



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA
TIERRA

**MODELO 2D DEL ESTADO TÉRMICO CONDUCTIVO ESTACIONARIO:
LA PRIMAVERA (JALISCO) Y CUENCAS SEDIMENTARIAS DEL
NORTE DE CHIHUAHUA**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

P R E S E N T A:

GEÓL. ELIZABETH RIVERA CALDERÓN

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ORLANDO MIGUEL ESPINOZA OJEDA



MORELIA, MICHOACÁN, NOVIEMBRE DEL 2018.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. ORLANDO MIGUEL ESPINOZA OJEDA
Secretario: DR. ÁNGEL GREGORIO FIGUEROA SOTO
1^{er.} Vocal: DRA. ROSA MARÍA PROL LEDESMA
2^{do.} Vocal: DR. RICARDO VÁZQUEZ ROSAS
3^{er.} Vocal: DR. EFRAÍN GÓMEZ ARÍAS
Suplente: DR. JESÚS ARTURO MUÑIZ JAUREGUI

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA: ÁREA DE GEOTERMIA, UMSNH.

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ORLANDO MIGUEL ESPINOZA OJEDA

FIRMA

Dedicado en memoria del hombre que siempre tuvo fe en mí:

Cipriano Rivera Guadarrama.

Agradecimientos

Nosotros somos los pasajeros del tiempo en un espacio sin final, donde nada empieza y nada termina. Durante nuestro trayecto buscamos el orden en medio de aquello que se niega a tenerlo. Curiosos de resolver los enigmas de este universo quizás infinito, decidimos entregarnos a la magia del viaje de vivir.

Las palabras no me alcanzan para expresar el agradecimiento con Dios, por darme todas las bendiciones que ha puesto en mi vida, empezando por mi familia.

Estoy feliz de tener los padres más comprensivos, quiénes han dirigido mis pasos con sus consejos y regaños, todas sus enseñanzas han forjado el ser humano que soy ¡Gracias Silvia y Daniel! Por creer en mis sueños y motivarme a conseguirlos, ¡Muchas gracias por tantos sacrificios!

Quiero agradecer a mi hermano Daniel por ser una de las razones más importantes que le dan sentido a mi existir, por su amor y compañía ¡Gracias por inspirarme!

Necesito decir que hay personas quiénes nos muestran el camino con su ejemplo, quiénes con su presencia deciden el rumbo de nuestros pasos y aún en su ausencia nos impulsan a continuar en la lucha por lo que deseamos. Yo soy porque tú fuiste y seré lo que anhelaste ¡Gracias mi Cipriano Rivera Guadarrama!

También le agradezco a mi abuelito Álvaro Calderón Martínez que, aunque hoy no está con nosotros, me heredó su carácter y fortaleza para enfrentar con coraje las adversidades.

¡Muchas gracias abuelita Natalia! Por estar conmigo y tenerme todos los días en sus pensamientos, gracias por preocuparse tanto.

En esta vida nadie puede explicarse el origen de muchas cosas, sólo suceden y nos queda designarlos como grandes milagros. Considero una bendición y un milagro haber conocido al ser humano más sensible, comprensivo y quién con su amor ha creído en mí ¡Muchas Gracias Papá Mike Oliver y esposa Ilene!

La vida me ha regalado la compañía de un ser increíble con personalidad de gigante, con su amor me ha inspirado a conseguir, conquistar y creer en mis sueños. Tu existencia revolucionó mi vida y me abriste un portal al infinito universo de las matemáticas ¡Gracias por estar en todo momento! Especialmente en las situaciones más difíciles, en las que parecía nada tener sentido. Porque sin que lo supieras: tú siempre fuiste la luz, con cariño y todo mi amor para ti mi Adriana Nadcielli Soto Rodríguez.

A mis amigos que formaron parte importante de mi crecimiento profesional y espiritual durante este trayecto de la maestría. Así mismo a mis profesores, les agradezco por sus enseñanzas compartidas.

Al Dr. Orlando M. Espinoza Ojeda, le agradezco por la oportunidad de realizar un trabajo de investigación en un ámbito desconocido y tener la certeza de que alcanzaría el objetivo, gracias por su confianza y las enseñanzas que cambiaron mi perspectiva sobre la realidad.

Con mucho agradecimiento al Dr. Víctor H. Garduño Monroy, por su apoyo en los momentos más complicados de este proceso de aprendizaje de mi vida, gracias por escucharme, por sus sabios consejos que me mantuvieron firme hasta llegar al final.

¡Muchas gracias! Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico brindado durante la realización de mis estudios de Maestría en el INICIT-UMSNH.

Agradezco al proyecto P17: *“Estudio de fracturamiento-fallamiento y campo de deformación actual, apoyados con sísmica y tomografía de los campos geotérmicos de Cuitzeo, Michoacán, Rancho Nuevo, Guanajuato, Las Derrumbadas, Puebla y Volcán Tacaná, Chiapas”* del CEMIE-Geo, por la información otorgada de los pozos geotérmicos de la región de Cerritos Colorados de la Caldera de La Primavera, dirigido por el Dr. Víctor H. Garduño Monroy.

Gracias al proyecto P01: *“Mapas de gradiente geotérmico y flujo de calor para la república mexicana”* del CEMIE-Geo, con la dirección de la Dra. Rosa María Prol Ledesma, por la información otorgada para la realización de este trabajo de investigación.

También expreso mi agradecimiento al Proyecto PN2015-01-388 *“Aprovechamiento de pozos petroleros abandonados/inoperantes como fuente sustentable de energía para sistemas híbridos Geotermia/Concentrador Solar”*, del programa Proyectos de Desarrollo Científico Para Atender Problemas Nacionales 2015 (CONACYT). Así como al proyecto *“Desarrollo de Modelos Conceptuales para la Estimación del Potencial Geotérmico de Zonas Geotérmicas y Petroleras”*, como parte del Programa de Investigación 2018 (UMSNH). Por la información otorgada, y el apoyo en infraestructura (software y equipo computacional) para trabajar durante la maestría. Ambos proyectos liderados por el Dr. Orlando Miguel Espinoza Ojeda.

INDICE

Resumen	IX
Abstract	X
Capítulo I	1
Introducción	1
1.1 Justificación.....	5
1.2 Objetivos	5
1.2.1 Objetivo general	5
1.2.2 Objetivos particulares	6
1.3 Hipótesis	6
Capítulo II	7
Antecedentes.....	7
2.1 Elaboración de modelos de Transferencia de Calor en la Geotermia	7
2.2 Implementación de modelos de Flujo de Calor en el mundo.....	8
2.3 Implementación de modelos de Flujo de Calor en México.....	13
2. 4 Áreas de estudio	17
2.4.1 Acapulco, Puebla, México.....	17
2.4.2 La Primavera, Guadalajara, Jalisco.	20
2.4.3 Cuenca Sedimentaria al Norte de Chihuahua.....	23
Capítulo III	26
Marco Teórico.....	26
3.1 Ecuaciones Diferenciales [ED]	26
3. 2 Mecanismos de Transferencia de Calor	28
3.3 Transferencia de Calor Estacionaria en comparación con la Transitoria.....	31
3.4 Transferencia de Calor Multidimensional	31
3.5 Conductividad térmica variable en paredes planas de capas múltiples	32
3.6 Condiciones Iniciales y de Frontera.....	33
3.7 Métodos Numéricos en la Conducción de Calor	35
3.8 Método numérico de Volumen de Control o Volumen finito.	36
3.9 Método Tri Diagonal Matrix Algorithm (TDMA)	39

Capítulo IV	42
Metodología.....	42
[a] Base de datos.	43
[b] Desarrollo del Modelo 2D.	44
<i>Definición del dominio o geometría del modelo</i>	45
<i>Método de solución numérica TDMA</i>	48
[c] Representación de resultados.	48
 Capítulo V.....	 49
Resultados y Discusión.....	49
5.1 Caldera de Acoculco, Puebla.	50
5.2 Caldera de La Primavera, Jalisco.	55
5.3 Mapa de Flujo de Calor de La Primavera, Jalisco.....	80
5.4 Cuencas Sedimentarias al Norte de Chihuahua	82
5.5 Mapa de Flujo de Calor de las Cuencas Sedimentarias al Norte de Chihuahua	90
 Capítulo VI.....	 110
Conclusiones	110
6.1 Acoculco, Puebla.....	110
6.2 Caldera La Primavera, Jalisco.....	112
6.3 Cuenca Sedimentaria de Chihuahua.	113
 Referencias Bibliográficas	 122

