



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Propuesta del modelo conceptual
hidrogeológico en el Campo
Geotérmico Las Tres Vírgenes,
Baja California Sur, México.**

TESINA

Que para obtener el:

Grado de Especialista

en:

**Exploración y Aprovechamiento de
Recursos Geotérmicos**

P R E S E N T A

Eduardo Alfredo García Zamorano

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Martín Carlos Vidal García



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Índice general

1	Generalidades	1
1.1	Justificación	1
1.2	Objetivo	2
1.3	Metodología propuesta	2
1.4	Antecedentes	2
1.5	Localización	7
1.6	Geografía	8
1.6.1	Clima	8
2	Marco Geológico	12
2.1	Marco Tectónico Regional	12
2.2	Geología Regional	14
2.3	Geología del Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes	15
2.4	Estratigrafía	16
2.4.1	Basamento	16
2.4.2	Grupo Pre-Comondú	17
2.4.3	Grupo Comondú	18
2.4.4	Formación Santa Lucía	18
2.4.5	Basalto Esperanza	18
2.4.6	Cuenca Santa Rosalía	18
2.4.7	Caldera La Reforma	20
2.4.8	Complejo Volcánico Aguaquito	20
2.4.9	Complejo Volcánico Tres Vírgenes	20
2.4.10	Depósitos de escombros de caída, caída de ceniza y aluvión	21
2.5	Sistemas Estructurales	22
3	Modelo Conceptual Hidrogeológico en el Campo Geotérmico de Tres Vírgenes	24
3.1	Dominio y Geometría del Sistema	24
3.2	Geoquímica	25
3.3	Caracterización hidrogeológica del pozo LV-11	30
3.4	Modelo Conceptual Hidrogeológico	32

4 Conclusiones y Recomendaciones	35
4.1 Conclusiones	35
4.2 Recomendaciones	35

Resumen

El presente trabajo propone un modelo conceptual hidrogeológico en el Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes, Baja California Sur. A partir de una revisión bibliográfica, se actualizaron las aportaciones de la geología, estratigrafía y la hidrogeología, además de la información disponible de los pozos de producción realizados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se integró información de índole estratigráfica, estructural, geoquímica, así como, datos de propiedades físicas de las rocas, para la realización del modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico en el reservorio geotérmico.

El modelo conceptual propone la distinción litológica entre Grupo Comondú y el Grupo Pre-Comondú obtenido a partir de la descripción de los núcleos y de la estratigrafía en los pozos productores del reservorio geotérmico. El modelo conceptual hidrogeológico consiste de 4 unidades hidroestratigráficas: Acuífero libre, contenido en depósitos de caída de ceniza, de flujos de escombros y aluvión con un espesor de 100 m. Acuífugo, que funciona como una zona impermeable, constituido por las rocas volcánicas del Neógeno y Cuaternario con un espesor de entre 600 y 1000 m. Acuífero de doble porosidad, en las areniscas del Grupo Pre-Comondú con un espesor de 250 m y valores de porosidad de hasta 19.9%. Finalmente, un Acuífero fracturado, en las rocas graníticas del Batolito Peninsular. El sistema acuífero profundo comprende a estas dos últimas unidades hidroestratigráficas; en donde se aloja el reservorio geotérmico.

La distinción litológica del Grupo Comondú y Pre Comondú en el reservorio, permitió dimensionar a las areniscas del Grupo Pre-Comondú, a partir de diversos autores que han realizado descripción estratigráfica de este grupo a lo largo de la Península de Baja California. A partir de dichas descripciones se propone el Acuífero de doble porosidad alojado en las areniscas del Grupo Pre-Comondú como un acuífero regional, con estimaciones en extensión de más de 350 km y con espesores promedio de 250 m.

Abstract

The present work propose a conceptual hydrogeological model in the Las Tres Vírgenes Geothermal Field, Baja California Sur. From a bibliographic review, the contributions of geology, stratigraphy and hydrogeology were updated, in addition to the information available from the production wells carried out by the Federal Electricity Commission (CFE). Stratigraphic, structural, geochemistry information, as well as data on the physical properties of the rocks was employed for the realization of the conceptual model of the hydrogeological system that gives rise to the geothermal reservoir.

The proposed conceptual model provides the lithological distinction between the Comondú Group and the Pre-Comondú Group obtained from the description of the cores and the stratigraphy in producing wells of the geothermal reservoir. The conceptual hydrogeological model consists of 4 hydrostratigraphic units: An unconfined aquifer contained in ash fall deposits, debris flows and alluvium with a thickness of 100 m. An impermeable zone constituted of Neogene and Quaternary volcanic rocks with a thickness of between 600 and 1000 m. A double porosity aquifer in the sandstones of the Pre-Comondú Group with a thickness of 250 m and porosity values of up to 19.9% in three intervals of 10 meters, at a depth between 935-1010 m, according to the results obtained in CFE Well LV-11. Finally a Fractured Aquifer in the granitic rocks of the Peninsular Batholith. The deep aquifer system comprises the last two hydrostratigraphic units; where the geothermal reservoir is located.

The lithological distinction of the Comondú Group and Pre Comondú in the reservoir, allowed to size the sandstones of the Pre-Comondú Group, based on various authors who have made a stratigraphic description of this group along the Baja California Peninsula. Based on these descriptions, the double porosity aquifer hosted in the sandstones of the Pre-Comondú Group is proposed as a regional aquifer, with extension estimates of more than 350 km and average thickness of 250 m.

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Justificación

La gestión de un campo geotérmico debe ser tal que el recurso sea producido de manera sostenible, la mejor manera de lograr esto es conocer el campo geotérmico a detalle a partir de las diferentes ramas geocientíficas, que dan información superficial y del subsuelo del campo. Tal es el caso de la hidrogeología, la cual suma información pertinente al conocimiento del campo con relación al comportamiento y volumen del fluido geotérmico y cómo éste se relaciona con fluidos de diferente química y temperatura, a través de distintos medios rocosos, dicho análisis se ve representado en un modelo hidrogeológico.

De modo que estudiar la hidrogeología permite sustentar el modelo conceptual a partir del cual se ha explotado un campo geotérmico, y en otros casos permite proponer un nuevo modelo de la hidrogeología del campo. Una de las características más importantes en la modelación hidrogeológica es identificar y caracterizar las Unidades Hidroestratigráficas. Delimitar las capas geológicas a partir de sus propiedades hidráulicas resulta muy útil para conocer la dinámica del reservorio y las rocas circundantes. Maxey (1964) fundamentó que los cuerpos acuíferos en el subsuelo obedecen, no solo a las características litológicas de cada capa, sino a la dinámica del régimen hidrogeológico definido por los parámetros hidráulicos que involucran el movimiento del agua, su ocurrencia y su almacenamiento. Los parámetros hidráulicos califican el medio rocoso a partir de sus propiedades físicas y como estas se relacionan con un fluido en fase líquida (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, rendimiento específico, etc.)

Así mismo, la información integrada de las unidades hidroestratigráficas conforma el modelo hidrogeológico, de manera que permite hacer asunciones como la delimitación de las zonas de recarga/descarga, y el gradiente hidráulico del flujo subterráneo, entre otros. Por medio de esto se puede identificar un patrón o red de flujo subterráneo y hacer relaciones espaciales de mezcla de fluidos con respecto a la zona de ascenso de fluidos geotérmicos, y así comprender mejor la geoquímica y la dinámica de los fluidos.

A partir de una integración completa de dichos datos y suposiciones del sistema

acuífero contenido en el campo geotérmico, es posible conformar un balance de agua subterránea. Dicho balance se estima a partir de volúmenes conocidos e inferidos de flujo subterráneo, de recarga y de descarga. La construcción de un modelo hidrogeológico sustentado comienza con una detallada caracterización de las unidades hidroestratigráficas, a partir de la cual se plantea la dinámica de los fluidos en profundidad.

1.2 Objetivo

Representar el modelo hidrogeológico conceptual del Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes, para que sirva de apoyo como herramienta en la actualización del modelo vigente del yacimiento geotérmico.

1.3 Metodología propuesta

Para el objetivo planteado se propone la siguiente metodología:

1. Revisión bibliográfica del Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes, en el cual se consultaron diversos estudios científicos, reportes técnicos de distintas instituciones académicas y gubernamentales.
2. Realización del mapa geológico estructural y la delimitación del área de estudio, con el fin de determinar la geología superficial con la que se desarrolló el modelo conceptual.
3. Descripción y definición de la geometría en el subsuelo, a partir de lo cual se obtuvieron secciones geológicas-estructurales del yacimiento geotérmico, para conocer la geometría y la distribución litológica en el subsuelo.
4. Determinar el origen de los fluidos profundos en el reservorio geotérmico a partir de diferentes análisis geoquímicos.
5. Caracterización de las unidades hidroestratigráficas de acuerdo a las propiedades hidrogeológicas a partir de la información recabada de los pozos geotérmicos y de la definición de los acuíferos.
6. Construcción del modelo hidrogeológico conceptual del Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes.

1.4 Antecedentes

Geología

Los primeros trabajos científicos de la zona de estudio fueron de la cuenca de Santa Rosalía debido al gran interés minero que se tenía desde hace más de un siglo por la mina

del Boleo. Wilson (1948), Wilson & Veytia (1949) y Wilson & Rocha (1955) destacan el mapeo geológico con gran detalle la región de Santa Rosalía al grado de considerarse dentro de las áreas mejor estudiadas en la Península de Baja California. Además, describieron la litoestratigrafía y propusieron una hipótesis de la evolución sedimentaria y tectónica. Schmidt (1975) clasificó la roca del basamento como una cuarzo-monzonita y la dató en 91 Ma. Ortlieb (1978) y Ortlieb & Malpica (1978) estudiaron la emersión cuaternaria de la cuenca por medio del registro de las terrazas marinas pleistocénicas. Schmidt et al. (1977) Demant (1984) y Sawlan & Smith (1983) estudiaron los macizos volcánicos pliocuaternarios en la Caldera La Reforma, en las Tres Vírgenes y en el substrato volcánico de la cuenca. López-Hernández et al. (1995) caracterizaron las estructuras volcánicas de las Tres Vírgenes por su petrología y edad.

En la década de los 80's y 90's la Comisión Federal de Electricidad (CFE) perforó 13 pozos verticales y algunos de ellos direccionales, con el fin de explorar el potencial geotérmico para su futura explotación. De las perforaciones se obtuvieron cortes litológicos, zonas de debilidad estructural, mineralogía hidrotermal y temperaturas medidas y calculadas por medio del método de inclusiones fluidas. En los resultados de exploración profunda fecharon la granodiorita con edades de 81 Ma y la correlacionaron con los batolitos del Cretácico de la Península de Baja California, además, se caracterizó como una roca impermeable, sin embargo, en las zonas cercanas a las fallas estructurales tiene propiedades permeables, que a su vez es donde se aloja el reservorio geotérmico. Se atravesaron rocas volcánicas, sedimentarias, intrusivas y metamórficas agrupadas en seis litologías: El Viejo, Aguajito, Cuenca Sta. Rosalía, Fm. Sta. Lucía, Gpo. Comondú (sin hacer distinción del Grupo Pre-Comondú) y Basamento, las cuales son correlacionables con unidades aflorantes en la zona de estudio. Además, se reportaron diversas zonas de falla, dentro de las cuales se detectó una zona de alto fracturamiento en el intervalos de 1076 a 1126 m constituido por microbrechas.

Miranda-Avilés et al. (2005) realizaron un análisis de las facies en la caliza marina basal depositada en el Mioceno superior en la porción SE de la cuenca Sta. Rosalía, la cual se reportó como la primera incursión marina de dicha cuenca. Avellán et al. (2019) realizaron un mapeo geológico, en el cual compilan estudios previos con nueva información estratigráfica y con datos de fechamiento por medio de $^{230}\text{Th}/\text{U}$ en circones. García-Sánchez et al. (2019) mapearon la Caldera La Reforma y estiman la edad de las etapas evolutivas de la formación de dicha caldera. Osorio-Ocampo et al. (2019) estudiaron depósitos volcánicos del Plioceno tardío-Pleistoceno temprano, los cuales se intercalan con sedimentos marinos dentro la Formación Tirabuzón e Infierno (Cuenca de Sta. Rosalía), dicho vulcanismo es previo a la Caldera La Reforma y al Complejo Aguajito. Ocampo-Díaz et al. (2021) estudiaron la estratigrafía y el origen de la Formación El Salto que aflora al SSO de la Cuenca de Santa Rosalía, en él definen los miembros que conforman a la formación y datan la depositación máxima.

Geofísica

CFE (1983) realizó un estudio geoelectrico por medio del método Sondeo Eléctrico Vertical (SEV, por sus siglas en inglés) donde definieron un horizonte resistivo con valores mayores a 200 Ohm-m y un cuerpo de resistividad baja (3-8 Ohm-m) a una profundidad de 1000 m. CFE (1984) identificó un lineamiento conductor de 5 Ohm-m en la Falla de Las Víboras y en un segmento de la Falla El Azufre a 500 m de profundidad, además, determina que el reservorio geotérmico en esa zona se localiza entre los 500 y los 2000 m de profundidad. Ballina & Herrera (1984) realizaron la medición de 389 estaciones gravimétricas, cuya información fue reinterpretada por García (1993), donde se observa la presencia de fallas regionales enterradas con una tendencia NO-SE y NE-SO. Así mismo, en las mismas estaciones gravimétricas se realizaron mediciones magnetométricas, en las cuales es posible observar dos tendencias NO-SE y NE-SO que convergen en las cercanías del pozo LV-2 (López-Hernández, 2018). CFE (1993) condujo 14 meses de monitoreo sísmico en el Complejo Volcánico Tres Vírgenes y sus alrededores con una red de 6 estaciones digitales, del cual se observó que la zona tiene actividad sísmica intensa de tipo magmática y tectónica, además, la mayor actividad sísmica sucede debajo del Volcán El Azufre con hipocentros desde 3 a 5 km con magnitudes menores a 3 en escala Richter, donde se asume como la parte más somera de la cámara magmática y la fuente de calor. López-Hernández et al. (1995) realizaron estudios de resistividad, magnetometría y gravimetría, en ellos identificaron zonas de baja resistividad (<10 Ohm-m) asociados a mínimos magnéticos en 4 zonas: El Azufre, Cerro Blanco, Agua Agria y Cueva de Gel-El Viejo, El Mosquito. López-Hernández et al. (1995), reportaron que las manifestaciones de temperatura coinciden con los bordes de alto gravimétrico limitadas por la Falla El Azufre, además determinaron que las zonas conductoras se encuentran alineadas al sistema NO-SE a lo largo del Cañon los Azufres. En 1993 la CFE realizó estudios de sismicidad activa en tensores de esfuerzos locales y regionales en Las Vírgenes, los resultados indican que el campo geotérmico previo a su producción, era sísmicamente activo entre 1 y 8 km de profundidad.

