.
- Márquez, A. V. (1999). *Tectonics and volcanism of Sierra Chichinautzin: extension at the front of the Central Trans-mexican Volcanic belt*. *Journal of Volcanology and geothermal research*.
- Martínez Reyes, J., & Nieto Samaniego, Á. F. (1990). Efectos geológicos de la tectónica reciente en la parte central de México. *Instituto de Geología*, 9(1), 33-50.
- Martinez S., R. (1993). Caracterisation minéralogique, géochimique et isotopique du champ géothermique de Los Humeros, México. Interactions fluide-roche dans un système à fluide (mixte vapor). *I'NPL*, 232.

- Martinez Serrano, R. G., & Alibert, C. (1994). Características geoquímicas de las rocas volcánicas del sistema geotérmico Los Humeros, Puebla y su relación con la mineralogía de alteración. *Geofísica Internacional*, 33(4), 585-605.
- Miranda-Torres, R. (Junio de 2018). En el olvido, paraíso termal de San Pedro de Los Baños. *El Sol de Toluca*.
- Mooser, F., Nair, A., & Negendank, J. (1974). Paleomagnetic investigations of Tertiary and Quaternary igneous rocks; VII, A paleomagnetic and petrologic study of volcanics of the Valley of Mexico. . *Geologische Rundschau*, 451-483.
- Mora-Álvarez, G., Caballero-Miranda, C., Urrutia-Fucugauchi, J., & Uchiumi, S. (1991). Southward migration of volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, basin of México?-a preliminary K-Ar dating and paleomagnetic study. *Geofísica Internacional*.
- Morales-Arredondo, J., Esteller-Alberich, M., Armienta-Hernández, M., & Martínez-Florentino, T. (2018). Characterizing the hydrogeochemistry of two low-temperature thermal systems in Central Mexico. *Journal of geochemical exploration*, 93-104.
- Nicholson, K. (1993). *Geothermal systems*. In *Geothermal Fluids*. Berlin: Springer.
- Ordaz Méndez, C. A., Ramírez Silva, G., & Flores Armenta, M. (2011). Potencial geotérmico de la República Mexicana. *Geotermia*, 50-58.
- Osete, M., Ruiz-Martínez, V., Caballero, c., Galindo, C., Urrutia-Fucugauchi, J., & Tarling, D. (2000). Southward migration of continental volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, Mexico: paleomagnetic and radiometric evidence. . *Tectonophysics*, 201-215.
- Pirajno, F. (2009). *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer.
- Prol-Ledesma, R. M. (2002). *El calor de la tierra*. México, D.F.: Fondo de cultura económica.

- Ramírez-Angeles, M. (2015). *Sobreexplotación del acuífero Ixtlahuaca- Atlacomulco, Estado de México, análisis espacio-temporal (1970-2000)*. Toluca: Tesis de licenciatura.
- REN's 21. (2017). *Renewables Energy Policy Network for the 21st Century*. Paris: Renewables 2017 Global Status Report.
- Renewables Global Status Report. (2015). *Reporte de la situación mundial de las energías renovables*. Paris: REN.
- Reyes, E. D. (1964). *El Jurásico superior del área de Tamán*. S.L.P: Petroleos Mexicanos.
- Rivera Ruiz, T. (2001). *Informe de la carta geoquímica de la CD. De México*. Chilpancingo: CONSEJO DE RECURSOS MINERALES.
- Rodríguez-Pascua, M., Pérez-López, R., Garduño-Monroy, V., Perucha, M., & Israde-Alcántara, I. (2017). Estimation of the epicentral area of the 1912 Acambay earthquake (M 6.9, Mexico) determined from the earthquake archaeological effects (EAE) and the ESI07 macroseismic scale. . *Quaternary International*, 1-13.
- Salazar, F. (2009). El Petróleo y la crisis económica mundial: una mezcla explosiva. *Polémika*, 1(1), 36-43.
- Salinas-Sánchez, S. (2013). *Geología, Petrología y Geoquímica del Volcán Jocotitlán, Estado de México*. México, D. F.: Tesis Maestría. UNAM.
- Santoyo Gutiérrez , É. R., & Barragán Reyes , R. M. (Abril-Junio de 2010). Energía Geotérmica. *Ciencia*, 40-51.
- Santoyo Gutiérrez, E., & Torres Alvarado, I. S. (2010). Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: hacia un desarrollo sustentable. *Revista general universitaria*, 7-11.
- Santoyo-Gutiérrez, E. B.-R.-R. (1993). Estructura de los sistemas Geotérmicos en Geotermia en México. (V. Torres, Ed.) *Programa Universitario de Energía*.