Resumen

El aprovechamiento de los Sistemas Geotérmicos depende del conocimiento confiable de los parámetros geológicos, geofísicos y geoquímicos que describen dichos sistemas. Un parámetro geofísico de vital importancia es el comportamiento del Flujo de Calor, el cual puede ayudar a describir como es el perfil de temperaturas de cierta zona de interés o viceversa, esto permitirá establecer las zonas con mayor calor almacenado en el subsuelo. Este trabajo de investigación se centró en el conocimiento del estado térmico conductivo estacionario en zonas de interés geotérmico, desarrollando un modelo numérico en dos dimensiones basado en la ecuación de transferencia de calor de Fourier y programándola en lenguaje Fortran, utilizando el método de TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm) para resolver el sistema de ecuaciones discretizados. El modelo desarrollado describe como fluye el calor entre dos pozos geotérmicos, obteniendo la distribución de temperaturas en función de la profundidad. Este fue calibrado y validado a través de los perfiles de temperatura obtenidos en pozos geotérmicos y petroleros. Estos perfiles también fueron utilizados como condiciones de frontera para la simulación del modelo numérico, así como datos de referencia para la extrapolación de las temperaturas a una profundidad de 3000 m para cada pozo geotérmico utilizado en este trabajo y 5000 m para los petroleros. Además, la geometría y composición del modelo desarrollado está basado en la estructura de los diferentes materiales correspondientes a las columnas estratigráficas de los pozos, haciéndolo más preciso y realista en el cálculo computacional. Con la metodología desarrollada en este trabajo se analizaron los datos de 10 pozos perforados distribuidos en un área de 4 km² dentro de la Caldera de La Primavera (LP), Jalisco; y 39 pozos para un área de 250 000 km² al norte del estado de Chihuahua. De acuerdo con lo antes mencionado, para LP, bajo condiciones conductivas y en estado estacionario, se estimaron temperaturas entre 450 a 506 °C a 3000 m de profundidad. Mientras que, para las Cuencas Sedimentarias de Chihuahua, suponiendo las mismas condiciones, se estimaron temperaturas entre 175 y 211 °C a los 5000 m de profundidad.

Palabras Clave: Geotermia; Sistemas Geotérmicos; Flujo de Calor; Perfiles Térmicos; Pozos Petroleros.

Abstract

The use of Geothermal Systems depends on the reliable knowledge of many of the geological, geophysical and geochemical parameters. A geophysical parameter of vital importance is the behavior of the heat flow, which can help us to describe the temperature profile from a certain area of interest or reverse, this will establish the areas with the highest heat stored in the subsurface. This research work is focused on the knowledge of the conductive thermal steady-state in areas of geothermal interest, developing a numerical 2D model based on Heat Transfer equations, and computed in Fortran language, using the TDMA method (Tri- Diagonal Matrix Algorithm) as equations solver. The developed model describes how heat flows between two geothermal wellbores, estimating the temperature distribution as function of depth. This was calibrated and validated through the temperature profiles logged in geothermal and oil wellbores. These profiles were also used as boundary condition for the model numerical simulation, as well as, reference data for the temperature extrapolation at depth of 3000 m to each wellbore used in this work. In addition, the geometry of the developed model is based on the composition of the different materials corresponding to the wellbore stratigraphic columns, making it more accurate and realistic in the computational calculation. With the developed methodology in this work, the data of 10 drilled wellbores distributed in an area of 4 km² within the Caldera de La Primavera (LP), Jalisco, and 39 wellbores for an area of 250 000 km² northern Chihuahua. According to the aforementioned, for LP, under conductive conditions and steady state, temperatures between 450 to 506°C at 3000 m depth were estimated. While, for the sedimentary basins of Chihuahua, assuming the same conditions, temperatures between 175 and 211 ° C at 5000 m depth were estimated.

Keywords: Geothermal; Geothermal Systems; Heat Flow; Thermal profiles; Oil wells.

Capítulo I

Introducción

En la actualidad, el uso de combustibles fósiles y las necesidades energéticas de la sociedad han ido en aumento. Estas actividades humanas han incrementado la acumulación de gases de efecto invernadero y modificado el clima de la Tierra. Para contrarrestar el calentamiento global están surgiendo una cascada de propuestas que buscan fuentes alternativas de energía, que subsidien las demandas energéticas de la sociedad y sustituyan o reduzcan el empleo de hidrocarburos.

Las investigaciones actuales están siendo dirigidas a la gestación y avance de fuentes energéticas sustentables que den solución a la problemática de la contaminación de nuestro planeta, y tengan un impacto positivo en el ambiente (Baria *et al.*, 2017). Este tipo de energías son: La energía Eólica, Solar, Biomasa, Geotérmica, Mareomotriz, entre otras más.

Este trabajo pretende contribuir al progreso de la Energía Geotérmica, mejor conocida como la energía térmica almacenada en el interior de la Tierra (Eppelbaum *et al.*, 2014). Dicho calor proviene desde los orígenes de la formación del planeta, en la desintegración radioactiva de elementos isotópicos como Uranio, Torio y Potasio en la corteza terrestre, que producen cambios de temperatura en los estratos superiores corticales mediante procesos de flujo de calor conocidos como gradientes geotérmicos (Stober y Bucher, 2013; Belousov *et al.*, 2017). Los cuales pueden variar desde valores normales de alrededor de 30 °C por kilómetro, o presentar anomalías térmicas con temperaturas superiores, debido a la presencia cercana de cámaras magmáticas en enfriamiento.

La distribución de la temperatura en los reservorios geotérmicos nos permite visualizar las zonas con mayor potencial de explotación y a su vez hacer una clasificación de los Sistemas Geotérmicos, los cuáles de acuerdo con Stober y Bucher (2013) y Böttcher *et al.* (2015), podemos dividirlos respecto a su temperatura en tres tipos principales:

- *Recursos de Baja Entalpía*, son aquellos que manifiestan temperaturas menores a los $<70^{\circ}\text{C}$.
- Los de *Mediana Entalpía* se encuentran en un rango mayor a $>70^{\circ}\text{C}$ y menor a $<150^{\circ}\text{C}$.
- *Recursos de Alta Entalpía* con temperaturas superiores a los $>150^{\circ}\text{C}$.

Los recursos geotérmicos de alta entalpía pueden ser aprovechados en la generación de energía eléctrica, si cumplen con las condiciones de un yacimiento geotérmico convencional, como una fuente de calor suministrable y un acuífero para la generación de vapor que se extrae del subsuelo (Scott *et al.*, 2016). Sin embargo, muchos de los yacimientos geotérmicos de alta entalpía no cumplen dichas condiciones, los cuales son conocidos como de Roca Seca Caliente (HDR, por sus siglas en inglés), con temperaturas elevadas ($>150^{\circ}\text{C}$) pero sin la presencia de un cuerpo de agua. Para su aprovechamiento se necesitan técnicas de estimulación artificial que consisten en el fracturamiento del basamento rocoso (para producir porosidad en el medio) y mediante un pozo de inyección se introduce un fluido para producir vapor que pueda ser utilizado para la generación de electricidad. El empleo de estas técnicas es conocido como Sistemas Geotérmicos Mejorados (EGS, por sus siglas en inglés) (Blackwell *et al.*, 2007; Brown *et al.*, 2012; Yost *et al.*, 2015; Lowry *et al.*, 2017) (ver Fig. 1).

Los yacimientos HDR, son los más abundantes y constituyen una gran fuente de potencial geotérmico que puede ser aprovechado (Gibson *et al.*, 2009; Breede *et al.*, 2013; Latimer y Meier, 2017; Lowry *et al.*, 2017). Los estudios científicos están buscando el desarrollo de tecnologías para disminuir los costos de su explotación, y aplicarlas también para el caso de yacimientos geotérmicos convencionales (Naganawa *et al.*, 2017).