Romo et al. (2000) monitorearon la microsísmica del campo geotérmico, así como también la respuesta magnetotelúrica a una profundidad de 3 km. Los resultados identificaron que el Cañon los Azufres es un lineamiento con alta atenuación de las ondas sísmicas y tiene baja resistividad eléctrica (<5 Ohm-m), lo que se interpreta como una zona con presencia de un alto fracturamiento y fluido caliente en circulación, y que además representa una frontera entre el Complejo Volcánico de las Tres Vírgenes y la Caldera El Aguajito. Romo et al. (2005), implementaron un método magnetotelúrico (MT); con el cual pudieron identificar al sur del Volcán El Viejo una zona con mayor conductividad en la Formación Santa Lucía, y la resistividad aumenta conforme se aproxima al basamento granítico, al SE (pozo LV-7) se identificó a la Formación Santa Lucía dentro de una zona resistiva y por debajo, en el Grupo Comondú y en el basamento, una anomalía de alta conductividad.

En 2009 la CFE realizaron estudios geofísicos utilizando las técnicas de transitorio electromagnético conjunto a magnetometría, como resultado asocian una anomalía

magnética con cuerpos a profundidades de 1500 m, además lograron correlacionar la litología a la estratigrafía a partir de la información de pozos, donde las capas superficiales de carácter ígneo, sedimentario (arenas) y materiales más finos poseen resistividades entre 10 y 500 Ohm-m, un horizonte conductivo correlacionado con las Formaciones Comondú y Santa Lucía con resistividades de <10 Ohm-m, material asociado a materiales ígneos de composición andesítica, conglomerados y tobas arenosas con resistividades de entre 10 y 20 Ohm-m y el basamento con resistividades de entre 20 y 250 Ohm-m. Antayhua-Vera et al. (2015) realizaron un tensor de esfuerzos del campo geotérmico a partir de datos sísmicos recabados entre 2003 y 2012, los resultados indican que la zona de transición frágil-dúctil esta a aproximadamente 7.4 km se encontraron 7 enjambres sísmicos distribuidos en la zona de estudio y sus alrededores, de los cuales 4 de ellos esta asociados a la reinyección y el resto relacionado a fallas tectónicas. Además, la inversión de esfuerzos señala que el esfuerzo extensional de los sistemas NO-SE, E-O y NE-SO están asociados a esfuerzos locales, mientras que la componente compresiva del sistema NE-SO está relacionado a un campo de esfuerzos regionales. Leandro-Pérez (2017) realizó un estudio de microsismicidad en la Caldera La Reforma en el cual encontró un cese de la microsismicidad a una profundidad de 7-8 km y al emparejar un perfil térmico modelado, interpreta una zona de Transición Frágil-Dúctil (TFD) entre 4.8 y 8 km de profundidad con temperaturas de 300 y 450 °C.

Vilchis-García et al. (2019) aplicaron el método de tomografía sísmica mejorada con la cual consiguieron ubicar la fuente magmática a una profundidad de 4-5 km por debajo del Volcán La Virgen el cual alimenta un reservorio a 2-3 km de profundidad. Sena-Lozoya et al. (2020) elaboraron un perfil de sísmica por reflexión, el cual complementado con el método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW, por sus siglas en inglés), alcanzaron una profundidad de 500 m y pudieron correlacionar con la información litológica, así mismo pudieron identificar planos de falla y una zona profunda con alteración hidrotermal en las ignimbritas de la Caldera Reforma. Casallas-Moreno et al. (2021) realizaron secciones sísmicas a partir de MASW y de la sísmica de reflexión, además implementaron gravimetría con lo cual consiguieron construir un modelo 2D por debajo del Complejo Volcánico Tres Vírgenes. Chacón-Hernández et al. (2021) realizaron un análisis de birrefringencia sísmica en donde pudieron caracterizar los diferentes sistemas estructurales, el sistema NO-SE pertenece a un rasgo regional profundo de al menos 5 a 6 km, los sistemas N-S, NE-SO y NO-SE tienen características menos profundas de hasta 5 km. Por debajo de los 6 km hay una zona de transición frágil-dúctil. Antayhua-Vera et al. (2022) analizaron 1275 eventos sísmicos monitoreados por 4 estaciones entre 2009 y 2013, con lo que consiguieron calcular el valor que relaciona la frecuencia y la magnitud de los sismos. Con esta herramienta pudieron identificar que los mayores niveles de sismicidad estan ubicados en la parte central del Complejo Volcánico Tres Vírgenes y en el centro entre el Volcán La Virgen y la Falla La Virgen, además, determinaron que verticalmente los mayores niveles de sismicidad ocurren entre los 3.5 y 7 km que se asocian a las fallas regionales NO-SE, las cuales se asumen como estructuras que alojan magma que a profundidad se comportan como fuentes de calor independientes.

Geoquímica

A partir de un análisis de 46 estaciones CFE realizó la detección de Radón, en el estudio identificaron a la Falla Las Víboras como la estructura más permeable, cerca del pozo LV-2 (Gutierrez-Negrín & López, 1984). Portugal et al. (2000) realizaron un modelo conceptual a partir de información geológica, estructural, hidrogeoquímica e isotópica de oxígeno donde se expone que la recarga del reservorio tiene como origen el agua meteórica del periodo glacial durante el Holoceno y Pleistoceno y el agua magmática andesítica que contribuye con un 30 %. Tello et al. (2005) realizaron un análisis geoquímico de los fluidos de los pozos geotérmicos y de las manifestaciones geotérmicas superficiales, en el cual se observó un enriquecimiento en isótopos de oxígeno 18 típico de zonas geotérmicas, así como también una composición ácido sulfatada en manantiales hidrotermales (El Azufre y Agua Agria) lo que se interpreta como agua calentada por vapor y la oxidación de H_2S mientras que en el resto de manantiales el fluido tiene una fuerte influencia de agua meteórica. Verma et al. (2006) estudiaron una base de datos geoquímicos de muestras de agua de manantiales calientes y de pozos domésticos y geotérmicos, además realizaron un estudio de inclusiones fluidas. En sus resultados encontraron alta concentración de sales en las muestras de agua geotérmica, relación Na/Cl y en las inclusiones fluidas lo que interpretan como una componente de agua de mar en el reservorio geotérmico.

Birkle et al. (2016) realizaron un análisis geoquímico de isótopos, elementos mayores y elementos traza, los resultados indican que el agua de la recarga del sistema geotérmico tiene un origen heterogéneo con una componente dominante de agua meteórica recargada en el Pleistoceno tardío-Holoceno temprano y una componente complementaria de agua fósil. Los resultados del análisis de isótopos considera que la recarga del cuaternario sucedió en intervalos de clima frío a tasas de precipitación altas y la recarga de agua meteórica en el sistema debió darse por medio de las fracturas en la tectónica presente. Pinti et al. (2019) realizaron un estudio geoquímico para conocer más del origen del fluido, de la influencia del fluido de reinyección y del los inhibidores para evitar la incrustación por calcita en el reservorio, los resultados indican que el origen de la salmuera del reservorio tiene como origen depósitos de halita lixiviados actualmente pero que fueron precipitados por el agua de mar antes de la ruptura del Golfo de California hace millones de años, así mismo las relaciones isotópicas reportan un origen mantélico del fluido con una componente de aire atmosférico producto de la reinyección del fluido al sistema.

Hidrogeología

Castillo-Palomo (1995) resumió los diferentes acuíferos de Baja California, para el acuífero de Las Vírgenes definió cinco unidades: (1) El relleno del valle que presenta buena permeabilidad. (2) Cuerpo rolítico con permabilidad secundaria. (3) Formaciones sedimentarias conglomeráticas de la Formación Salada. (4) La Formación Comondú la cual presenta una infiltración escasa dada la composición y naturaleza de sus materiales pero que puede llegar a presentar buena permeabilidad por fracturamiento, además

de que indica valores de resistividad de zona saturada. (5) Monzonita cuarcífera que define como un lecho rocoso con permeabilidad. Reporta 21 aprovechamientos subterráneos en la Cuenca Las Vírgenes, de los cuales tres son pozos y 18 norias y considera al acuífero en equilibrio dada su escasa disponibilidad, su cercanía a la costa y su papel de reserva para la ciudad de Santa Rosalía. Conagua (2020), reporta que el reservorio geotérmico esta comprendido por agua infiltrada hace cientos de años y que no tiene conexión hidráulica con los acuíferos someros, además que el volumen de extracción para producción de energía eléctrica en las plantas geotérmicas es de $3.2 \text{ hm}^3/\text{año}$, añade que la infiltración ocurre en las partes altas conformadas por rocas fracturadas con un volumen infiltrado de $1.5 \text{ hm}^3/\text{año}$, una recarga total media anual de $4.7 \text{ hm}^3/\text{año}$ y una extracción de $24,524 \text{ hm}^3/\text{año}$.

1.5 Localización

El área de estudio se localiza en el municipio de Mulegé, en la zona NE del estado de Baja California Sur (BCS) en la Península de Baja California (Figura 1.1), el acceso a la zona de estudio es a través de la carretera Federal No. 1 que parte de Santa Rosalía a Ensenada. A partir de la carretera Federal No. 1, en el km 27 existe un camino pavimentado al norte para acceder a las instalaciones de la planta geotérmica Las Tres Vírgenes de la CFE. El área de estudio se encuentra en la zona de aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, que es una zona de amortiguamiento de la reserva de la Biosfera el Vizcaíno, BCS.

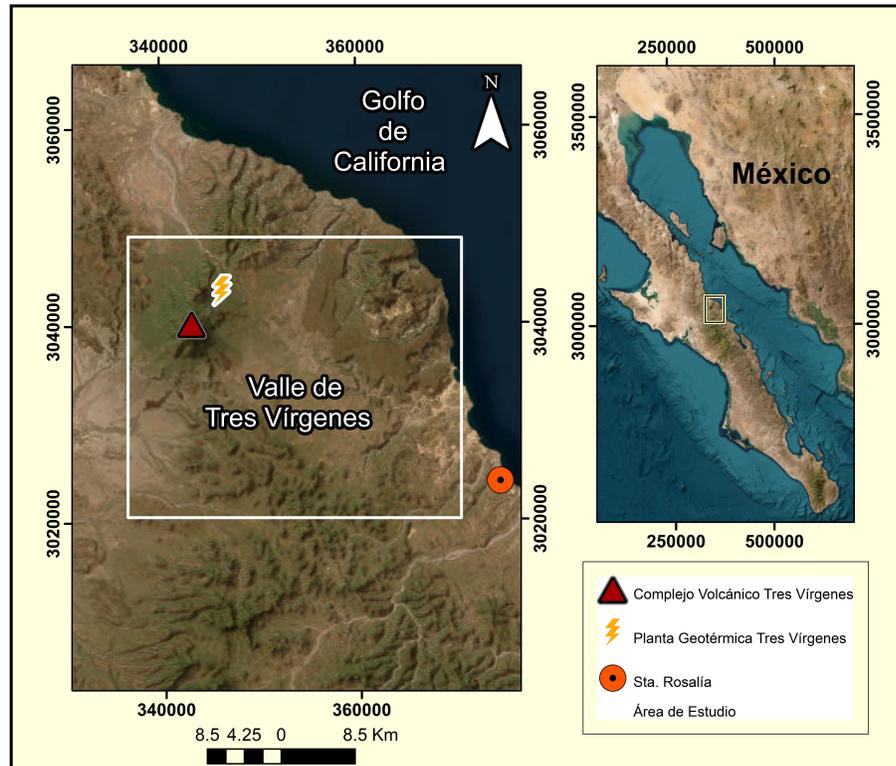


Figura 1.1: Localización del área en estudio Las Tres Vírgenes, en el municipio de Mulegé, Baja California Sur.

1.6 Geografía

1.6.1 Clima

El análisis del clima se realizó con base en las estaciones meteorológicas (Figura 1.2) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN)¹ más cercanas a la zona de estudio, en el periodo comprendido del año 2000 a 2017 para la precipitación, las estaciones meteorológicas son El Mezquital, Santa Rosalía, Santa Agueda, Santa Martha, San Ignacio y San José de Magdalena. De acuerdo con datos de la media anual de la estación El Mezquital la temperatura media anual del año 2000-2017 es de 21.4 °C con una desviación estándar de 0.87.

¹Servicio Meteorológico Nacional. 2017. Reporte del clima en México. Reporte anual 2017, 13, 48 pp. Consultado en Mayo 2020. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2017.pdf>

Precipitación

Para el caso de la precipitación se considera el dato medio anual de 187.5 mm en la estación El Mezquital, dada su cercanía a la Cuenca de Santa Rosalía. En la Tabla (?? se muestran las 6 estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio.

Tabla 1.1: Promedio de precipitaciones en mm (2000-2017).

Estaciones Meteorológicas	Promedio (2000-2017)	Desviación Estándar
El Mezquital	187.5	165.8
Sta Rosalía	126.7	91.5
Sta Agueda	210.4	134.2
San Ignacio	173.2	148.4
Sta Martha	233.3	132.3
San Jose de Magdalena	283.3	176.4

En la Figura (1.2) se observa la distribución de las 6 estaciones meteorológicas y el área de la cuenca correspondiente a la Cuenca de Santa Rosalía. Se considera a la estación de El Mezquital como una zona de recarga de agua subterránea, la cual corresponde con la Sierra Santa Lucía. Si bien, El Mezquital es la estación meteorológica más cercana, queda fuera de la cuenca hidrológica de la zona de estudio, sin embargo, dada su proximidad se emplea como referencia para los datos climatológicos.

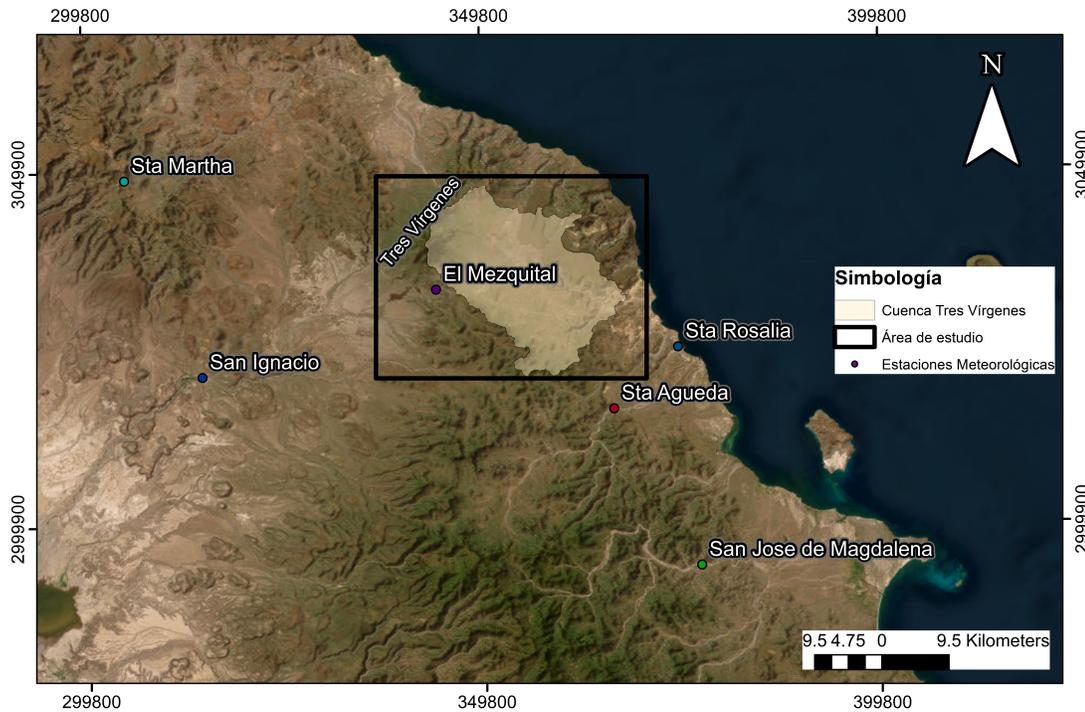


Figura 1.2: Mapa de las estaciones meteorológicas consideradas en la zona de estudio.