- Secundino-Estanislao, K. (2017). *Conflicto por el agua y conformación territorial. La Hacienda de Villejé, Jocotitlán (1739-1803)*. El Colegio de Michoacán A. C.: Tesis maestría Geografía Humana. .
- SGM. (1997). Carta geológica minera - Pachuca-F14-11. *Servicio Geológico Mexicano*. Pachuca-Hgo.
- SGM. (1998). Carta geológico minera - Morelia-E14-1. *Servicio Geológico Mexicano*.
- SGM. (1998). Carta geológico minera-Cuernavaca-E-14-5. *Servicio Geológico Mexicano*.
- SGM. (1999). Carta geológico minera - Querétaro - F14-10. *Servicio Geológico Mexicano*. Pachuca-Hidalgo.
- SGM. (2000). *Carta geológico minera Ciudad de México E14-2 Escala 1:250 000*. Consejo de recursos minerales.
- SGM. (2000). Carta geológico minera-Ciudad Altamirano E14-4. *Servicio Geológico Mexicano*.
- SGM. (2002). Carta geológico minera-Ciudad de México-E14-2. *Servicio Geológico Mexicano*.
- Siebe, C., Komorowski, J.-C., & Sheridan, M. (1992). Morphology and emplacement of an unusual debris-avalanche deposit at Jocotitlán volcano, Central México. *Bulletin of Volcanology*, 573-589.
- Singh, S., Rodríguez, M., & Espindola, J. (1984). A catalog of shallow earthquakes of Mexico from 1900 to 1981. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 267-279.
- Society, I. S. (2002). International Solar Energy Society. *Transitioning to a renewable energy future*. Germany.
- Suárez, M. C. (2000). Flujo de Fluidos No-Isotérmicos en Reservorios Fracturados con Porosidad y Permeabilidad Múltiples. *Doctoral dissertation, Tesis Doctorado*, 295. D. F., México: Universidad Autónoma del Estado de México.

- Suter, M., Quintero, O., & Johnson, C. (1992). Active faults and state of stress in the central part of the Trans-Mexican volcanic belt. 1-The Venta de Bravo fault. *Journal of Geophysical Research*, 11983–11994.
- Suter, M., Quintero, O., López, M., Aguirre, G., & Farrar, E. (1995). The Acambay graben: Active intra arc extensión in the trans-Mexican volcanic belt Mexico. *Tectonics*, 1245-1262.
- Torres R, V., Venegas, S, S., Herrera J., F., & Gonzalez E., P. (1993). Manifestaciones termales de la República Mexicana. *Geotermia en México*, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Torres Rodríguez, V. (2000). Geothermal Chart of Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress*, (págs. 1867 - 1870). Kyushu - Tohoku Japan.
- Torres, R. N.-G.-R.-P. (1993). Distribución de aguas termales y su relación con la tectónica reciente en México, La Geotermia en México. *Programa Universitario de Energia*, 140.
- Torres-Rodríguez, V., Arellano-Gómez, V., Barragán-Reyes, R. M., González-Partida, E., Herrera-Franco, J. J., Gutiérrez, E. S., & Venegas-Salgado, S. (1993). *Geotermia en México*. UNAM.
- Tupin, F., Inglada, J., & Nicolas, J. M. (2014). *Remote sensisg imaginery*. London: John Wiley & Sons, Inc.
- Urbina, F., & Camacho, H. (1913). La megasismica Acambay-Tixmadeje, Estado de México, conmovida el 19 de Noviembre de 1912. . *Boletín del Instituto Geológico de México*, 32-141.
- Verma, S. P., Pandarinath, K., Santoyo, E., González-Partida, E., Torres-Alvarado, I. S., & Tello-Hinojosa, E. (2006). Fluid chemistry and temperatures prior to exploitation at the Las Tres Vírgenes geothermal field, México. *Geothermics*, 156–180.

Yáñez Dávila, D. (Octubre de 2016). Procesos de interacción agua-roca en el reservorio geotérmico de alta entalía; Los Humeros, Puebla, México. *Tesis de Maestría*. Queretaro: Centro de Geociencias, UNAM.

Yáñez G., C. (1980). *Informe geológico del proyecto geotérmico Los Humeros-Derrumbadas*. CFE.