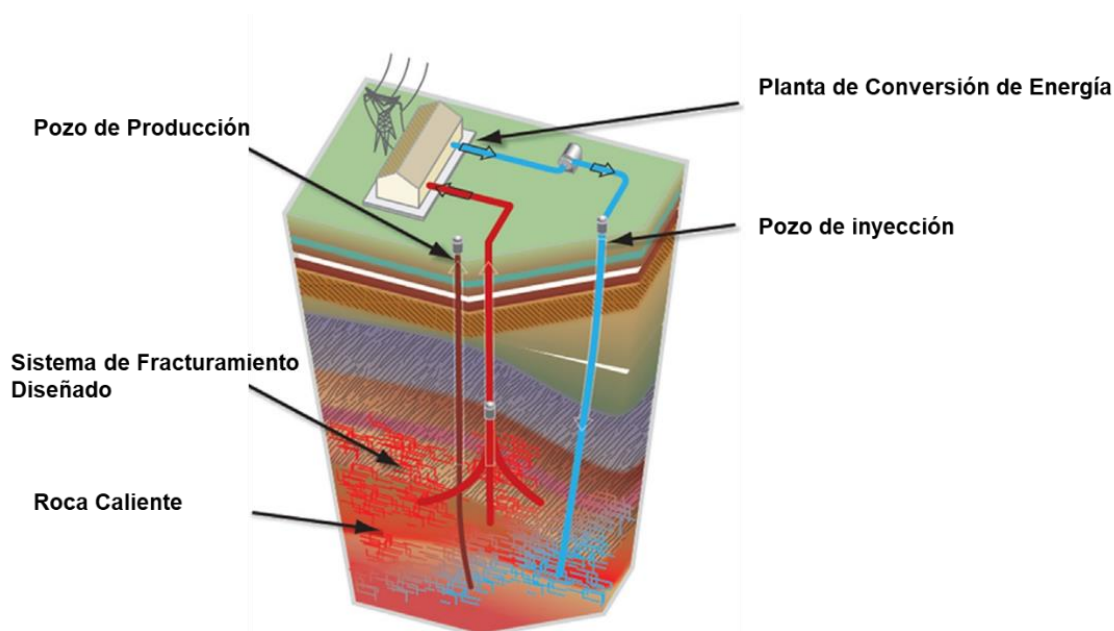


Fig. 1. Yacimientos Geotérmicos Mejorados (EGS) (Modificado de Olasolo *et al.*, 2016).

Analizando de manera detallada los Sistemas Geotérmicos, ya sean convencionales o artificiales, se entiende que el factor más importante que se requiere para su evaluación es conocer la distribución de sus campos de temperaturas en las profundidades del reservorio. Existen trabajos que se enfocan en la modelación numérica de los yacimientos geotérmicos para estimar su potencial (p. ej., Beardsmore y Cooper, 2009; Breede *et al.*, 2013; Iglesias *et al.*, 2016). Otras investigaciones como las de Verma y Gómez-Arias (2013) y Balling *et al.* (2016), resaltan la importancia de modelar la fuente de calor de los reservorios mediante programación numérica de ecuaciones de Flujo de Calor (HF, por sus siglas en inglés) y conocer el comportamiento de las temperaturas de los yacimientos. Muchos de estos trabajos utilizan paquetes de software de uso comercial para su modelación como en los trabajos realizados por Gibson *et al.* (2011) y Norden *et al.* (2012). Mediante el uso de estos programas computacionales comerciales determinan la geometría del yacimiento, las condiciones de frontera, los parámetros termodinámicos y de transporte utilizados en dos o tres dimensiones del HF de los Sistemas Geotérmicos.

La importancia de la modelación numérica es la precisión para realizar los cálculos de temperatura, que estos se aproximen a la realidad mediante el uso adecuado de

las ecuaciones de Transferencia de Calor y a su vez nos proporcionen una prognosis de lo que sucede en el reservorio.

Para lograr este objetivo, es necesario desarrollar modelos que incluyan parámetros reales de la geometría del sistema y la consideración de propiedades termofísicas anisotrópicas, dependientes de la configuración estratigráfica. En algunos casos, es difícil realizar estos ajustes en software comerciales o predeterminados, por lo que recurrir a la programación numérica es necesario para construir modelos que logren integrar dichas condiciones y se ajusten a las necesidades del usuario.

En este trabajo de investigación se construyó un modelo en dos dimensiones, mediante el lenguaje de programación Fortran (Traducción de fórmulas), utilizando ecuaciones de Transferencia de Calor y empleando para su solución el método de TDMA (Tri-diagonal matrix algorithm). El modelo fue calibrado y validado con los perfiles de temperaturas estáticas de formación de cada pozo utilizado, para después realizar una extrapolación de las temperaturas a profundidad, estableciendo condiciones de frontera en dos dimensiones. También fueron considerados los cambios de la estratigrafía de los pozos, construyéndose las secciones para correlacionar las capas de roca, para así establecer si existe una relación directa entre el comportamiento de las temperaturas y las rocas del reservorio.

En un principio se consideró la zona de Acoculco, Puebla, como área de estudio y aplicación del modelo desarrollado, pero por motivos de conflictos sociales en la zona fueron pospuestos los trabajos de perforación que se tenían considerados dentro del proyecto GeMEX. Sin embargo, son presentados los resultados obtenidos a partir de dos pozos de exploración de los cuales se tiene información.

En consecuencia, se contempló una parte de la zona de la Caldera de La Primavera, Jalisco, conocida también como Cerritos Colorados, donde la Comisión Federal de Electricidad (CFE), realizó trabajos de exploración y perforación desde 1985, teniendo información de los registros de temperatura y la estratigrafía de algunos de los pozos. A partir de estos datos, se aplicó el modelo en dos dimensiones y se construyeron los perfiles de temperatura.

Por último, este modelo fue utilizado para una zona localizada el norte del estado de Chihuahua, la cual se trata de una serie de Cuencas Sedimentarias con información de pozos petroleros inoperantes que registraron anomalías térmicas, motivo de interés para esta investigación.

1.1 Justificación

Este trabajo pretende caracterizar los perfiles de temperatura en dos dimensiones, del estado térmico conductivo estacionario de zonas geotérmicas y petroleras. Con el objetivo de tener un conocimiento previo de la aproximación del comportamiento de las temperaturas de un campo geotérmico, lo que representa un gran avance en el momento de la evaluación de los yacimientos. Contribuye a reducir los costos de perforación, es económico y sus resultados son confiables.

En la actualidad, se necesita hacer exploración de campos geotérmicos no convencionales para aprovechar su potencial y es una de las principales razones para construir este modelo 2D, con la posibilidad de que pueda ser empleado para realizar trabajos de prospección geotérmica de cualquier tipo de yacimiento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un Modelo 2D del Estado Térmico Conductivo Estacionario de Sistemas Geotérmicos y Petroleros para aplicarlo en las zonas de:

Una porción de la Caldera de Acoculco (Puebla), Cerritos Colorados en la Caldera de La Primavera (Jalisco) y en los pozos petroleros inoperantes de la Cuenca Sedimentaria del Norte de Chihuahua.

1.2.2 Objetivos particulares

- Procesamiento de datos térmicos de los pozos perforados de cada área a la que será aplicado el Modelo 2D.
- La realización de Secciones Estratigráficas que correlacionen los pozos analizados para establecer el comportamiento del Flujo de Calor.

1.3 Hipótesis

El Modelo 2D desarrollado por programación numérica en lenguaje Fortran, describirá el comportamiento de Flujo de Calor en estado conductivo estacionario, mediante la utilización de la Ecuación de Fourier para describir el mecanismo de transferencia de calor en las rocas que conforman los campos geotérmicos analizados. El modelo podrá predecir el comportamiento térmico anómalo de las áreas de estudio como una buena aproximación aun cuando existe evidencia de presencia de saturación (fluidos). Mediante subrutinas se integrarán las condiciones de frontera y los parámetros de temperatura estabilizada que dependerán de las propiedades particulares de los pozos involucrados en el análisis. Los resultados obtenidos mostrarán el comportamiento del estado natural del reservorio geotérmico.

Capítulo II

Antecedentes

2.1 Elaboración de modelos de Transferencia de Calor en la Geotermia

Aprovechar la energía térmica de la Tierra depende de la capacidad de comprender el funcionamiento de los procesos magmáticos o la fuente de calor de los Sistemas Geotérmicos. Además, se necesita entender que nuestro planeta es un sistema dinámico es decir, está en constante cambio. Por lo tanto, los procesos naturales son producto de pequeños cambios sucesivos. Desde el punto de vista científico, los fenómenos físicos pueden ser representados mediante ecuaciones que involucren condiciones de cambio en sus variables clave, representándolas como derivadas.