Así mismo, en la Figura (1.3) se observa una gráfica de registro de precipitaciones en las 7 estaciones meteorológicas más cercanas de 2000-2017. En la gráfica es notable un incremento en las precipitaciones a partir del año 2014, asociado al aumento en los eventos de huracanes en la Península de Baja California.

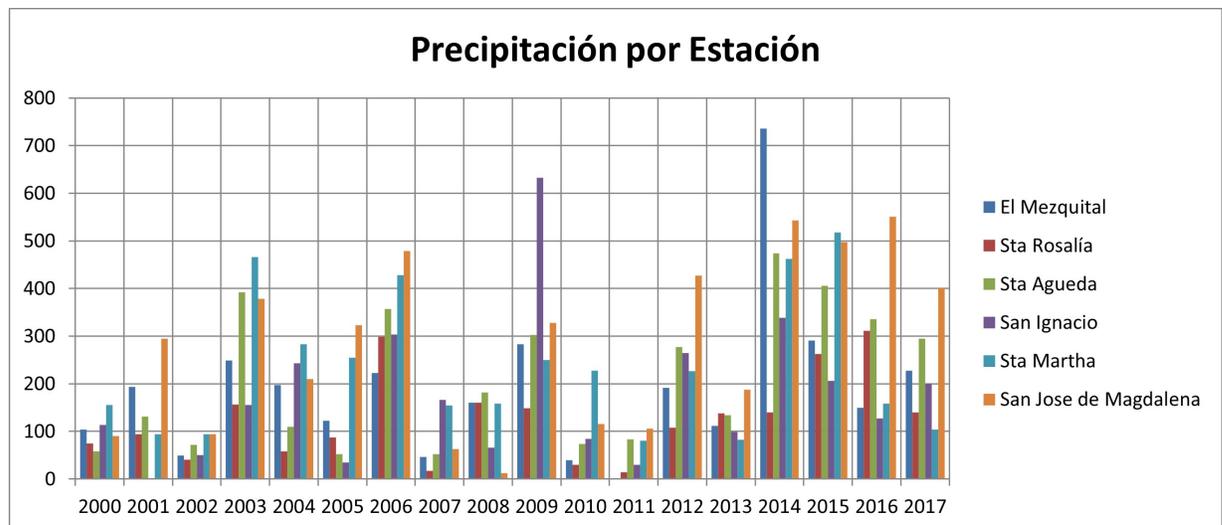


Figura 1.3: Comparación de las precipitaciones en las 6 estaciones meteorológicas en un período de 2000-2017 (SMN)¹.

Evaporación

La evaporación fue calculada a partir de los datos de la estación Santa Agüeda, los cuales fueron los datos disponibles más cercanos al área de estudio. Se estimó una evaporación media anual de 5.42 mm/año y una desviación estándar de 3.62 para el año 2016, dicho año fue el más reciente y más completo en información.

Temperatura

La temperatura de la región es de un clima seco semicálido principalmente, se calculó con datos de la estación El Mezquital, se tomó información del 2000-2017 para calcular una media anual de 21.4°C con una desviación estándar de 0.87.

Capítulo 2

Marco Geológico

2.1 Marco Tectónico Regional

El noroeste de México está dominado fuertemente por el vulcanismo producto de la subducción de la Placa Farallón-Guadalupe, a partir del Mesozoico medio hasta el Mioceno medio. Así como también por eventos de deformación producto de la Orogenia Laramide, entre el Cretácico inferior y el Cretácico superior. De igual forma, por los esfuerzos estructurales producto de la apertura del Golfo de California entre el Neógeno y Cuaternario.

Particularmente, la tectónica del Paleozoico esta caracterizada por una margen pasiva evidenciada por el cratón de Norteamérica. Hasta el Paleozoico tardío fue que la margen pasiva cambia a una margen activa de tipo convergente producto de la subducción de la Placa Farallón (Figura 2.1). En el Mesozoico se mantuvo la margen convergente, en el lapso de 220-130 Ma el ángulo de subducción fue alto lo que propició un régimen de esfuerzos extensivos (Busby, 2004). Así mismo, en el lapso de los 105-95 Ma (Engelbreton et al., 1985), durante el Cretácico superior, cambió el ángulo de subducción por uno más bajo y se instauró un régimen compresivo (Busby, 2004). Durante este último suceso del Mesozoico el arco volcánico migró y permitió el emplazamiento del Batolito Peninsular (Valencia-Moreno et al., 2011), estos cambios en la dinámica de la subducción dieron inicio a la Orogenia Laramide, la cual dió origen a la Sierra Madre Oriental (George & Dokka, 1994; Busby, 2004).

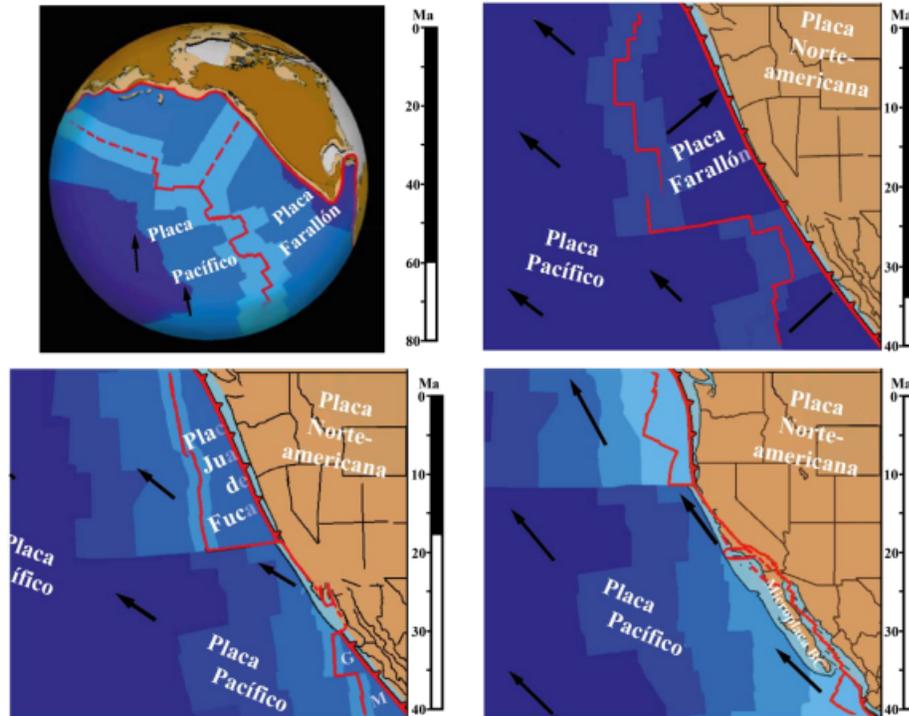


Figura 2.1: Evolución tectónica de la subducción de la Placa Farallón y del rompimiento continental del rift oceánico (Atwater, 2011).

En el Cenozoico, del Eoceno temprano al Mioceno temprano existió una gran actividad volcánica en la región, conocida como Gran Provincia Ígnea (LIP's, por sus siglas en inglés), magmatismo producto de la descompresión del manto asociado a la extensión (Ferrari et al., 2013) dando origen a la formación de la Sierra Madre Occidental (SMO) (Ferrari et al., 2018). Hace 29 Ma, hubo un retroceso de la placa subduciente (Todd et al., 1988), lo que provocó que el arco volcánico migrara a donde se encuentra actualmente el Golfo de California (Hausback, 1984), además de que el régimen tectónico cambió a transcurrente durante este lapso (Ferrari et al., 2013). Hace 23 Ma, el régimen tectónico finalmente se volvió extensivo (Todd et al., 1988), lo que produce que el arco volcánico migre a la posición actual de la Península de Baja California (Hausback, 1984), durante este arco volcánico la Formación Comondú se depositó del Oligoceno tardío al Mioceno temprano (Umhoefer et al., 2001). A lo largo de esta etapa la Dorsal Farallón-Pacífico avanzó en dirección a la trinchera gradualmente, hasta que la dorsal y la trinchera colisionaron, lo que determinó un cambio de margen convergente a un margen transtensivo. La trinchera se convirtió en una falla transformante derecha (Figura 2.1), conocida como Falla Tosco-Abreojos y una de las componentes del régimen estructural, por otro lado, la otra componente fueron los esfuerzos extensivos en el arco volcánico, ambos conformaron el régimen transtensivo (Bohannon et al., 1995).

Hace 12.5 Ma, cesó por completo la subducción (Atwater et al. 1989; Lonsdale 1991; Ferrari et al., 2018). Durante esta etapa el esfuerzo extensivo al Este produjo un adelga-

zamiento de la corteza, de acuerdo con Fletcher et al. (2007), esto generó el ascenso de material mantélico a partir de una ventana astenosférica e intensificó la extensión cortical, de esta manera comienza la ruptura del continente, lo que conformó al Proto-Golfo. Dicho mecanismo perduró hasta hace 5 Ma cuando el intenso rifting originó un sistema de dorsales conectadas por fallas transformantes (Mammerickx et al. 1982; Curray et al., 1984; Lonsdale, 1991), estas últimas son producto del régimen transtensivo. Finalmente, a partir de entre 5-3 Ma el límite de placas Pacífico-Norteamérica se establece como el sistema de dorsales conectadas y el volcanismo apartir del Mioceno-Plioceno esta asociado a los eventos del rifting.

2.2 Geología Regional

Las rocas de la Península de Baja California son predominantemente de tipo ígneo, sedimentario y metamórfico, con edades desde el Paleozoico al Cuaternario. La roca más antigua conocida y datada es el Batolito Peninsular que corresponde al basamento de la región y varia de granito, granodiorita a cuarzo-monzonita con edades del Cretácico superior (McFall, 1968). Al basamento le procede un hiatus deposicional con edades del Paleoceno al Oligoceno, por lo que puede pensarse que el Batolito Peninsular afloraba durante este lapso y fue fuertemente erosionado (Figura 2.2).

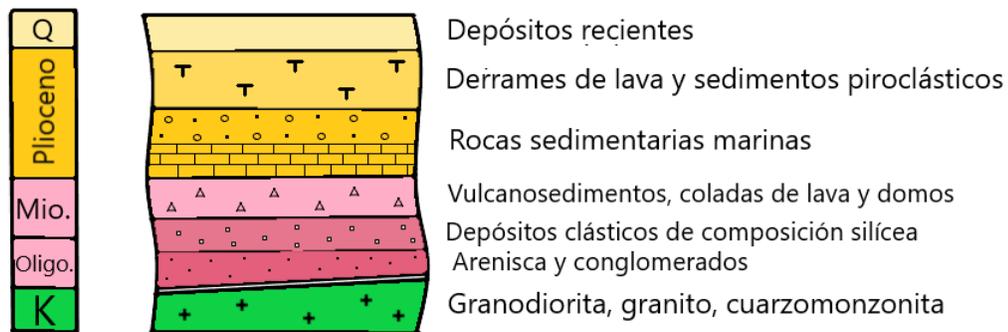


Figura 2.2: Columna estratigráfica regional de la Península de Baja California.

Durante el Oligoceno se depositó una formación de carácter sedimentario continental y alternadas con vulcanosedimentos, nombrada como la Formación El Salto, perteneciente al Grupo Pre-Comondú (Durán-Calderón, 2016). Sobreyace el Grupo Comondú que, al igual que el Grupo Pre-Comondú, consiste en rocas sedimentarias clásticas pero predominan las rocas volcánicas y vulcanosedimentarias, producto de la erosión y de los eventos magmáticos del arco magmático que dió lugar a la Sierra Madre Occidental (SMO). Más tarde en el Oligoceno tardío - Mioceno inferior se deposita el miembro

inferior, asociado al Grupo Comondú por Umhoefer et al. (2001) y asociado al Grupo Pre-Comondú por Durán-Calderón (2016), esta última autora hace la distinción de las rocas del miembro inferior del Grupo Comondú y las clasifica como parte del Gpo. Pre-Comondú, propone que el miembro inferior tienen como fuerte de aporte a la SMO y que el emplazamiento de las unidades del Gpo. Comondú (miembro intermedio y superior) coinciden con el segundo pulso silícico de la SMO (Ferrari et al., 2005). En el Mioceno se deposita la unidad masiva de vulcanosedimentos, diques, domos y coladas de lava, como parte del Grupo Comondú, denominado como Unidad Media de Brechas y Flujos por Umhoefer et al. (2001). Umhoefer et al. (2001) describe a la unidad más joven del Grupo Comondú, denominada como Unidad Superior de Flujos de Lava y Brecha, compuesta por lavas andesíticas y brechas volcánicas masivas, este último miembro aflora en la cima y base de la Sierra Microondas con más de 600 m de espesor, al SO a 4 km de Loreto y a lo largo de la carretera federal a 11 km de Loreto.

En el Plioceno, gran parte de la Península de Baja California fue invadida por el mar, lo que permitió el depósito de rocas sedimentarias marinas, las cuales rellenaron las cuencas que se originaron por el rompimiento continental en el Proto-Golfo Californiano. Alternamente durante este período y prolongándose hasta el Pleistoceno se depositaron rocas de origen volcánico aéreas y subacuáticas en gran parte de la península, las cuales se ven presentes en el relieve de la cuenca de Las Tres Vírgenes con edificios volcánicos como el Complejo Aguajito, los tres volcánes de Tres Vírgenes (El Viejo, Azufre y La Virgen) y la caldera La Reforma.

2.3 Geología del Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes

La zona de estudio (Figura 2.3) se caracteriza por numerosos edificios volcánicos del Pleistoceno que delimitan un valle, de los edificios volcánicos destacan en la parte central del área de estudio el Complejo Volcánico Tres Vírgenes, el cual representa el vulcanismo más joven y es donde está comprendido el campo geotérmico. Además, el NE y al E se tienen dos estructuras volcánicas tipo caldera, Reforma y El Aguajito. Al S y SO se encuentran depósitos del Grupo Comondú y de la Formación Santa Lucía, la cual se extiende al NO, ambas unidades conforman parte de la sierra que delimita al campo geotérmico al poniente. Así mismo, al SO se encuentran coladas del Basalto Esperanza del Mioceno tardío, que se extienden hacia el centro de la zona de estudio donde le sobreyacen los depósitos volcánicos más jóvenes. Al SO afloran depósitos volcánicos del Oligoceno y Mioceno tardío correspondientes a la Formación El Salto del Grupo Pre-Comondú. Al SE y NE del área hay depósitos de secuencias marinas producto de transgresiones marinas durante la formación del Golfo de California, estas secuencias sedimentarias conforman las rocas de la Cuenca de Santa Rosalía, sin embargo, en las zonas cercanas al Complejo Volcánico Tres Vírgenes se reportó únicamente la presencia de la Formación La Gloria (Ortlieb et al., 1984).