En el caso de la elaboración de modelos para describir los mecanismos de Transferencia de Calor (TC), se utilizan ecuaciones diferenciales para modelar los principios físicos que intervienen en la fuente de calor de los Sistemas Geotérmicos. A partir de la comprensión de los mecanismos involucrados, es posible conocer el comportamiento físico del campo de temperaturas del reservorio.

Sin embargo, es más complejo realizar el modelado matemático cuando se requiere encontrar soluciones a las ecuaciones que gobiernan el proceso y considerar dentro de la simulación la geometría irregular del reservorio, los cambios de las conductividades de los materiales, la topografía, la intervención de fluidos, las variaciones de presión, etc. Considerando cada uno de esos parámetros nos conduce a ejecutar experimentos con modelos matemáticos complejos que implican mayor inversión de tiempo y aumentan los procesos computacionales.

Frecuentemente podemos enfrentarnos con la disyuntiva de elegir un modelo muy preciso pero complejo y uno sencillo, pero no tan exacto. La selección más común suele ser el modelo más sencillo que dé lugar a resultados adecuados. Sin embargo, el tipo de modelo dependerá de las necesidades y metas del desarrollador.

Partiendo de esta idea, se planteó el problema que consiste en conocer el comportamiento de las temperaturas entre dos pozos geotérmicos o petroleros. Para ello, hemos considerado un campo de temperaturas en régimen conductivo estacionario y en dos dimensiones, con una conductividad anisotrópica dependiente del comportamiento de la estratigrafía. Este modelo refleja las características esenciales del problema físico que representa. Pero siempre se debe tener presente que los resultados obtenidos, a partir del análisis, son tan exactos como las suposiciones establecidas en la simplificación del problema. Por lo tanto, este modelo desarrollado nos muestra un posible acercamiento a la realidad de lo que ocurre en un sistema geotermal en su estado natural conductivo estacionario.

La modelación matemática realizada en este trabajo, pretende impulsar el desarrollo de Simulaciones numéricas de Flujo de Calor para Yacimientos Geotérmicos en México, que a su vez sirvan en la reducción de costos de perforación e impulsen el desarrollo de la energía geotérmica.

Los avances que se tienen en la actualidad en la investigación y empleo de modelado matemático en la Geotermia en México y en el mundo, se describen a continuación como una manera de hacer una reseña de sus aplicaciones en los yacimientos geotérmicos, así como comprender su impacto positivo en la planificación de los proyectos de la geotermia.

2.2 Implementación de modelos de Flujo de Calor en el mundo.

Uno de los principales objetivos de la Geotermia es reducir los costos en la exploración y explotación de yacimientos geotérmicos, mediante el uso de herramientas que permitan estimar con precisión su potencial. De acuerdo con Beardsmore y Cooper (2009), es necesario recurrir a la modelación Geotermal por su bajo costo y su principal ventaja de reducir los riesgos de fracaso durante la perforación. Otros estudios recientes coinciden que los Sistemas de Roca Seca

Caliente (HDR), representan la fuente principal de recurso geotérmico a nivel mundial en forma de potencial teórico (Rybach, 2015). El interés actual está en la generación de tecnología para explotar de manera artificial esta energía física presente en el subsuelo por medio de técnicas de estimulación hidráulica. A este tipo de yacimientos se les conoce como Sistemas Geotérmicos Mejorados (EGS), mencionados ya con anterioridad. Baria *et al.* (2017) los propone como una alternativa de energía limpia, sustentable y con alto potencial económico que contribuye a la disminución de la contaminación del planeta.

Por estas razones expuestas, en la actualidad los estudios internacionales de Simulación Numérica de Transferencia de Calor (TC), se centran en la modelación de EGS. Sin embargo, existen otros tipos de yacimientos que son también de gran interés como el caso de las Cuencas Sedimentarias, donde es posible encontrar manifestaciones termales de media a alta entalpía (ver Fig. 2).

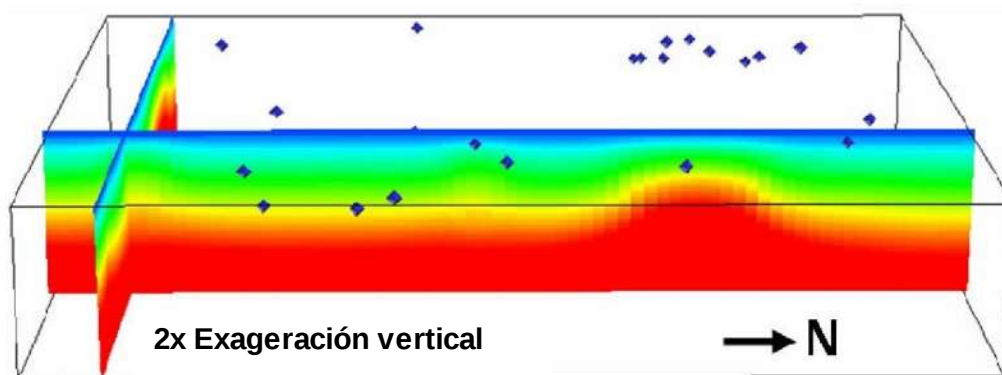


Fig. 2. Ejemplo de perfiles de temperaturas calculadas en un modelo 3D de una Cuenca Sedimentaria en Australia (tomado de Meixner *et al.*, 2009).

Las razones para modelar el HF radican en que la importancia de un yacimiento geotérmico es enfocada a la extracción de la energía almacenada en forma de vapor utilizable, para la generación de electricidad. El caso ideal es contar con temperaturas altas en un medio rocoso ($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$), por lo que se vuelve estrictamente necesario tener un control de la estimación del campo de temperaturas.

A nivel mundial, tenemos trabajos como el de Bonneville y Capolsini (1999), que utiliza un modelo bidimensional programado en lenguaje C, para calcular por ecuaciones de TC el estado Conductivo de los reservorios y utiliza el método de diferencias finitas para resolver su sistema de ecuaciones diferenciales. Es interesante mencionar que su modelo hace uso de una geometría realista, considerando el cambio estratigráfico de las capas geológicas que componen el reservorio.

En cambio, en el trabajo de Flores *et al.* (2001), que fue realizado en las Cuencas Sedimentarias de Alemania, hacen especial énfasis en la importancia de integrar en las condiciones de frontera los parámetros de los pozos modelados y que estos datos sean lo más aproximados a la realidad para obtener durante la simulación térmica, los valores confiables de la temperatura a profundidad.

Estudios como el de Vosteen *et al.* (2004) y Luschen (2005) combinan el Modelo 2D de simulación numérica con la exploración sísmica en Cuencas Sedimentarias de Alemania. Sus trabajos permiten establecer una relación entre las anomalías registradas en la sísmica, y los resultados de las temperaturas calculadas en su modelo en estado conductivo del sistema. Sus resultados son presentados mediante la comparación de sus perfiles sísmicos y térmicos, además de mapas de HF. Lo que permite establecer la relación entre las anomalías sísmicas y las térmicas reportadas del yacimiento.

En el caso del estudio de Blackwell *et al.* (2007), evalúan el HF a través del análisis de mapas térmicos de los Estados Unidos de América, en ellos identifican las áreas de mayor potencial por su HF y proponen la explotación de cuencas sedimentarias con fines geotérmicos. Hacen énfasis en la importancia de los yacimientos de media a baja entalpía y su impacto si son explotados para la producción de electricidad o para su aprovechamiento con otros fines.

La utilización de software para la modelación se ha ido actualizando, haciéndose más factible por la reducción del tiempo de la simulación numérica y abriendo la posibilidad de crear modelos 3D a partir de la información de los pozos perforados, y como ejemplo es el trabajo presentado de Teng y Koike (2007).

Gibson *et al.* (2008) también desarrolla un modelo 3D en el que considera la convección dentro del reservorio, además de tomar en cuenta los efectos topográficos y la conductividad anisotrópica del medio. Gibson *et al.* (2009) hacen uso del mismo software GeoModeller para estudiar sitios prospectos para la exploración de EGS (ver Fig. 3).

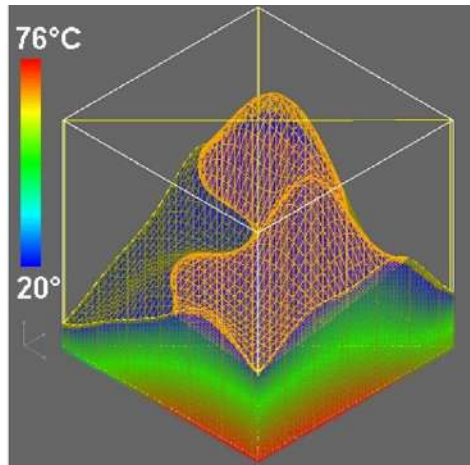


Fig. 3. Representación de la malla utilizada en el Modelo 3D para el cálculo de temperaturas de un reservorio geotérmico, en el que se considera la topografía del área y una posible fuente de calor, creado por Gibson *et al.* (2009), usando el software comercial GeoModeller.

Otros trabajos, como el de Davey *et al.* (2009) determinan que la conductividad termal de una roca, está directamente relacionada con la eficiencia con la cual el calor se propaga a través de ella, lo que hace necesario incluir el cambio de las conductividades con respecto a los materiales durante la construcción de los modelos termales.

Los modelos 3D y la utilización de paquetes de software para desarrollarlos, han ido mejorando y en constante aumento. Norden *et al.* (2012) presenta un estudio para la prognosis de temperatura en la simulación de reservorios, su trabajo considera un cambio de conductividades, pero no contempla discontinuidades en la roca como lo son estructuras de falla. Es una desventaja para el caso de yacimientos geotérmicos en el que se necesita integrar la permeabilidad del reservorio.

Muchos de estos trabajos de simulación numérica térmica, como se mencionó anteriormente para el caso de modelos bidimensionales, contemplan en su análisis tridimensional la integración de técnicas geofísicas como la sísmica o resistividad eléctrica, que ayudan a la identificación y confirmación de anomalías registradas, como se puede ver en la Fig. 4 (Balling *et al.*, 2016).

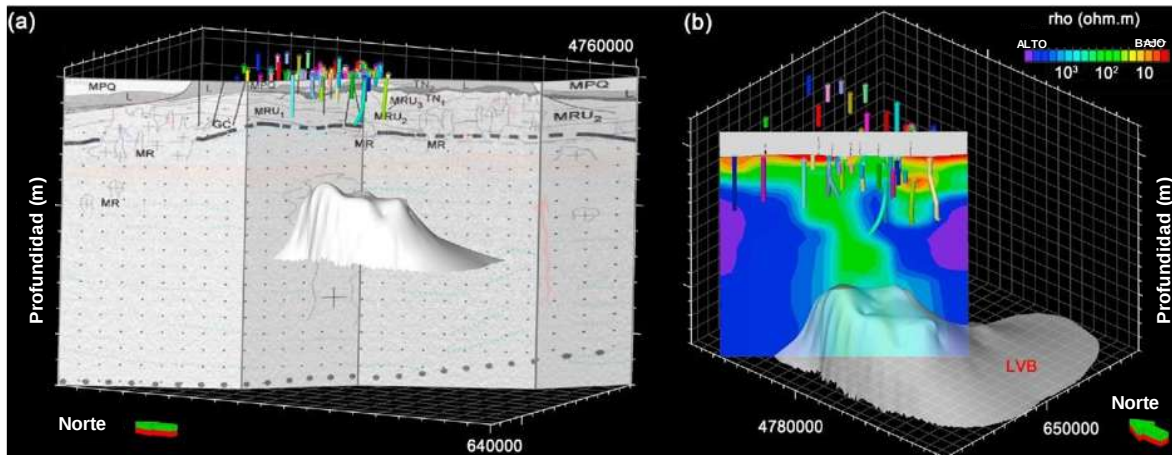


Fig. 4. Modelo 3D de temperaturas que incluye datos sísmicos para el campo Geotérmico de Larderello, Italia. Las anomalías sísmicas registradas son comparadas con las temperaturas obtenidas para establecer una relación e interpretar los resultados (tomado de Gola *et al.*, 2017).

Podemos decir que son de gran utilidad los Softwares comerciales en la modelación de Sistemas Geotérmicos, su principal desventaja es que funcionan como cajas negras en donde no hay acceso a los códigos fuentes para realizar modificaciones, además del costo de la adquisición de las licencias. A diferencia, de quiénes desarrollan las rutinas y sub-rutinas de sus códigos de programación que pueden modificarlas de acuerdo a sus necesidades.

Por lo que en la actualidad es de gran importancia contribuir al desarrollo de la modelación térmica y hacer uso de las herramientas computacionales con eficiencia para la exploración de EGS y Cuencas Sedimentarias.

2.3 Implementación de modelos de Flujo de Calor en México.

Los modelos de simulación numérica son relativamente recientes en la aplicación para Sistemas Geotérmicos en México, se necesita impulsar las técnicas de modelación matemática y desarrollar modelos más eficientes. Podemos mencionar algunos de los estudios que se han realizado en los principales campos geotérmicos del país:

Castillo-Roman *et al.* (1991), realizaron un trabajo de modelación del campo de temperaturas de la cámara magmática de Los Humeros, Puebla. Su modelo en dos dimensiones y en estado transitorio, considera el mecanismo de convección en la cámara magmática, además integra un modelo geológico conceptual del reservorio. Su simulación incluye procesos de emplazamiento magmático “inyección” y una “reinyección” que pudiera afectar directamente el comportamiento de las temperaturas (ver Fig. 5).

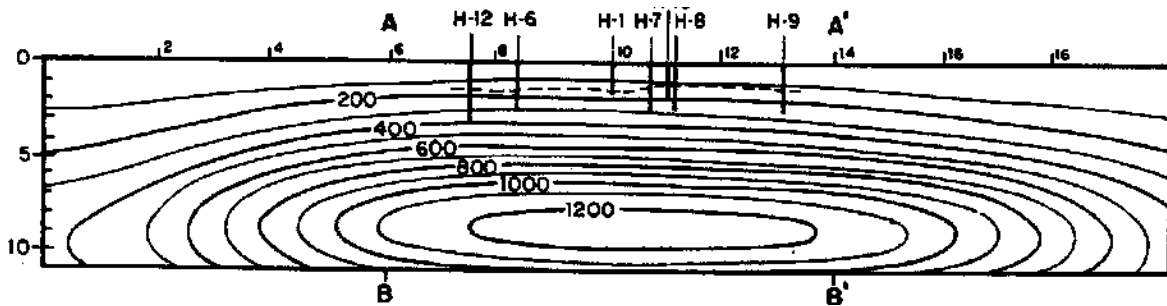


Fig. 5. Modelo del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, en el que se considera la “Reinyección” de un magma basáltico, realizado por Castillo-Roman *et al.* (1991).

Verma y Andaverde (1995), construyen un modelo a través de programación numérica para considerar la distribución del campo de temperaturas en cámaras magmáticas en enfriamiento y es aplicado para el campo Geotérmico de Los Humeros, Puebla, y en los Azufres, Michoacán. Las profundidades consideradas en este trabajo van de los 12 a 15 km y tienen el objetivo de modelar la cámara magmática. Expresan que es necesario incluir los procesos ortomagmáticos que en ella intervienen, además de contemplar su composición mineralógica, ya que son factores importantes en su enfriamiento del magma.

Verma y Rodríguez-González (1997) continúan con la aplicación de su modelo para conocer la distribución del campo de temperaturas de la cámara magmática de La Primavera, Jalisco (ver Fig. 6). Su programa consiste en varias subrutinas para calcular el Flujo de Calor, en estado conductivo a profundidades de 15 km. Su trabajo establece una relación de composición del magma con el comportamiento de sus temperaturas y su principal objetivo es modelar la cámara magmática.