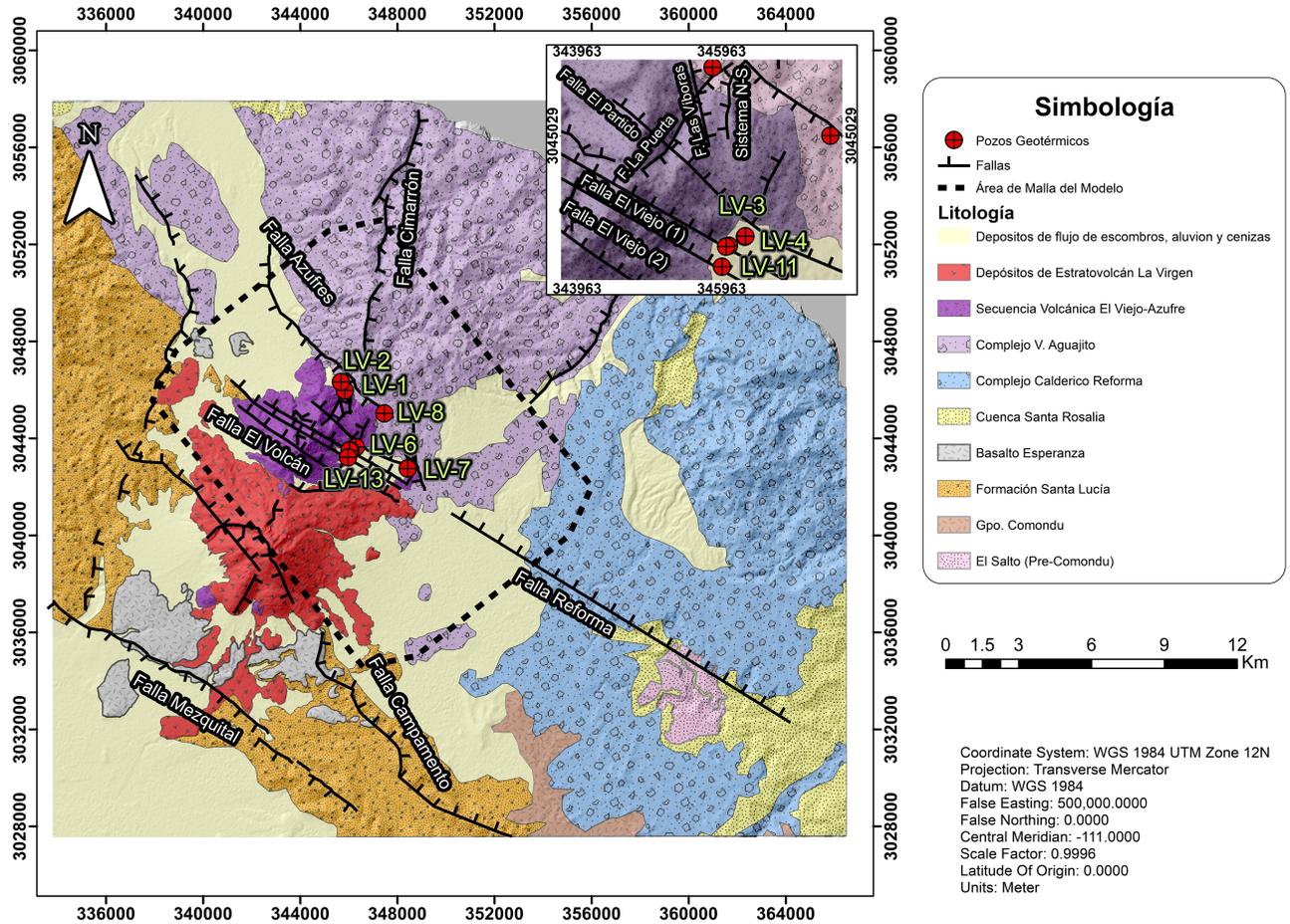


Figura 2.3: Mapa geológico-estructural del Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes.

2.4 Estratigrafía

La estratigrafía expuesta en este trabajo comprende el área del Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes y sus alrededores más cercanos, de tal manera que se tenga una comprensión espacial-temporal de las rocas asociadas al campo geotérmico, en la Figura (2.4) se resumen las distintas unidades litológicas.

2.4.1 Basamento

Conocido como Batolito Peninsular corresponde a rocas intrusvas graníticas clasificadas por McFall (1968) como granito, granodiorita y cuarzo-monzonita, así mismo Gastil (1979) las clasificó como gabros, granodioritas, dioritas y granitos. El basamento está fechado en 87.4 ± 2 Ma por el método de K-Ar por McLean (1988), en 91.2 ± 2.1 Ma por Schmidt (1975) y en 99.1 ± 0.8 Ma con el método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ por Macías et al. (2012). El basamento no aflora en el área de estudio, sin embargo, al sur dentro del Valle de San Juan Bautista Londó y en las cercanías de Loreto se describe una roca

predominantemente granodiorítica con hornblenda y biotita, y pequeños afloramientos cuarzomonzoníticos con biotita (McLean, 1988), en donde se observa altamente cortado por lineamientos de fracturas y fallas, además Rodríguez-Díaz (2009) reporta que está cortado por diques aplíticos de espesores entre 5 y 10 m en las cercanías de Bahía Concepción.

2.4.2 Grupo Pre-Comondú

El Salto

La Formación El Salto sobreyace discordantemente al basamento, descrita como una secuencia de areniscas intercaladas con depósitos de toba, conglomerado y de algunos derrames andesíticos-basálticos, y fechada en 30-19 Ma con un espesor promedio de 250-300 m (Noble, 1950; McFall, 1968; Maraver-Romero et al., 1997; Umhoefer et al. 2001). Ocampo-Díaz (2021) describe esta formación al O de Santa Rosalía como un paquete con tres miembros: (1) El miembro inferior consiste en estratos delgados y gruesos de arenisca roja con conglomerado en menor proporción, y con espesores de 17 m, la depositación de este miembro fue de origen continental con canales fluviales sinuosos y dunas eólicas. (2) El miembro medio está constituido por un paquete de 10-25 m de espesor de areniscas intercaladas con lutitas y limonitas, otro paquete de 12 m areniscas con estratificación cruzada, conglomerado con gradación inversa y areniscas con grava imbricada, laminación paralela y gradación normal, además de un paquete de 12 m de ignimbritas, dichos paquetes fueron depositados en un ambiente marino transicional, en una zona entre playa y costa fuera. (3) El miembro superior consiste en secuencias con gradación normal e inversa de conglomerados intercalados con arenisca, limonita y lutita, con espesor de 35 m, y depositadas en un ambiente no marino, al haber evidencias de canales fluviales y llanuras de inundación.

Unidad clástica inferior

La unidad clástica inferior está descrita por Umhoefer et al. (2001) como una secuencia de areniscas fluviales y eólicas, con cuarzofeldespatos de grano fino a medio con abundantes pellets y conglomerados, intercalados con láminas delgadas de ceniza que en su conjunto presentan una coloración rojiza-ocre, así mismo, se clasifica como parte del Grupo Comondú. Por otro lado, Durán-Calderón (2016) la clasifica como parte del Grupo Pre-Comondú por sus similitudes en los clastos de arenisca con dicho grupo y por sus diferencias en el estilo eruptivo con rocas del Grupo Comondú, ya que el Gpo. Pre-Comondú presenta una composición silíceo a diferencia de los depósitos del Grupo comondú que son de composición intermedia a máfica. Su fechamiento es de 24.8 ± 1 Ma en cristales de circón (Durán-Calderón, 2016). Umhoefer et al. (2001) consideran a la Fm. El Salto como parte de la unidad clástica inferior.

2.4.3 Grupo Comondú

Unidad intermedia de brecha y flujo de lava

La unidad intermedia consiste de brechas masivas andesíticas, interestratificadas en menor cantidad con flujos andesíticos y en menor proporción de pórfidos andesíticos y basaltos, con edades aproximadas de 19 Ma y espesores de 450-750 m (McFall, 1968; Umhoefer et al., 2001). Esta unidad aflora predominantemente en el área de Loreto y podría correlacionarse con la Formación Pelones, propuesta por McFall (1968).

Unidad superior de flujo de lava y de brecha

La unidad superior descrita por Umhoefer et al. (2001) consiste en flujos de lava andesíticos y brecha masiva andesítica, toba en poca proporción, además se encuentran dos familias de diques andesíticos de 40 m y hasta de 7 km de largo que cortan las unidades inferiores, la unidad superior presenta edades de 15-12 Ma y un espesor de 600 m. Se diferencia de la unidad media por la gran proporción de flujos de lava.

2.4.4 Formación Santa Lucía

La Formación Santa Lucía consiste en estratos masivos o caóticos de fragmentos de lava subredondeados a angulares, embebidos en una matriz de ceniza fina soldada, con otros fragmentos de lava porfirítica con feldespatos alcalinos, anfíbol y fenocristales de cuarzo. Las rocas de la Formación Santa Lucía afloran al SSE del Complejo Volcánico Tres Vírgenes y abarcan un área cercana de 29 km² con espesores de entre 140-360 m (Avellán et al., 2019), se ha fechado a esta formación con edades de 21.59 ± 0.29 Ma de cristales de circonio (Avellán et al., 2018). Avellán et al. (2019) reportan a esta formación como la parte superior del Grupo Comondú, para este estudio se tomará como una formación aparte por su gran espesor.

2.4.5 Basalto Esperanza

El Basalto Esperanza aflora al SO y S del Volcán La Virgen donde forma mesetas erosionadas (Avellán et al., 2019). Constituido por basaltos toleíticos cuya edad fue reportada en 7.64 ± 1.2 (Macías et al. 2012), datados por medio de $40\text{Ar}/39\text{Ar}$. Gran parte de su extensión está cubierta por pómez proveniente de erupciones plinianas en el Volcán La Virgen.

2.4.6 Cuenca Santa Rosalía

La Cuenca de Santa Rosalía está limitada al NNO por el Complejo Volcánico de las Tres Vírgenes y la Caldera La Reforma del Plioceno, ambos del Plioceno, al OSO por las rocas del Grupo Comondú que conforman a la Sierra Santa Lucía con edades del Mioceno medio y al este por el Golfo de California. Está conformada por secuencias

sedimentarias que se agrupan en 4 formaciones:

Formación El Boleo

La Formación El Boleo tiene un espesor variado de 50 a 250 m y está compuesta por 4 unidades litoestratigráficas principales: (1) Conglomerado continental con depósitos de talud. (2) Horizonte de caliza o encostramiento calcáreo. (3) Lentas de yeso. (4) Alternancia de tobas volcánicas y de conglomerados o areniscas de espesor potente (Ortlieb et al., 1984). Ochoa-Landín et al. (2000) proponen agrupar a la formación en tres miembros, de base a cima: caliza, yeso y miembros clásticos. Esta formación está bien estudiada desde la década de los 50's, dado el interés de explotación minero para la extracción de cobre y manganeso. Ortlieb et al. (1984) asignan a esta formación una edad del Mioceno tardío basado en una correlación litoestratigráfica con la Formación Loreto ubicada 100 km al S de Santa Rosalía, la cual tiene una microfauna y está cortada por diques andesíticos de hace 6 a 7 Ma.

Formación La Gloria

La formación se encuentra a 7 km de Santa Rosalía, tiene un espesor de 60 m y está constituida principalmente por arenas marinas fosilíferas, que cambian gradualmente en dirección SO a conglomerados litorales y deltáicos para después estar compuesta por material continental (Ortlieb et al., 1984). Es discordante a la Formación El Boleo y en algunas zonas sobreyace discordantemente a la Formación Comondú (Wilson & Rocha Moreno, 1955). Con un análisis de nanofauna se determinó a esta formación de una edad mínima al Plioceno temprano (Ortlieb et al., 1984), por otro lado con el estudio de fauna de tiburones realizado por Applegate et al. (1981) se determinó que tiene edades del Plioceno medio.

Formación Infierno

La Formación Infierno fue descrita por primera vez por Wilson (1948), está constituida por arenas marinas fosilíferas que cambian lateralmente hacia el SO a un conglomerado con clastos de origen continental. En la cercanía con la Caldera La Reforma la formación está compuesta por capas interestratificadas de tobas y de fragmentos de pómez (Demant, 1984). El espesor de la formación aumenta, de 25 m en la zona NO de la cuenca de Santa Rosalía, crece a 100 m hacia el SE. De acuerdo a diferentes estudios paleontológicos se puede interpretar que la formación tiene una edad del Plioceno tardío (Ortlieb et al., 1984).

Formación Santa Rosalía

La Formación Santa Rosalía está constituida principalmente por arenas y conglomerados fosilíferos, poco consolidados, de facies litoral, cambia lateralmente a brechas y conglomerados continentales, el espesor varía con un total aproximado de 15 m. Corresponde a una transgresión marina de corta duración, en comparación con las Formaciones Bolo, Gloria e Infierno. Su extensión lateral es extensa y en la parte noroccidental de la cuenca, la formación está cubierta por algunos metros de tobas asociadas a una gran erupción ignimbrítica de la estructura volcánica de La Reforma. Se interpreta la edad de esta formación como del Pleistoceno temprano por el fechamiento relativo con respecto a unas terrazas marinas que la sobreyacen y los restos marinos embebidos en la formación son de cerca de 1 Ma (Ortlieb, 1981b, 1982).

2.4.7 Caldera La Reforma

La Caldera La Reforma se encuentra al este del valle, limita al E con el Golfo de California y al N con el Complejo Volcánico Aguajito. Se han descrito 12 unidades las cuales están clasificadas en 3 fases (pre-caldera, caldera y pos-caldera). El grupo pre-caldera está constituido por hialoclastitas, domos de lava, depósitos piroclásticos y depósitos sedimentarios correlacionables a las rocas de la Cuenca de Santa Rosalía. La etapa de caldera está caracterizada por rocas principalmente ignimbríticas, depósitos piroclásticos y secuencias de lava. Finalmente, al grupo pos-caldera le constituyen rocas clásticas asociadas a la erosión del resurgimiento de la caldera, rocas plutónicas, conos de escoria, domos y flujos de lava (García-Sánchez et al., 2019).

2.4.8 Complejo Volcánico Aguajito

El Complejo Volcánico Aguajito está compuesto por rocas piroclásticas, ignimbríticas y por domos riolíticos. Garduño-Monroy et al. (1993) describen a este complejo como parte de una caldera en etapa de resurgimiento, toman como evidencia una alineación de domos riolíticos al norte y al sur de la Sierra Aguajito que comprendería la zona de la falla radial, además de que estos domos son más jóvenes que la ignimbrita depositada durante una etapa pre-colapso y del hecho de que afloran las rocas volcánicas de Santa Lucía en el centro de la Sierra dado su colapso del edificio volcánico. Las rocas del Complejo Volcánico de Aguajito están datadas en 0.5 y 0.7 Ma (Garduño-Monroy et al., 1993), otros fechamientos apuntan a edades de 1.17 ± 0.07 Ma de las ignimbritas (Schmitt et al., 2006).