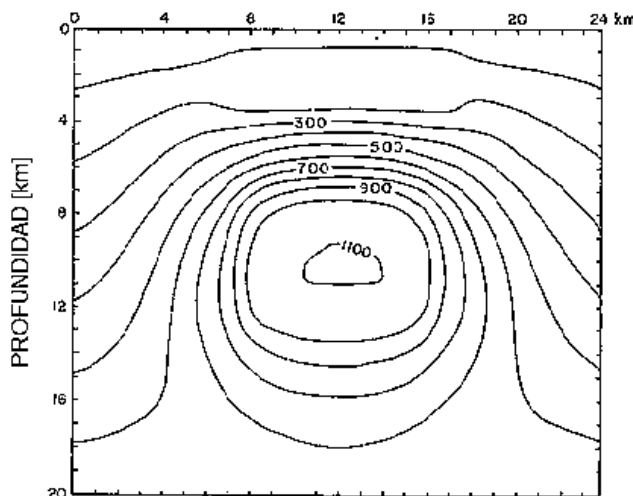


Fig. 6. Distribución del campo de temperaturas de La Primavera, simulando el enfriamiento de una cámara magmática de 10 km de diámetro, realizado por Verma y Rodríguez-González (1997).

García-Estrada *et al.* (2002) realizan un modelo conductivo para conocer la edad y la evolución de la fuente de calor del reservorio Geotérmico de Los Azufres, en Michoacán. Lo hacen a través de varias subrutinas, considerando una geometría en dos dimensiones. Para la validación de su modelo usan datos geológicos y geofísicos, así como los registros de temperaturas estabilizadas de los pozos.

Por otro lado, Verma *et al.* (2012) perfecciona el modelo de la cámara magmática de La Primavera, Jalisco. Cambia la geometría del modelo de dos dimensiones, para realizar la simulación en un 3D. En su trabajo de simulación, considera el enfriamiento de la cámara magmática y los procesos magmáticos. Además, mediante la programación de subrutinas, integra en su modelo la información geofísica y las temperaturas de estabilización en los pozos involucrados en el cálculo (ver Fig. 7).

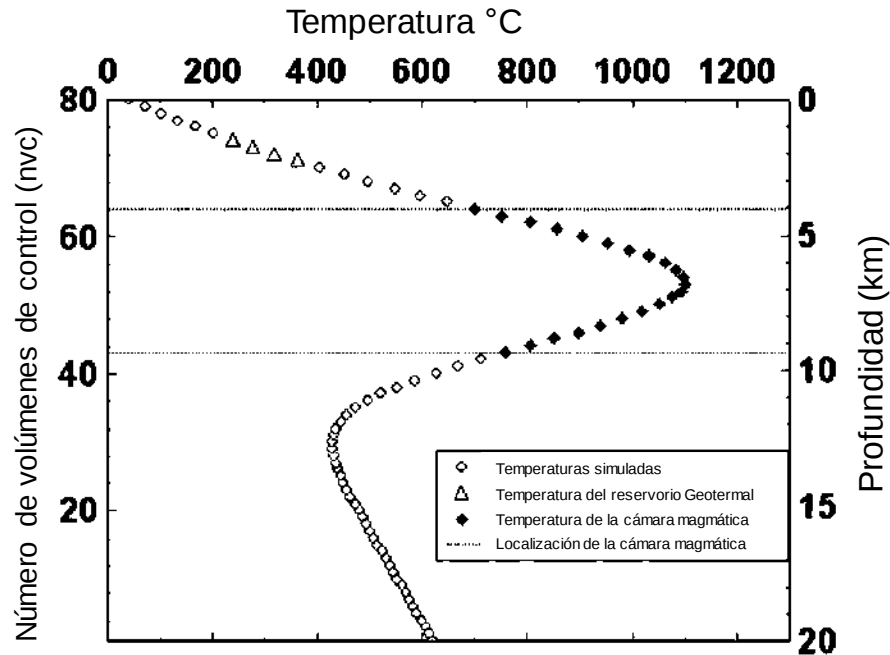


Fig. 7. Resultados de las temperaturas simuladas de la cámara magmática de La Primavera, Jalisco por Verma et al. (2012).

Guerrero-Martínez *et al.* (2015) modifica el programa de Verma *et al.* (2012) de la Caldera de La Primavera, para utilizarlo en la modelación de la cámara magmática de Las Tres Vírgenes en Baja California, México (ver Fig. 8). La importancia de su trabajo es considerar dos posibilidades de emplazamiento magmático. En una de ellas muestra la cámara magmática con una geometría esférica y sus principales diferencias con los modelos anteriores, en los que se considera la geometría cilíndrica. Sugiere que al considerar en la simulación una geometría esférica, los ajustes son más realistas al comportamiento de una cámara magmática.

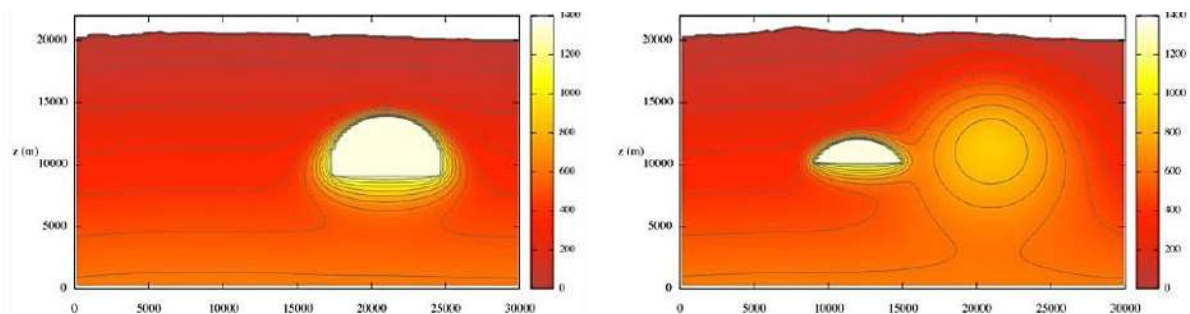


Fig. 8. Modelo de temperaturas de la cámara magmática de Las Tres Vírgenes, en Baja California, México realizado por Guerrero-Martínez et al. (2015).

Verma y Gómez-Arias (2013) realizaron una modelación en tres dimensiones para Los Humeros, Puebla. Utilizaron un programa desarrollado en Lenguaje Fortran, el cual resuelve las ecuaciones de masa, de momento y de la conservación de la energía. En la construcción de su modelo contemplaron mecanismos de convección dentro de su cámara magmática y un régimen variable en el tiempo. Así mismo, proponen que el enfriamiento de la cámara magmática depende de los procesos magmáticos y su composición mineralógica.

En la actualidad en México, se necesita el desarrollo de modelos numéricos que incluyan la exploración de Sistemas de Roca Seca Caliente, con una proyección a futuro para la posibilidad de su explotación como Sistemas Geotérmicos Mejorados (EGS). Se debe iniciar por analizar los sitios prospectos que cumplan con las características de yacimientos HDR.

El trabajo de Iglesias *et al.* (2016) en el que se identifican zonas de basamento cristalino con alto potencial teórico, puede ser la base a partir de la cual se pueden explorar a detalle las zonas con posibilidades para desarrollar proyectos tipo EGS (ver Fig. 9).

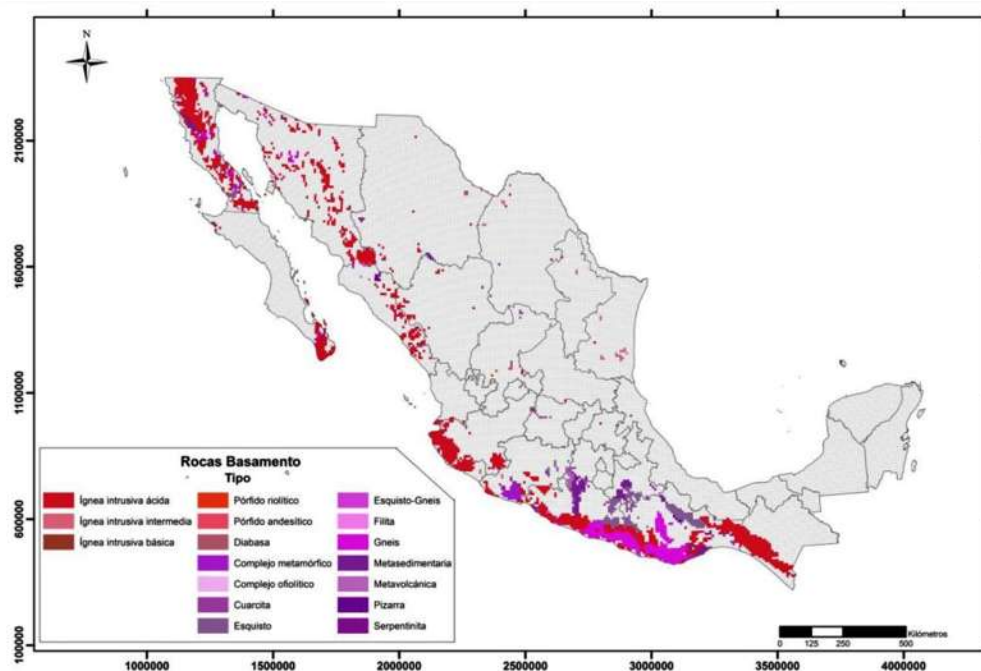


Fig. 9. Distribución de los afloramientos del basamento del tipo de roca en México, se necesita un análisis detallado para determinar las zonas posibles para desarrollar proyectos tipo EGS (tomado de Iglesias *et al.*, 2016).

Se necesita de un análisis exhaustivo, además de buscar tecnología eficiente para la explotación de este tipo de yacimientos en México. Sin embargo, una de las zonas que actualmente está siendo estudiada para su explotación como un EGS, es la Caldera de Acoculco, Puebla. Esto es parte de la colaboración entre investigadores de la Unión Europea y de México, la asociación adquiere el nombre de GEMex. Precisamente se retoma la zona de la Caldera de Acoculco y la Cuenca Sedimentaria al Norte de Chihuahua, como áreas con posible potencial geotérmico en el que se puede aplicar tecnología para la estimulación de yacimientos.

2. 4 Áreas de estudio

2.4.1 Acoculco, Puebla, México

El área de estudio de Acoculco se encuentra localizada entre los límites de los estados de Puebla e Hidalgo, pertenece al municipio de Chignahuapan, a 85 km al noroeste de la ciudad de Puebla y a 65 km al sureste de la ciudad de Pachuca, Hidalgo. Con coordenadas 19° 47'' y 20° 02'' de latitud norte, 97° 55'' y 98° 20'' de longitud oeste. Su elevación está entre los 2800 y 3000 msnm.

La zona geotérmica de Acoculco, desde el punto de vista fisiográfico se encuentra situada dentro del Complejo Volcánico Tulancingo-Acoculco (López-Hernández, 2009) perteneciente a una Caldera entre Puebla e Hidalgo, hacia el centro-este de la Faja Volcánica Transmexicana (ver Fig. 10), y dentro de la provincia geológica de la Sierra Madre Oriental (ver Fig. 11 y 12).

En el proyecto emprendido por la CFE, la zona fue clasificada como un yacimiento tipo HDR, se perforaron dos pozos exploratorios de los cuales se obtuvieron registros de temperatura y se realizaron pruebas de porosidad de la roca, con lo cual se comprobó que pertenece a este tipo de yacimiento (Viggiano-Guerra *et al.*, 2011; Lorenzo-Pulido *et al.*, 2011; Peiffer *et al.*, 2014). En un yacimiento HDR, se tiene como característica principal la ausencia de materiales permeables y de fluidos en su interior para el transporte del calor, si se desea aprovechar, dichas características deben ser introducidas de manera artificial para su explotación (Olasolo *et al.*, 2016).

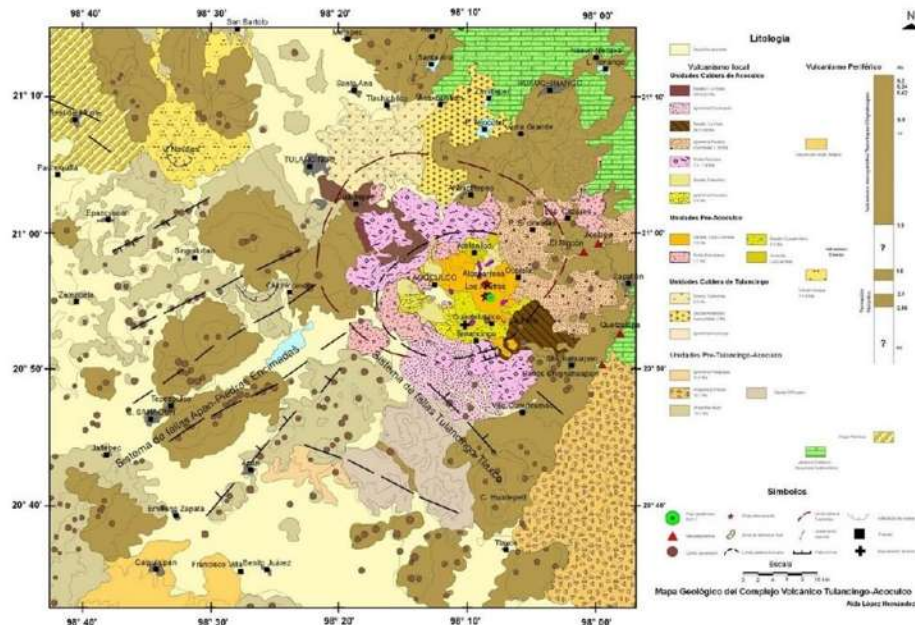


Fig. 11. Mapa geológico del Complejo Volcánico Tulancingo Acocluc (tomado de López-Hernández, 2009).

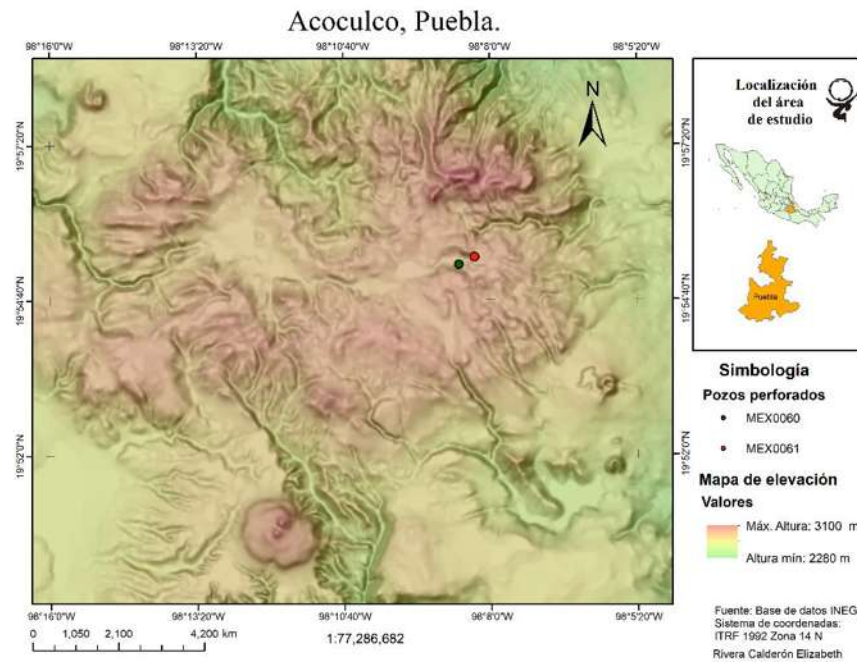


Fig. 12. Mapa de elevación de la Zona Geotérmica de Acocluc, Puebla. Se destaca el relieve del campo geotérmico y la localización de los pozos perforados: MEX0060 y MEX0061.

2.4.2 La Primavera, Guadalajara, Jalisco.

El Complejo Volcánico de La Primavera (CVLP) se localiza al oeste de Guadalajara, Jalisco. Con coordenadas geográficas 103° 28' a 103° 42' de longitud oeste y 20° 32' a 20° 44' de latitud norte (ver Fig. 13). Situada en la intersección de dos provincias volcánicas cenozoicas de México, la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y la Sierra Madre Occidental (SMO). Colindando con una zona de depresiones tectónicas de los rifts Tepic-Zacoalco, Colima y Chapala como se puede apreciar en la Fig. 13.

Clasificada por Mahood (1981) como una Caldera Volcánica en extinción, seguida de una serie de episodios magmáticos de domos riolíticos, en dónde como remanente de la actividad volcano-tectónica cuaternaria, ha quedado un sistema hidrotermal convectivo a profundidad (Maciel-Flores y Rosas-Elguera, 1992). Se tiene en la actualidad un mapa geológico reciente presentado por Tinoco-Murillo (2017) del área de La Primavera (LP), Jalisco. En el que se actualiza la distribución de la Toba Tala y los domos de la caldera (ver Fig. 14). En la Fig.15 se resalta el relieve y la localización de los pozos geotérmicos de La Primavera.