2.4.9 Complejo Volcánico Tres Vírgenes

El Complejo Volcánico Tres Vírgenes está constituido por tres estructuras volcánicas del Pleistoceno medio y superior: El Viejo, El Azufre y La Virgen, representa la actividad volcánica más joven (<300 ma) del Valle de Tres Vírgenes. Este complejo tiene

una composición principalmente dacítica-andesítica y está compuesta principalmente de coladas de lava y domos (Avellán et al., 2019). Tiene como rasgo característico una alineación NNE-SSO, la cual coincide con la Falla Cimarrón y además dicha alineación coincide con el orden cronológico de su aparición, en sentido N-S, de más viejo a más joven.

Volcán El Viejo

Es el volcán más antiguo del Complejo Volcánico Tres Vírgenes, está ubicado al SO del Complejo Aguaquito y los separa la Falla El Azufre. Está constituido de viejo a más joven: por un domo inferior Viejo de lava dacítica (LVdld), domo de lava Puerta (Pdld), domo superior Viejo de lava dacítica (UVdld) datado en 254 ± 24 kya, depósitos de escombros de avalancha Viejo (Vda) datados en $245 \text{ /pm/} 39$ kya (Avellán et al., 2019).

Volcan El Azufre

El Volcán El Azufre es el segundo edificio volcánico en aparecer del Complejo Volcánico Tres Vírgenes, está ubicado entre el Volcán El Viejo y El Volcán La Virgen. Está constituido por dos unidades: Un flujo de bloques y cenizas de Azufre (Abaf) datada en 146 ± 27.8 kya y el domo central dacítico Azufre (Adcd) datado en 153.9 ± 32 kya (Avellán et al., 2019).

Volcán La Virgen

El Volcán La Virgen es la estructura más joven y alta del Complejo Volcánico Tres Vírgenes. Está constituida por 13 unidades volcánicas: Colada de lava andesítica Cueva de Gel (CGal) datada en 112 ± 26 , cuello volcánico andesítico (Van), lava andesítica Pintos inferior (LPal) datada en 110.6 ± 43 kya, lava andesíticas superiores Pintos (UPal) datada en 103.8 ± 12 , cono de lava dacítico Virgen (Vdlc) datado en 102 ± 30 , lava andesítica Virgen inferior (LVal) datada en 89.8 ± 9.6 , lava dacítica Pintos (Pdl) datada en 89.6 ± 11.9 , Domo dacítico Pinto (Pdcd) datado en 61 ± 7 , domo central dacítico Virgen (Vdcd) datado en 51 ± 8.7 , domo de lava dacítica Mezquital (Mdld) datado en 46 ± 3.2 , domo de lava dacítica Virgen (Vdld) datado en 41 ± 6 , Tefra Virgen (VT) datada en 30.7 ± 1.8 y lava andesítica Virgen superior (UVal) datada en 22 ± 2.5 (Avellán et al., 2019).

2.4.10 Depósitos de escombros de caída, caída de ceniza y aluvión

La unidad comprende los sedimentos sin consolidar originarios de la erosión y de las erupciones volcánicas de los edificios volcánicos que limitan a las zonas bajas que comprenden parte del Valle Las Vírgenes.

Era	Periodo	Época	Columna	Unidad Litoestratigráfica	Descripción Litológica	
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno		Depósitos recientes	100 m Aluvión, flujos de ceniza y depósitos de flujo de escombros	
		Pleistoceno		Volcán La Virgen	Coladas de lava andesítica-dacíticas y domos dacíticos (112-22 ka; Avellán et al., 2019)	
				Volcanes El Viejo/ Azufre	Domos dacíticos, depósitos de escombros de avalancha y flujo de bloques y cenizas (254-153 ka; Avellán et al., 2019)	
				Complejo Volcánico Aguajito	Rocas piroclásticas, ignimbritas y domos riolíticos (1.17-0.5 Ma; Avellán et al., 2019)	
	Neógeno	Mioceno	Plioceno		Formación La Gloria	60 m Rocas sedimentarias de origen marino y continental (Cuenca Sta. Rosalía)
					Basalto Esperanza	100 m Basalto de composición toleítica (7 Ma; Avellán et al., 2019)
					Formación Santa Lucía	140-360 m (Avellán et al., 2019) Estratos masivos o caóticos de fragmentos de lava subredondeados a angulares embebidos en una matriz de ceniza fina soldada (21 Ma; Avellán et al., 2019)
					Grupo Comondú	Unidad superior de flujo de lava y brecha: 600 m Unidad intermedia de brecha y flujo de lava: 750 m (Umhoefer et al., 2001) Brechas masivas andesítica con flujos andesíticos y toba Unidad superior de flujo de lava y brecha (15-12 Ma) Unidad intermedia de brecha y flujo de lava (19 Ma) (Umhoefer et al., 2001)
					Grupo Pre-Comondú	El Salto: 102 m Unidad clástica inferior: 300 m Secuencias de areniscas predominantemente compuestas por fases minerales, intercaladas con depósitos de toba (30-19 Ma; Ocampo-Díaz et al., 2021)
					Hiatus	
Mesozoico	Cretácico	Superior		Basamento	Granito, granodiorita y cuarzo-monzonita (99.1 Ma; Macías et al., 2012)	

Figura 2.4: Columna Estratigráfica del Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes.

2.5 Sistemas Estructurales

El área de estudio esta caracterizada por una morfología de tipo de cuencas y sierras, predominante en la Península de Baja California. Las estructuras que se presentan en la región tienen una fuerte relación con la apertura del Golfo de California, son sistemas estructurales que se formaron bajo un régimen transtensivo.

Se reconocen tres sistemas estructurales predominantes: NO-SE, N-S y NE-SO. El sistema NO-SE esta asociado a la apertura del Protogolfo de California (Macías et al., 2012) y es el sistema que registra una actividad más profunda (>5km) (Chacón-Hernández et al., 2021), está conformado por las Fallas El Azufre, El Volcán, El Viejo 1, El Viejo 2, La Reforma, Mezquital, Bonfil y la Virgen. Son las Fallas El Azufre, La Reforma, El Mezquital y Bonfil las fallas de mayor relevancia regional. El segundo sistema lo componen fallas laterales regionales de dirección NNO-SSE y NO-SE (F. Bonfil) de tipo derecha y estructuras NE-SO con componente normal (Falla Cimarrón), este sistema está asociado al modelo Riedel.

Se ha identificado que las Fallas Mezquital, Bonfil y Campamento son fallas nor-

males con componente lateral, mientras que la Falla La Reforma es predominantemente una falla lateral derecha con una mínima componente vertical (Antayhua-Vera et al., 2015). Antayhua-Vera et al. (2015) demostraron que la mayor sismicidad se localizaba en las áreas cortadas por las Fallas El Azufre, El Partido y La Reforma.

Capítulo 3

Modelo Conceptual Hidrogeológico en el Campo Geotérmico de Tres Vírgenes

3.1 Dominio y Geometría del Sistema

El área de estudio se localiza dentro del acuífero administrativo Las Vírgenes (Figura 3.1), el cual abarca un área de 1447.1 km². El Campo Geotérmico de Tres Vírgenes se encuentra en una zona tectónica conocida como "Cuencas y Sierras", donde el sistema estructural está predominantemente asociado a la apertura del Golfo de California. Dicho sistema estructural ha conformado una geometría de valle tectónico donde se originaron las siguientes Unidades Hidroestratigráficas: 1) El acuífero libre contenido en los depósitos recientes de los valles con espesores de hasta 100 m. 2) Una Zona Impermeable contenida en el vulcanismo del Cuaternario (Complejo Volcánico Tres Vírgenes, Caldera Aguajito, Caldera Reforma) y unidades del Neógeno (Cuenca Sta. Rosalía, Fm. Santa Lucía y Gpo. Comondú), la zona impermeable se caracteriza con dichas propiedades físicas dada la intensa alteración hidrotermal que pudiera sellar las fallas y fracturas abiertas, aún pudiendo existir una permeabilidad por fracturamiento o permeabilidad secundaria en estas unidades litológicas, el tiempo de recarga a la zona del reservorio es prolongado, del orden de miles de años. 3) Acuífero profundo contenido en las areniscas del Grupo Pre-Comondú, las cuales se asumen con características de doble porosidad con espesores en el pozo LV-11 de 250 m, como evidencia del alto fracturamiento en la base de las areniscas donde se ha reportado una microbrecha producto de los esfuerzos estructurales, de tal modo que estas condiciones permiten condiciones de flujo profundo.

Cabe destacar que diferentes autores (Ocampo-Díaz et al. (2021), Durán-Calderón (2016), Umhoefer et al. (2001)) han descrito distintos afloramientos de las areniscas del Grupo Pre-Comondú a lo largo del estado de BCS, a partir de lo cual se asume una extensión en los afloramientos de las areniscas de al menos 350 km y un espesor promedio de 250 m. De tal manera, el Gpo Pre-Comondú representa un acuífero con un importante potencial en la región para conformar a un acuífero regional.

Para el presente estudio se consideró una porción de área menor (991 km²) a la

total del acuífero Las Vírgenes, dicha área comprende los rasgos geomorfológicos, estructurales, geológicos más importantes que caracterizan al Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes. En la Figura (3.1) se ilustran los acuíferos contiguos administrados por la CONAGUA, las estaciones meteorológicas y la zona potencial de recarga para el Valle Las Vírgenes.



Figura 3.1: Localización del acuífero Las Vírgenes y acuíferos contiguos de acuerdo a la CONAGUA.

3.2 Geoquímica

La geoquímica del acuífero de Las Vírgenes se reporta con una cantidad de sólidos disueltos entre 845 y 4,161 ppm de las cuales las mayores concentraciones se encuentran cercanas a la costa (Castillo-Palomo, 1995). La composición geoquímica del agua superficial (norias y manantiales) es predominantemente de tipo sulfatada-ácida de acuerdo al diagrama de Giggenbach, con contenido alto en Boro y Sílice, su composición es debido a que el agua más somera absorbe el vapor de origen geotérmico y el H_2S se oxida con la interacción de agua superficial (González-Partida et al. 2001). A partir de un muestreo de agua de manantiales y de pozos domésticos en la cercanía de la zona geotérmica de Tres Vírgenes (Figura 3.2), Portugal et al. (2000) clasificaron las aguas con el diagrama ternario (Figura 3.3) de la siguiente manera:

- **Grupo A (tipo sulfatado)**

Las muestras clasificadas dentro del grupo A se localizan en la parte NNO del

Complejo Volcánico Tres Vírgenes, representan agua diluida con alto contenido en sulfatos. Dentro de las localidades muestreadas se encuentran: Santana, La Palma, San Alberto, El Azufre y Agua Caliente. De acuerdo al diagrama de Giggenbach (Figura 3.3), la muestra de Agua Caliente tiene características de agua calentada por vapor con pH ácido, mientras que el resto de las muestras tienen una componente de mezcla con agua meteórica y un pH neutro a alcalino. El exceso de sulfato se explica por la oxidación del gas H_2S (proveniente de un reservorio profundo) y posterior adición al agua como un sulfato, así mismo, el H_2S aumentó la temperatura del fluido.

- **Grupo B (tipo sódico)**

Se localizan en la parte NE y SE del Complejo Volcánico Tres Vírgenes, tres de las muestras de este grupo (Yaqui, R. Vírgenes y Palmito) se ubican dentro de la cuenca hidrológica que comprende la mayor parte de la zona de estudio. Su composición química representa una mezcla de tres especies dominantes: Na en las muestras R. Vírgenes, Reforma, Palmitas II y Yaqui, $Na-Cl$ en la muestra Mezquite, y $HCO_3 - Na$ en las muestras de Alamo y Palmito. La composición del Grupo B indica poca interacción con los fluidos geotérmicos y están caracterizados como fluidos periféricos.

- **Grupo C (tipo bicarbonatado)**

El Grupo C se localiza principalmente al S y SO del Complejo Volcánico Tres Vírgenes, esta distribuido fuera del área del acuífero Las Vírgenes y de la cuenca hidrológica de Tres Vírgenes. Su composición es de tipo bicarbonatado sin evidencia química de una mezcla con fluido geotérmico o fluido profundo. Tal como el Grupo B, este grupo tiene características de agua periférica de un sistema geotérmico, además de estar separado por el resto de las muestras por la Sierra Santa Lucía que actúa como un partearguas hidrológico.

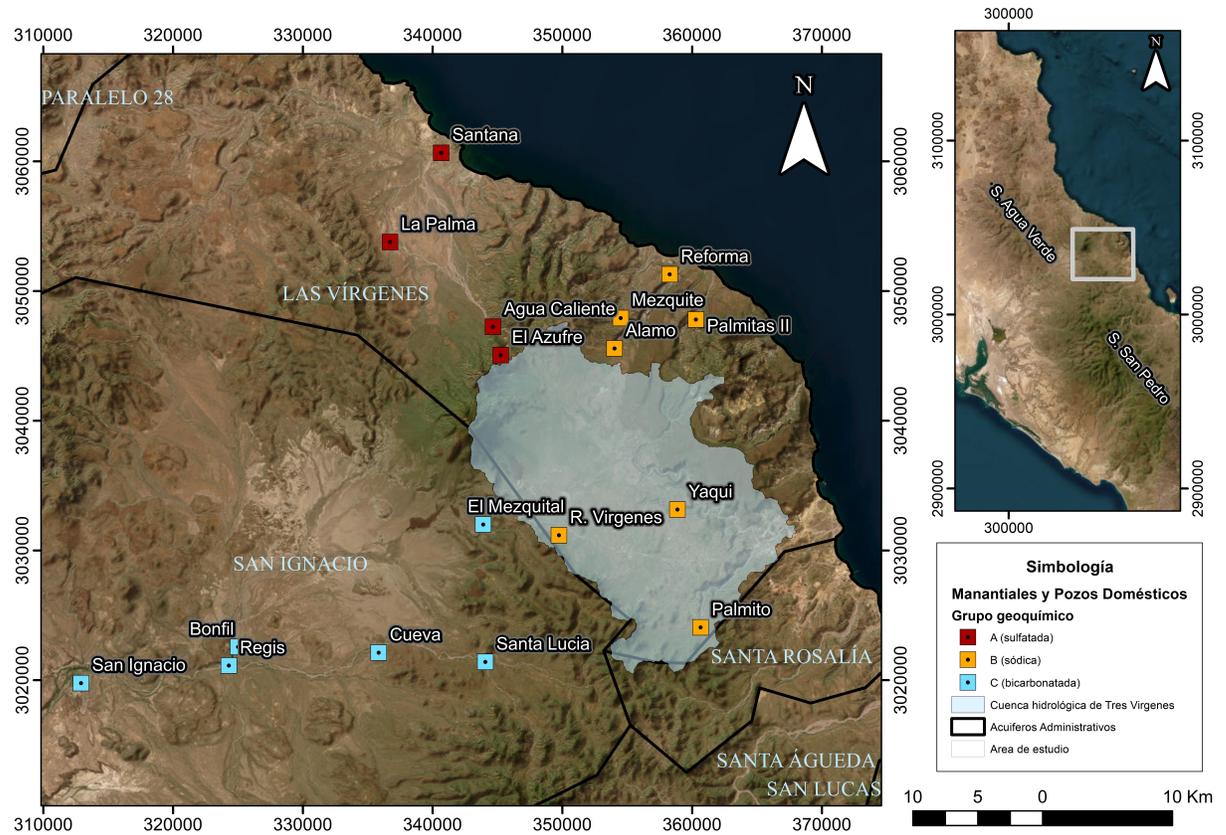


Figura 3.2: Manantiales termales y pozos domésticos con clasificación de acuerdo a su composición geoquímica.

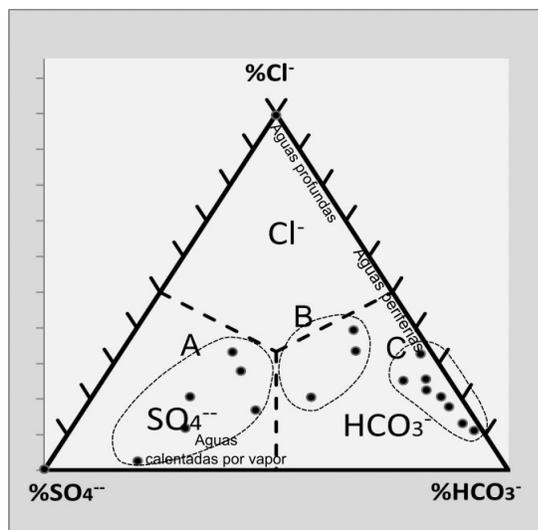


Figura 3.3: Diagrama ternario de $Cl-HCO_3-SO_4$ (modificado de Portugal et al., 2000).

Con respecto al origen de los fluidos geotérmicos se tienen diferentes hipótesis expuestas por distintos autores que han usado diversas técnicas geoquímicas, como herramientas para explicar la procedencia del agua que recarga el reservorio geotérmico. Se ha planteado la posibilidad de que dicho fluido recargó durante el Pleistoceno tardío al Holoceno temprano, de un origen meteórico. Como evidencia, la composición isotópica de los fluidos geotérmicos contiene isótopos de deuterio (δD) y oxígeno ($\delta^{18}O$) más ligeros con respecto al agua de lluvia actual de la Península de Baja California, lo que indica que la recarga al reservorio sucedió durante un periodo de clima más frío y húmedo (Portugal et al., 2000; Pinti et al., 2019), del cual se tiene evidencia que reporta condiciones climáticas más frías y húmedas en la región durante el Pleistoceno tardío (Birkle et al., 2016). En la Figura (3.4) se muestra la composición isotópica de Deuterio y Oxígeno, en donde se graficaron las composiciones de los fluidos geotérmicos de los pozos, la composición de los manantiales termales, de los pozos domésticos, el agua de lluvia actual y la recarga teórica de los fluidos geotérmicos. De acuerdo con Fontes (1980) y Fontes et al. (1976), el punto de intersección entre la Línea Meteórica Mundial (LML) y la regresión lineal de los fluidos geotérmicos representa la composición isotópica del agua que recargó al reservorio geotérmico. De tal manera, se observa una diferencia isotópica de cerca del 20‰, entre el agua de lluvia contemporánea y el agua meteórica fósil, la cual fue más ligera isotópicamente dadas las condiciones climáticas más frías en las que recargó al subsuelo.

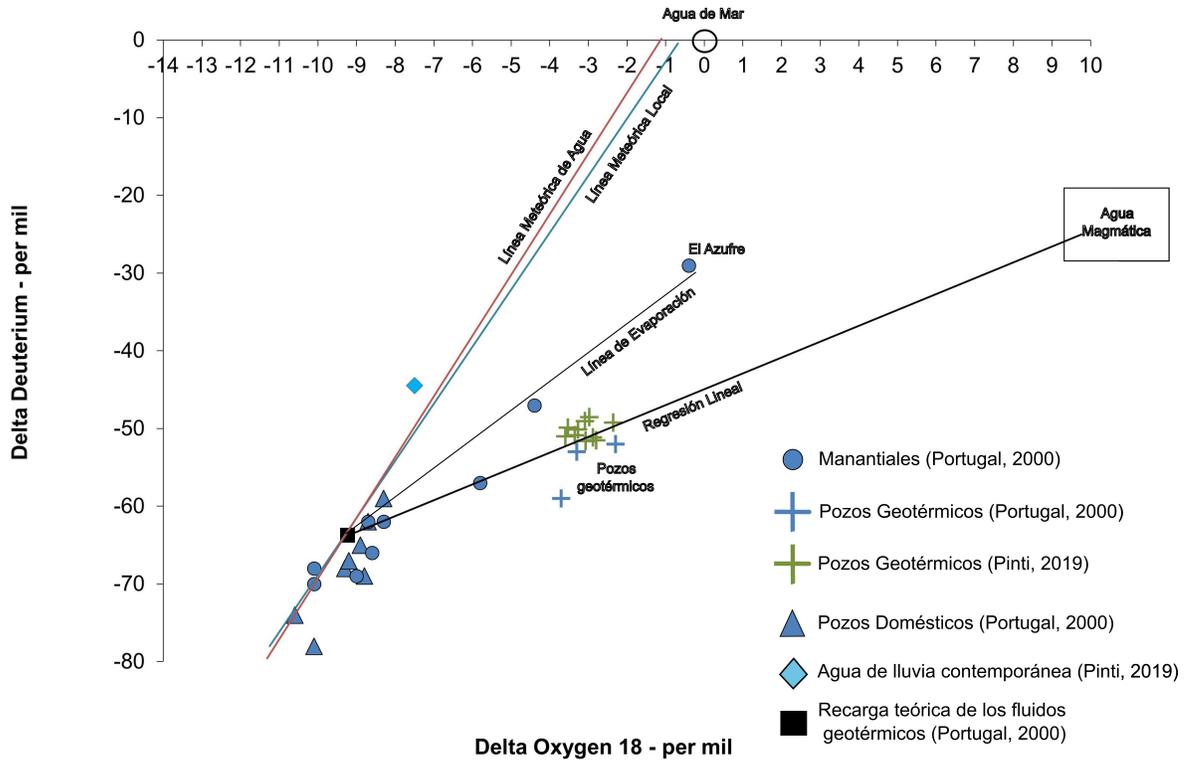


Figura 3.4: Composición isotópica de δD versus $\delta^{18}\text{O}$ de los fluidos del Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes (Portugal et al., 2000; Pinti et al., 2019)

Además, el isótopo ^{14}C en los fluidos geotérmicos indican una edad de recarga entre 8.2 y 13 ka, de los pozos LTV-11 y LTV-4, respectivamente (Portugal, 2000). La hipótesis es consistente con la ocurrencia de la precipitación de los fluidos geotérmicos durante el periodo glacial, del cual se han reportado temperaturas menores a las actuales de 5 a 7 °C en la Cuenca de San Juan durante el Wisconsiniano (Birkle et al., 2016). Así mismo, las mediciones en ^4He sugiere una edad de recarga del fluido de entre 4 y 30 ka y se toma en cuenta el contenido de tritio (^3H), el cual es cercano al límite de detección y que indica ausencia de componente atmosférico en el fluido, lo cual excluye la idea de una recarga reciente de agua de lluvia, de la misma manera que una entrada contemporánea de agua de mar (Birkle et al., 2016).

La elevada presencia de ^{14}C excluyen a los fluidos del reservorio de tener contribución mayor de fluidos magmáticos profundos, se toma como referencia una cantidad de ^{14}C menor a 0.5 pmC en fluidos magmáticos reportados en Geisers, Steamboat Springs y Salton Sea, EUA (Birkle et al., 2010). Por otro lado, la relación isotópica de R/Ra de 6.19 sí es compatible con una componente mantélica, así como también la relación $^4\text{H}/^{20}\text{Ne}$ indica un aporte mantélico del 23% en el pozo LV-13D. Así mismo, se sugiere una posibilidad de que el fluido del reservorio provenga de la dilución de evaporitas, estas precipitadas por evaporación de agua de mar, dado que en el diagrama de Cl/Br

contra Na/Br las aguas del reservorio grafican por encima del campo de agua de mar, lo que señala una disolución de halita como origen de este fluido, o al menos una influencia significativa (Skouakar-Stash, 2008). Sin embargo, se plantea que, si hay aporte de agua por disolución de evaporitas en los fluidos geotérmicos, se debe considerar que en la Cuenca de Santa Rosalía hay presencia de yeso y no de halita, más, si hay presencia de halita en una formación del Mioceno, depositadas antes del rompimiento del Golfo de California (7 Ma) (Pinti et al., 2019). Finalmente, cabe destacar que la composición química del fluido del reservorio cambia frecuentemente por la reinyección de la salmuera, ya que esta se evapora durante el proceso y se vuelve más pesada isotópicamente (δD y $\delta^{18}O$) (Pinti et al., 2019).

Como parte del modelo conceptual del presente trabajo se toma la hipótesis de que el fluido que recargó al reservorio tiene una componente mayor (70 %) de agua que recargó bajo condiciones de un periodo más frío al actual, como ocurrió durante el Pleistoceno tardío. La componente restante de la composición del fluido geotérmico proviene de una fuente magmática, que por mezcla con agua meteórica se redujo en proporción.

3.3 Caracterización hidrogeológica del pozo LV-11

Para la interpretación y entendimiento de los cuerpos acuíferos profundos y del sistema geotérmico se analizó el reporte de perforación del pozo LV-11 (Tabla 1) documentado por Gutiérrez-Negrín et al. (2001), el cual es el pozo con mayor información publicada y abierta al público. El análisis detallado de los cortes litológicos y las variaciones de las propiedades físicas de las unidades de rocas perforadas, es información pertinente para la construcción del modelo conceptual hidrogeológico. En la Figura (3.5) se muestran las profundidades a las cuales hubo un cambio litoestratigráfico importante, a partir de ello se fueron definiendo las diferentes formaciones geológicas que se cortaron durante la perforación. Además, se muestra la intensidad de alteración presente en los testigos rescatados durante la perforación y su mineralogía secundaria. Los intervalos de pérdidas de circulación se relacionan a zonas donde la permeabilidad de la roca perforada es suficiente para que el fluido de perforación se escape por las fracturas y/o poros, para la tabla se consideró integrar los intervalos con pérdidas mayores o cercanas a $70 \text{ m}^3/\text{h}$.

Gutiérrez-Negrín et al. (2001) presentan información sobre la porosidad efectiva media en porcentaje (%), realizado por Schlumberger, de la cual destaca el intervalo 1661-1733 m con una porosidad efectiva de 10.5 % que representa un espesor total de 72 m con porosidad notable, que junto con algunos intervalos cercanos conforman 95 m, entre 1652 y 1746 m con una porosidad media de 9.4 %. Así mismo, para las formaciones de Comondú y Pre-Comondú se consideraron datos de porosidad efectiva de CFE (1993), donde destaca la porosidad efectiva de hasta 19 % del Grupo Pre-Comondú, mayor a la del Grupo Comondú. Las fallas interpretadas de este análisis de pozo fueron descritas como fallas de ángulo alto (80-90 %), con rumbo NNE-SSO y algunas NNO-SSE, con dirección de buzamiento al SE. En los intervalos de profundidad con fracturas abiertas destaca uno de hasta 50 m a la profundidad del intervalo de 1655-1705 m.

A partir de la información sintetizada en la Figura (3.5) se interpretó la estructura del sistema geotérmico y de las unidades hidroestratigráficas. El sistema geotérmico fue caracterizado principalmente por la mineralogía de alteración, mientras que para la caracterización de las unidades hidroestratigráficas se tomaron en cuenta las propiedades físicas de los cortes de pozo y la intensidad de alteración. En los primeros metros del pozo (0-250 m) existe un intervalo de rocas inalteradas, que además por la litología de vulcanismo reciente (Volcán El Viejo) sugiere que es un horizonte impermeable por el posible sellamiento de fracturas, a pesar de la presencia de un intervalo de 20 m de pérdidas de circulación. En el intervalo 250-450 m, la presencia de intervalos de 20 m en las pérdidas de circulación se interpreta como un acuífero fracturado potencial, por el otro lado, la presencia de alteración incipiente podría indicar que forma parte de la parte superior de la capa sello del sistema geotérmico, el cual considera también el intervalo de 450-654 m con una intensidad de alteración de hasta el 60 %. Para el intervalo de 654-804 m se interpreta como la base de la capa sello por la presencia de la clorita y esmectita, así mismo, la presencia de alteración por relleno de cavidades indica poca permeabilidad con la excepción de 10 m de pérdidas de circulación. El intervalo de 804-813 m se interpretó como el techo del reservorio por la presencia de illita, aunque bien pudo haber sido clasificada como la base de la capa sello, sin embargo, por la abundante illita (90 %) se consideró como el techo del reservorio, a pesar de la presencia de la baja porosidad. A partir del intervalo 813-1,065 m se interpreta parte del reservorio, el aumento de intervalos de pérdidas de circulación y la porosidad efectiva considerable nos indica la presencia de un acuífero de porosidad secundaria en las areniscas del Grupo Pre-Comondú, y por la naturaleza de las areniscas se clasifica como un Acuífero de doble porosidad. A partir de la profundidad de 1,065 m, hasta el fondo del pozo se interpreta como un acuífero hidrotermal de porosidad secundaria (Acuífero fracturado), ambos acuíferos profundos (Acuífero de doble porosidad y Acuífero fracturado) conforman el reservorio geotérmico, se ha detallado en la Figura (3.5) los distintos intervalos con datos de porosidad efectiva, fracturas abiertas y fallas que se encuentran en el pozo LV-11.

Profundidad (m)	Litología	Formación	Intensidad de alteración	Mineralogía de alteración	Intervalos de pérdidas de circulación	Porosidad efectiva media (%)	Profundidad de fallas interpretadas (m)	Intervalos de profundidad con fracturas abiertas (m)	Hidroestratigrafía	Sistema Geotérmico
0-250	Andesitas porfiríticas de hornblenda y augita	Volcan El Viejo	Rocas inalteradas		200-220 m	-	-	-	Horizonte impermeable	Zona impermeable
250-450	Andesitas basálticas con piroxeno (enstatita y hiperstena), y piroxeno y basáltivos con olivino.	Formación Santa Lucía	Alteración incipiente		340-360 m	-	-	-	Potencial acuífero fracturado	Capa Sello
450-654			Alteración por reemplazamiento (10-60 %)		-	-	-	-		
654-804 Desviado a los 600 m en dirección 560°O	Andesitas piroxénicas con intercalaciones de areniscas	Grupo Comondú	Alteración por relleno de cavidades en andesita (20-60%)	calcita, cuarzo, clorita/smectita, hematita y montmorillonita	785-795 m	0.4%	-	-	Horizonte Impermeable	Base de la Capa Sello
804-813	Ignimbritas vitrificadas		Alteración illita (90%)	illita	-	-	-	-		Techo del Reservorio
813-1044	Areniscas fosforíticas con intercalación de andesitas y paleosuelos en la base	Grupo Pre-Comondú	Alteración por reemplazamiento del cementante (50 %)	calcita, montmorillonita y hematita	935-945 m; 980-988 m; 1000-1010 m;	19.9%	-	-	Acuífero de doble porosidad	Reservorio
1044-1065			Alteración de relleno y reemplazamiento (50%)	illita cuarzo, calcita y pirita	-		-	-		
1065-1572	Granodiorita con biotita y hornblenda, a granodiorita a augita hasta el fondo.	Basamento	Epidota incipiente desde 1206 m de profundidad		1143-1150 m; 1180-1188 m; 1240-1270 m;	6.3 % (1433 m); 5.7 % (1465 m); 7.2 % (1513 m);	-	-	Acuífero Fracturado	
1572-1808			Fracturas y fallas alteración (50%)	illita, calcita, clorita cuarzo y pirita y epidota (desde 1206 m)	1570-1580 m; 1599-1610 m; 1610-1686 m; 1686-1750 m;	5.6 % (1627 m); 5.8 % (1651 m); 5.9 % (1655-1657 m); 10.5 % (1661-1733 m); 7.7 % (1739-1745 m); 9 % (1761 m); 7.6 % (1799 m); 10.1 % (1861 m);	1660, 1707, 1754, 1804	1600-1605; 1655-1705;		
1808-2081			Alteración variable: relleno y reemplazamiento			1810-1900 m; 2020-2081 m;		1829 m		1850-1855; 1873-1878;

Figura 3.5: Análisis hidrogeológico del pozo LV-11 de la CFE.

3.4 Modelo Conceptual Hidrogeológico

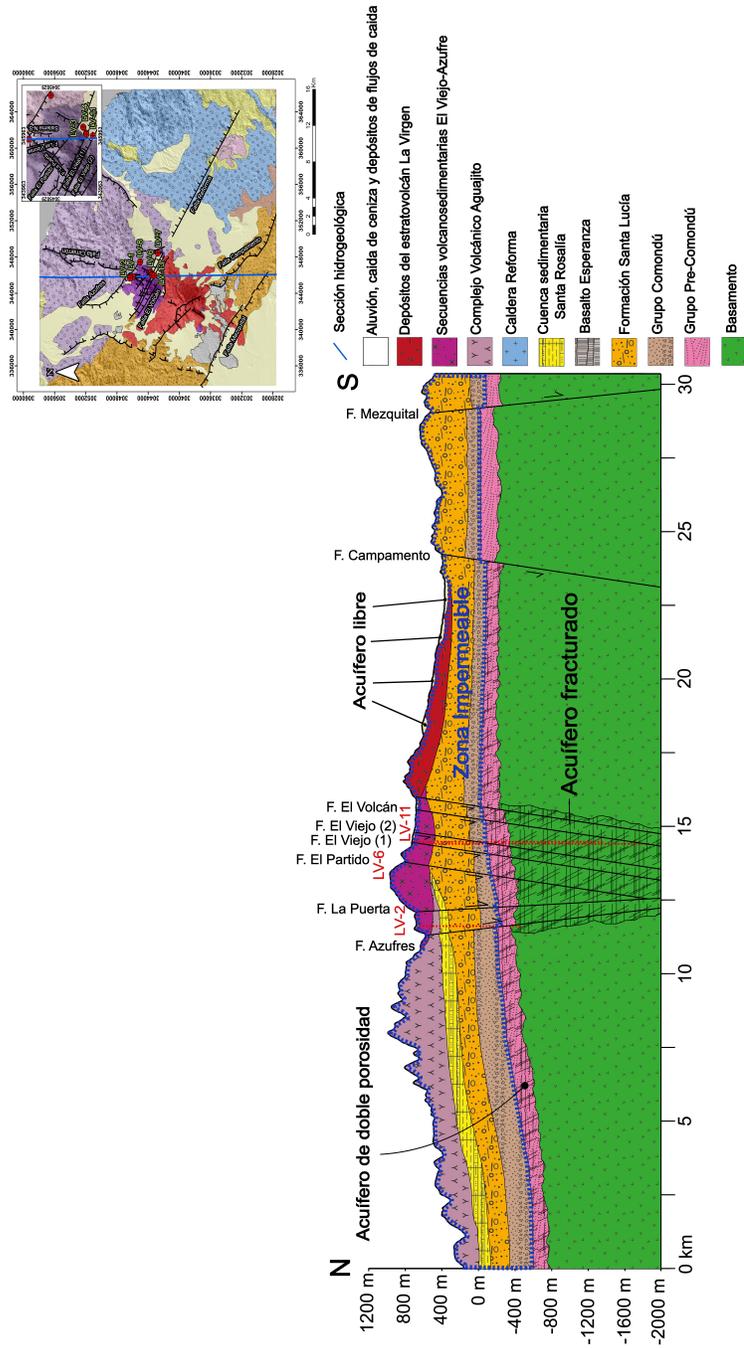
El modelo hidrogeológico propuesto indica que la recarga al reservorio proviene de dos orígenes: 1) Del agua fósil que se infiltró hace miles de años y que se almacenó en el Batolito Peninsular y en las areniscas del Grupo Pre-Comondú que conforma un Acuífero de doble porosidad. 2) De una fuente magmática profunda que aporta el fluido geotérmico por medio de las fallas normales de rumbo NO-SE. Hay factores a considerar, dado que los análisis químicos reportan que la composición no señala una contribución mayor del fluido magmático, se puede pensar que hubo una fuerte mezcla de agua meteórica del Pleistoceno tardío, hoy agua fósil, con los fluidos geotérmicos. Así mismo, se considera que la alta presencia de iones mayores de Na y Cl con respecto al Br, puede deberse a una interacción agua-roca prolongada a temperaturas altas, dado que la combinación de agua de mar y agua meteórica no puede reproducir la composición isotópica medida en los fluidos del reservorio.

Por otra parte, la distinción entre el Grupo Comondú y el Grupo Pre-Comondú aporta detalle en la estratigrafía y en la discretización de unidades hidroestratigráficas. El Grupo Pre-Comondú posee características físicas de carácter más permeable que las unidades del Grupo Comondú, como se hace mención en la Figura (3.5), la descripción

del Grupo Pre Comondú es de carácter clástico con intercalación de andesitas, en donde los valores de porosidad efectiva que se reportaron contrastan del Gpo. Comondú, siendo estos de 19.3 % (CFE, 1993). Además, en el reporte de perforación del pozo LV-2 se reconoce a la base del Grupo Pre-Comondú como una zona de alto fracturamiento, denominada microbrecha. Por lo tanto, se considera que tanto el basamento como las areniscas del Grupo Pre-Comondú fueron sometidos a grandes esfuerzos tectónicos, es importante considerar que el Basamento granítico por sí solo carece de permeabilidad y es gracias a las fallas y fracturas que aumentan su permeabilidad (Gutiérrez-Negrín et al., 1990).

El sistema acuífero en el Campo Geotérmico de Tres Vírgenes lo conforman por las siguientes unidades hidroestratigráficas: 1) Un acuífero libre comprendido en los depósitos recientes que rellenan el valle de Tres Vírgenes con espesores máximos de 100 m. 2) La zona impermeable, clasificada así por diversas consideraciones, una de ellas por presencia de vulcanismo del Neógeno y Cuaternario con fracturas selladas por el vulcanismo, la segunda considera que si hubiera aún fracturas permeables el fluido subterráneo tomaría decenas de miles de años en llegar al reservorio, y por último por la presencia de una capa sello caracterizada por alteración hidrotermal intensa, que reduce considerablemente la permeabilidad. 3) Acuífero de doble porosidad en las secuencias de areniscas del Grupo Pre-Comondú con espesores de 250 m (según el pozo LV-11) y una extensión regional (cercano a 350 km). 4) Acuífero fracturado comprendido en las rocas graníticas del Batolito Peninsular, donde en los primeros 1,000 m se almacena el recurso geotérmico actualmente explotado.

La disposición del acuífero de doble porosidad encima del acuífero fracturado profundo, conforma la zona de mezcla de agua fósil con fluido geotérmico, ya que hay una conexión hidráulica entre ambos acuíferos. En las areniscas y parte del Batolito Peninsular circula agua meteórica fósil y a partir de las fallas NO-SE y las fracturas asociadas propician las condiciones del flujo subterráneo profundo, por donde asciende el fluido magmático desde una fuente de calor a una profundidad de 8 km (Figura 3.6). Se considera, además, que el acuífero libre comprendido en los depósitos recientes no está conectado a los acuíferos más profundos, por lo que las precipitaciones anuales contemporáneas recargan en volúmenes escasos al reservorio, y que el volumen de producción de 3.096 millones de m³ proviene en mayor medida del sistema acuífero profundo comprendido en las areniscas del Grupo Pre-Comondú y parte de las rocas graníticas del Batolito Peninsular.



Sección Hidrogeológica del Campo Geotérmico Las Tres Virgenes

Figura 3.6: Modelo Hidrogeológico del Campo Geotérmico Las Tres Virgenes.

Capítulo 4

Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

1.- De acuerdo al modelo hidrogeológico propuesto, parte de la hipótesis es que la recarga al reservorio proviene de dos orígenes: 1) Agua fósil que se infiltró hace miles de años y que se almacenó en el basamento y en areniscas del Gpo. Pre-Comondú que conforman un sistema acuífero profundo, un Acuífero Fracturado y un Acuífero de doble porosidad, respectivamente. 2) Una fuente magmática profunda que aporta el fluido geotérmico por medio de las fallas normales de rumbo NO-SE. Dado que los estudios geoquímicos no reportan una componente mayor del fluido magmático, se puede plantear una fuerte mezcla del agua meteórica del Pleistoceno tardío, hoy agua fósil, con los fluidos geotérmicos.

2.- Se considera que los depósitos volcánicos más jóvenes funcionan como horizontes impermeables, por tres razones: 1) La actividad volcánica que se asume activa, sella las fracturas y fallas. 2) El tiempo prolongado que le toma al flujo subterráneo somero en llegar al reservorio geotérmico. 3) La intensa alteración hidrotermal que genera condiciones de impermeabilidad.

3.- La caracterización litológica del Gpo. Pre-Comondú y Comondú en el pozo LV-11 de la CFE, permitió señalar distinciones en sus propiedades físicas que caracterizan al Grupo Pre-Comondú como una roca de doble porosidad.

4.2 Recomendaciones

1.- Se propone realizar un estudio hidrogeológico regional que ayude a caracterizar las rocas que posiblemente recarguen al campo geotérmico, aporte información para estimar la recarga durante la temporada de huracanes, estos cada vez más frecuentes. Además el estudio permitiría plantear un balance del agua subterránea, esto con la finalidad de conocer la recarga natural del Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes.

2.- Es recomendable caracterizar las diferencias petrológicas entre el Grupo Comondú y Pre-Comondú con la información de cortes de todos los pozos perforados por la CFE en Campo Geotérmico de Las Tres Vírgenes, con la finalidad de contar con información más precisa de sus parámetros físicos en el reservorio y hacer una mejor estimación del recurso geotérmico contenido en las areniscas del Grupo Pre-Comondú .

3.- Se sugiere realizar un modelo numérico hidrogeológico que cuente con el soporte de datos de campo para entender las condiciones hidrogeológicas que recargan al campo geotérmico y la dinámica del flujo subterráneo en el sistema acuífero profundo.

Bibliografía

Antayhua-Vera, Y. T., Lermo-Samaniego, J., Quintanar-Robles, L., & Campos-Enríquez, O. (2015). Seismic activity and stress tensor inversion at Las Tres vírgenes volcanic and geothermal field (México). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 305, 19-29.

Antayhua-Vera, Y. T., Zuñiga, F. R., Lermo-Samaniego, J., Campos-Enríquez, J. O., Quintanar-Robles, L. (2022). Spatio-temporal distribution of the b-value in the volcanic complex and geothermal field of Tres Vírgenes; Baja California Sur, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 116, 103864.

Applegate, S. P., Espinoza-Arrubarrena, L. (1981). The geology and selachian paleontology of Loma del Tirabuzón (Corks-crew Hill), Santa Rosalía, B. C. S. *Geology of northwestern Mexico and southern Arizona, field guides and papers*, L. Ortlieb, J. Roldán (eds.), Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología (Hermosillo) p. 257-263.

Avellán, D. R., Macías, J. L., Layer, P. W., Cisneros, G., Sánchez-Núñez, J. M., Gómez-Vasconcelos, M. G., Pola, A., Sosa-Ceballos, G., García-Tenorio, F., Reyes Agustín, G., Osorio-Ocampo, S., García-Sánchez, L., Mendiola, I. F., Marti, J., López-Loera, H., & Benowitz, J. (2019). Geology of the late Pliocene – Pleistocene Aocolco caldera complex, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt (México). *Journal of Maps*, 15(2), 8–18. <https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1531075>.

Ballina, L., H. R. & Herrera, B., F.. (1984). Estudio geofísico de la zona geotérmica de Tres Vírgenes, B.C.S., Comisión Federal de Electricidad, México, G.P.G., internal report 20184, 28p. Birkle, P., Marín, E. P., & Barragán Reyes, R. M. (2010). Chemical-Isotopic Evidences for the Origin and Evolution of Geothermal Fluids at the Las Tres Vírgenes Geothermal Field, B.C., NW-Mexico. *World Geothermal Congress, Bali, Indonesia*.

Birkle, P., Marín, E. P., Pinti, D. L., & Castro, M. C. (2016). Origin and evolution of geothermal fluids from Las Tres Vírgenes and Cerro Prieto fields, Mexico – Co-genetic volcanic activity and paleoclimatic constraints. *Applied Geochemistry: Journal of the International Association of Geochemistry and Cosmochemistry*, 65, 36–53. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.10.009>.

Bohannon, R. G., Parsons, T. (1995). Tectonic implications of post-30 Ma Pacific and North American relative plate motions. *Geological Society of American Bulletin*, 107 (8), 937-959.

Busby, C. (2004). Continental growth at convergent margins facing large ocean basins: a case study from Mesozoic convergent-margin basins of Baja California, México. *Tectonophysics*, 392 (1-4), 241-277.

Casallas-Moreno, K. L., González-Escobar, M., Gómez-Arias, E., Mastache-Román, E. A., Gallegos-Castillo, C. A., & González-Fernández, A. (2021). Analysis of subsurface structures based on seismic and gravimetric exploration methods in the Las Tres Vírgenes volcanic complex and geothermal field, Baja California Sur, Mexico. *Geothermics*, 92(102026), 102026. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.102026>.

Castillo-Palomo, J. J. (1995). Condiciones Geohidrológicas en el Estado de Baja California Sur. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

CFE. (1993). Informe final del sistema hidrogeológico regional de la zona geotérmica de las Tres Vírgenes, B.C.S., Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Internal report OGL/TV/001/93, 82 pp.

CFE. (2009). Estudio de resistividad electromagnética en zonas geotérmicas del noroeste de México (Norte del Volcán Partido en C. G. Las Tres Vírgenes, B. C. S.). Gerencia de Estudios Geotermoeléctricos, Departamento de Exploración, CFE. Reporte DEX-DGF-TKTVPL-10-09.

Chacón-Hernández, F., Zúñiga, F. R., Campos-Enríquez, J. O., Lermo-Samaniego, J., & Jiménez-Méndez, N. (2021). Analysis of shear wave splitting anisotropy in the Tres Virgenes Volcanic Complex, Baja California Sur, Mexico. *Geothermics*, 94(102115), 102115. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102115>.

Conagua. (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Las Vírgenes (0338), Estado de Baja California Sur. Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas. Ciudad de México, México.

Curray, J. R., Moore, D. G. (1984). Geologic history of the mouth of the Gulf of California, In: Crouch, J. K., Bachman, S. B., (Eds), *Tectonics and sedimentation along the California margin*, 38, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section, p. 17-36.

Demant, A. (1984). The Reforma caldera, Santa Rosalia area, Baja California. A vulcanological, petrographical and mineralogical study.

Durán-Calderón, Juana I. (2016). Estratigrafía Regional Y Significado Tectónico del Grupo Comondú en Baja California Sur, México. (Tesis de Maestría). Universidad

Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Engebretson, D. C., Cox, A., & Gordon, R. G. (1985). Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin.

Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Bryan, S. (2005). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 343-378.

Ferrari, L., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, M. T., Bryan, S. E., Duque-Trujillo, J., Lonsdale, P., y Solari, L. (2013). Late Oligocene to middle Miocene rifting and syn-extensional magmatism in the southwestern Sierra Madre Occidental, México: the beginning of the Gulf of California rift. *Geosphere*, v. 9, n. 5, p. 1161-1200.

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S. E., Lopez-Martinez, M., & Silva-Fragoso, A. (2018). Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift. *Earth-Science Reviews*, 183, 115-152.

Fontes, J. C., & Zuppi, G. M. (1976). Isotopes and water chemistry in sulphide-bearing springs of central Italy. In *Interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology*.

Fontes, J. C. (1980). Environmental isotopes in groundwater hydrology. In *Handbook of environmental isotope geochemistry*. Vol. 1.

García, E., G. H., (1993). Interpretación magnetométrica y gravimétrica de la zona geotérmica de Tres Vírgenes, B.C.S., C.F.E.-G.P.G., internal report: OGF/TV/001-93, 25p. García Sánchez, L., Macías, J. L., Sulpizio, R., Osorio-Ocampo, L. S., Pellicoli, C., Pola, A., Avellan, D. R., Cisneros, G., García, F., Ocampo-Díaz, Y. Z. E., Lira-Beltran, R. M., Saucedo, R., Sánchez-Núñez, J. M., Arce, J. L., Corona-Chávez, P., Reyes-Agustin, G., Cardona, M., Layer, P. W., Benowitz, J., ... Groppelli, G. (2019). Geology of La Reforma caldera complex, Baja California, Mexico. *Journal of Maps*, 15(2), 487–498. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1612287>.

Garduño-Monroy, V. H., Vargas-Ledezma, H., & Campos Enriquez, J. O. (1993). Preliminary geologic studies of Sierra El Aguajito (Baja California, México): resurgent-type caldera. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59, 47-58.

Gastil, G., Krummenacher, D., Minch, J. (1979). The record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California. *Geological Society of America Bulletin*, 90(9), 839-857.

George, P. G., Dokka, R. K. (1994). Major Late Cretaceous cooling events in

the eastern Peninsular Ranges, California, and their implications for Cordilleran tectonics, *Geological Society of America Bulletin* 106, 903-914. González-Partida, E., Tello-Hinojosa, E., & Verma, M. P. (2001). Características geoquímicas de las aguas del reservorio del sistema hidrotermal actual de Las Tres Vírgenes, Baja California, México. *Ingeniería*, XVI(1), 47-56.

Gutiérrez-Negrín, L.C. & López, M. A. (1984). Emanometría de radón en la zona geotérmica de las Tres Vírgenes, B.C.S. C.F.E.-G.P.G. internal report:12/84, 12p. Gutiérrez-Negrín, L. C. A., Guerra, V., Flores-Armenta, M. (2001). Characteristics and production results of the well LV-11, Las Tres Vírgenes, México, *Geothermal Resour. Council Trans.* 25, 635-640.

Hausback, B. P., 1984. Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur, México.

Ochoa-Landín, L., Ruiz, J., Calmus, T., Segura, E. P., & Escandón, F. (2000). Sedimentology and Stratigraphy of the Upper Miocene El Boleo Formation, Santa Rosalía, Baja California, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 17(2), 83-96.

Leandro-Pérez, J. (2017). Estudio de microsismicidad en la caldera La Reforma del complejo volcánico Las Tres Vírgenes, Baja California Sur, México. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE). Ensenada, Baja California, México.

Lonsdale, P. (1991). Structural patterns of the Pacific floor offshore of Peninsular California: Chapter 7: Part III. Regional geophysics and geology.

López-Hernández, A., García, G., & Arellano, F. (1995). Geothermal exploration at Las Tres Vírgenes, B.C.S. In *Proceedings World Geothermal Congress*.

Lopez-Hernandez, A., Estrada, G., Guadarrama, G. H., & Francisco, J. (2018). Geothermal exploration at Las Tres Vírgenes, BCS, México.

Macías, J. L., Arce, J. L., Garduño, V. H., Avellán, D. R., García, L., Reyes, G., Navarrete, J. A. (2012). Estudio de estratigrafía y geología del Complejo Volcánico Tres Vírgenes, B.C.S. [Informe Final DEX-DGL-TV-17-11]: Comisión Federal de Electricidad, 104.

Mammerickx, J., & Klitgord, K. D. (1982). Northern East Pacific Rise: Evolution from 25 my BP to the present. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 87(B8), 6751-6759.

Maraver-Romero, D.A., Aguilera -Hale, J.C., Sevilla-Unda, V.E., Meléndez-Rodríguez, A. (1997). Carta Geológica Minera Loreto G-12-5, Esc. 1:250 000.

Consejo de Recursos Minerales. Hoja explicativa de carta.

Maxey, G. B. (1964). Hydrostratigraphic units. *Journal of Hydrology*, 2(2), 124–129. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(64\)90023-x](https://doi.org/10.1016/0022-1694(64)90023-x).

McFall, C. C. (1968). Reconnaissance geology of the Concepcion Bay area, Baja California, Mexico: Stanford University Publications in Geological Sciences, v. 10, p. 1-25.

McLean, H. (1988). Reconnaissance geologic map of the Loreto and part of the San Javier quadrangles, Baja California Sur, Mexico. US Geological Survey Misc. Field Study Map, MF-2000, 1: 50 000.

Miranda-Avilés, R., Berladi-Campesi, H., Puy-Alquiza, M. J., & Carreño, A. L. (2005). Estromatolitos, tufas y travertinos de la sección El Morro: Depósitos relacionados con la primera incursión marina en la cuenca de Santa Rosalía, Baja California Sur. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2), 148–158.

Miranda, R.F., Salgado-Herrera, N.M., Rodríguez-Hernández, O., Rodríguez-Rodríguez, J.R., Robles, M., Ruiz-Robles, D., Venegas-Rebollar, V. (2022). Distributed generation in low-voltage dc systems by wind energy in the Baja California Peninsula, Mexico. *Energy* 242, 122530.

Noble, J. A. (1950). Manganese on Punta Concepción, Baja California, México: *Economic Geology*, 45, 771-785.

Ocampo-Díaz, Y. Z. E., Torres-Sánchez, S. A., Augustsson, C., Macías, J. L., Sosa-Ceballos, G., Cisneros-Máximo, G., García-Sánchez, L., Osorio-Ocampo, S., Avellán, D.-R., Omma, J., Ortega-Obregón, C., Solari, L. A., & González-Barba, G. (2021). Provenance of the El Salto Formation (early Oligocene to early Miocene), southern part of La Reforma caldera, Baja California Sur, Mexico. In *Southern and Central Mexico: Basement Framework, Tectonic Evolution, and Provenance of Mesozoic–Cenozoic Basins* (pp. 277–308). Geological Society of America.

Ortlieb, L. (1978). Reconocimiento de las terrazas marinas cuaternarias en la parte central de Baja California. UNAM, Instituto de Geología, *Revista*, 2(2), 200–211.

Ortlieb, L., & Malpica Cruz, V. (1978). Reconnaissance des dépôts Pléistocènes marins autour de Golfe de Californie, Mexique. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Servicio Geológico*, X(2), 177–190.

Ortlieb, L., & Colleta, B. (1984). Síntesis cronoestratigráfica sobre el Neógeno y el Cuaternario marino de la Cuenca de Santa Rosalía, Baja California Sur, México, in Malpica-Cruz, V., Celis-Gutiérrez, S., Guerrero-García, J., and Ortlieb, L., ed., *Neotectonics and sea level variations in the Gulf of California area, a symposium:*

México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Contributions volume, p. 241-260.

Ortlieb L. (1981b). Sequence of Pleistocene marine terraces in Santa Rosalía area, Baja California Sur, México. In: Geology of northwestern México and southern Arizona, field guides and papers, L. Ortlieb & J. Roldán (eds.), Inst. Geol., Univ. Nac. Autón. México (Hermosillo), p. 275-293.

Ortlieb L. (1982). Geochronology of Pleistocene marine terraces in the Gulf of California region, northwestern México. XIe Congrès INQUA (Moscou, 1982), vol. rès. N° 2, p. 229.

Osorio-Ocampo, S., García-Sánchez, L., Marcela Lira-Beltrán, R., Macías*, J. L., Pola, A., Avellán, D. R., Ocampo-Díaz, Y. Z. E., Gropelli, G., Sulpizio, R., García-Tenorio, F., González-Barba, G., & Sosa-Ceballos, G. (2019). Volcanic and marine stratigraphy along the El Álamo Canyon, Santa Rosalía Basin, Baja California Sur. In Geologic Excursions in Southwestern North America. Geological Society of America.

Pérez, J. L. (2017). Estudio de mmicrosismicidad en la caldera La Reforma del complejo volcánico Las Tres Vírgenes, Baja California Sur, México. Centro de Invertigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

Pinti, D. L., Castro, M. C., López-Hernández, A., Hernández, M. A. H., Shouakar-Stash, O., Richard, L., ... & Ramírez-Montes, M. (2019). Signature of ongoing brine reinjection on noble gas isotopes and fluid chemistry at Las Tres Vírgenes geothermal field, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 377, 33-42.

Portugal, E., Birkle, P., Barragán Reyes, R. M., Arellano G., V. M., Tello, E., & Tello, M. (2000). Hydrochemical-isotopic and hydrogeological conceptual model of the Las Tres Vírgenes geothermal field, Baja California Sur, México. Elsevier.

Rodríguez-Díaz, A. A. (2009). Metalogenia del Área Mineralizada en Manganeso de Bahía Concepción, Baja California Sur. Tesis de Maestría. 42-65 pp. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Romo, J. M., Wong, V., Flores, C., & Vázquez, R. (2000). The subsurface electrical conductivity and the attenuation of coda waves at Las Tres Vírgenes Geothermal Field in Baja California Sur, México. World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japón.

Romo, J. M., Treviño, E. G., & Antonio Carpio, R. G. (2005). New Magnetotelluric Response Functions for Geothermal Applications. World Geothermal Congress, Antalya, Turquía, 1-9.

Sawlan, M. G., & Smith, J. G. (1983a). Discordant directions of Neogene lavas in

Baja California Sur, México: tectonics or field variations. *EOS*, 64(45), 686.

Sawlan, M. G., & Smith, J. G. (1983b). Evidence for depleted mantle in 10 MyBP lavas from the Gulf of California rift: origin of concavedownward REE patterns in the Esperanza Basalt. *Geol. Soc. Amer. Abstr. Progr*, 15(6), 678–679.

Schmidt, E. G. (1975). Plate tectonics, volcanic petrology, and ore formation in the Santa Rosalia area, Baja California, Mexico. University of Arizona.

Schmidt, E. K., Guilbert, J. M., & Damon, P. E. (1977). Structural evolution of the Santa Rosalia area, Baja California, Mexico. *Geol. Soc. Amer. Abstr. Progr.*, 9(7), 1160–1161.

Schmitt, A. K., Stockli, D. F., & Hausback, B. P. (2006). Eruption and magma crystallization ages of Las Tres Vírgenes (Baja California) constrained by combined $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ and $(\text{U}-\text{Th})/\text{He}$ dating of zircon. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158(3-4), 281-295.

Sena-Lozoya, E. B., González-Escobar, M., Gómez-Arias, E., González-Fernández, A., & Gómez-Ávila, M. (2020). Seismic exploration survey northeast of the Tres Virgenes Geothermal Field, Baja California Sur, Mexico: A new Geothermal prospect. *Geothermics*, 84(101743), 101743. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101743>.

Servicio Meteorológico Nacional (2022). Información Estadística Climatológica. Recuperado en 2022. Shouakar-Stash, O. (2008). Evaluation of stable chlorine and bromine isotopes in sedimentary formation fluids.

Tello Hinojosa, E., Verma, M. P., & Partida, E. G. (2005). Geochemical Characteristics of Reservoir Fluids in the Las Tres Virgenes, BCS, Mexico. World Geothermal Congress, Antalya, Turquía.

Todd, V. R., Erskine, B. G., Morton, D. M., Ernst, W. G. (1988). Metamorphic and tectonic evolution of the northern peninsular ranges batholit, southern California, Metamorphic and crustal evolution of the western United States, Rubey, Prentice Hall, v. 7, p. 894-937.

Umhoefer, P. J., Dorsey, R. J., Willsey, S., Mayer, L., & Renne, P. (2001). Stratigraphy and geochronology of the Comondu Group near Loreto, Baja California Sur, Mexico. *Sedimentary Geology*, 144(1-2), 125-147.

Valencia-Moreno, M., Ortega-Rivera, M. A. (2011). Cretácico Tardío-Eoceno Medio en el noroeste de México-evolución del arco magmático continental y su contexto geodinámico (Orogenia Laramide). *Boletín del Instituto de Geología. UNAM*, (118).

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* 35, 156-180.

Vilchis Garcia, V., Calò, M., & Lermo Samaniego, J. F. (2019). Imaging of the magmatic system feeding Las Tres Virgenes Geothermal field (Baja California Sur, Mexico) using Enhanced Seismic Tomography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 388(106710), 106710. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106710>.

Wilson, I. F. (1948). Buried topography, initial structures, and sedimentation in Santa Rosalía area, Baja California, México: *American Association of Petroleum*, 32(9), 1762–1807.

Wilson, I. F., & Rocha, V. S. (1955). Geology and mineral deposits of the El Boleo copper district, Baja California, México. *United States Geological Survey Professional Paper*, 273, 134.

Wilson, I. F., & Veytia, M. (1949). Geology and manganese deposits of the Lucifer district, northwest of Santa Rosalia, Baja California, México. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 960-F, 177–233.