En este sitio la CFE inició un proyecto de exploración geotérmica en 1985, que consistió en trabajos de perforación de diez pozos y la caracterización del yacimiento, con la posibilidad de la instalación de una planta geotérmica en la zona denominada Cerritos Colorados. Sin embargo, se trata de un ecosistema protegido y declarado como Reserva de la Biosfera en el 2006 por la UNESCO (*United Nations Educational Scientific and Cultural Organization*). Siendo una de las razones más importantes que ha hecho imposible la explotación de la energía geotérmica en el área. Con la información térmica proporcionada por los pozos de exploración se puede conocer el comportamiento del Sistema Geotérmico y evaluar su potencial. De ahí se planteó una posible hipótesis que surgió a partir de los siguientes cuestionamientos: ¿Qué sucedería si se supone que el reservorio de LP fuera completamente conductivo? ¿Cómo sería el estado térmico natural de LP sin perturbación convectiva? Estos cuestionamientos pueden ser muy delicados desde el punto de vista de la evaluación confiable y realista de los recursos geotérmicos, pero son válidos si se hace el adecuado tratamiento de los datos existentes.

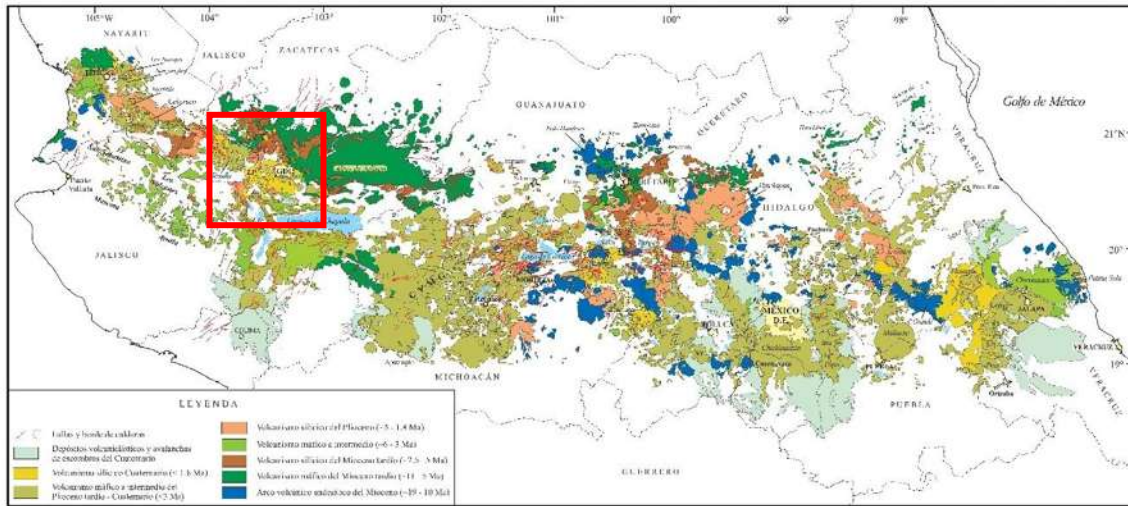


Fig. 13. Esquema del mapa geológico del centro de México mostrando la Faja Volcánica Transmexicana, La Sierra Madre Oriental y las localizaciones del área de La Primavera (LP) (tomado de Gómez-Tuena et al., 2007).

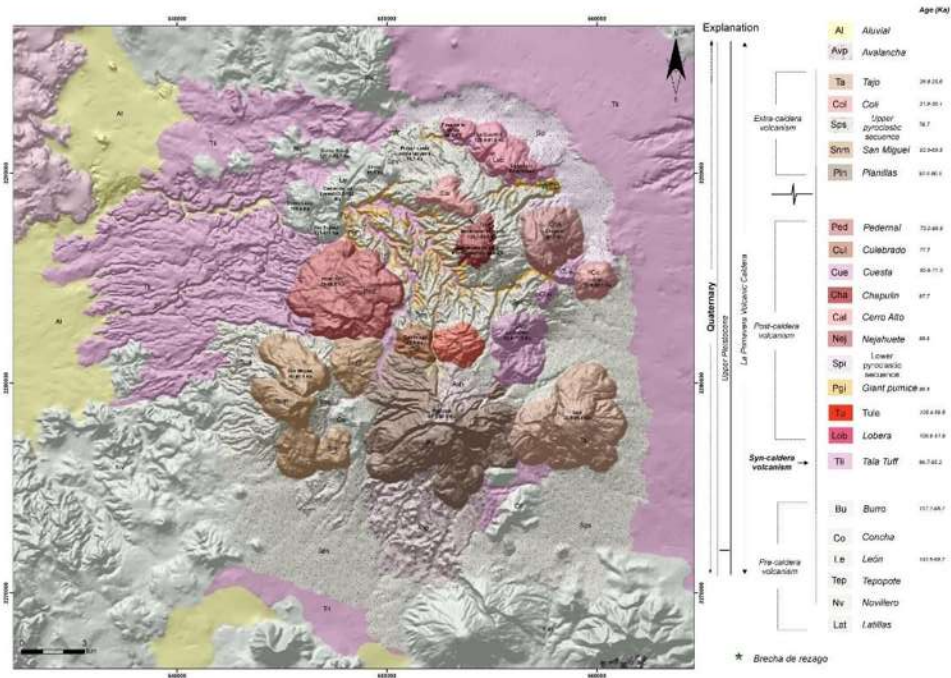


Fig. 14. Mapa geológico de localización de la Caldera del CVLP, del proyecto P15 del CEMIE Geo (tomado de Tinoco-Murillo, 2017).

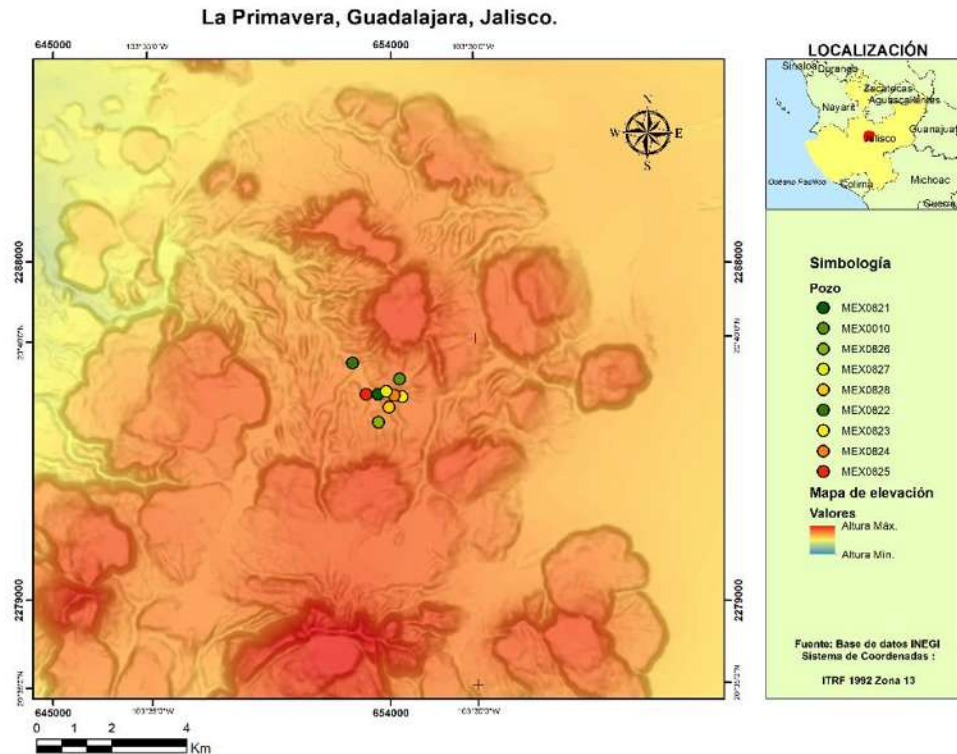


Fig. 15. Mapa de elevación de la Zona Geotérmica de la Caldera de La Primavera, Guadalajara, Jalisco. Se destaca el relieve del campo geotérmico y la localización de los pozos perforados.

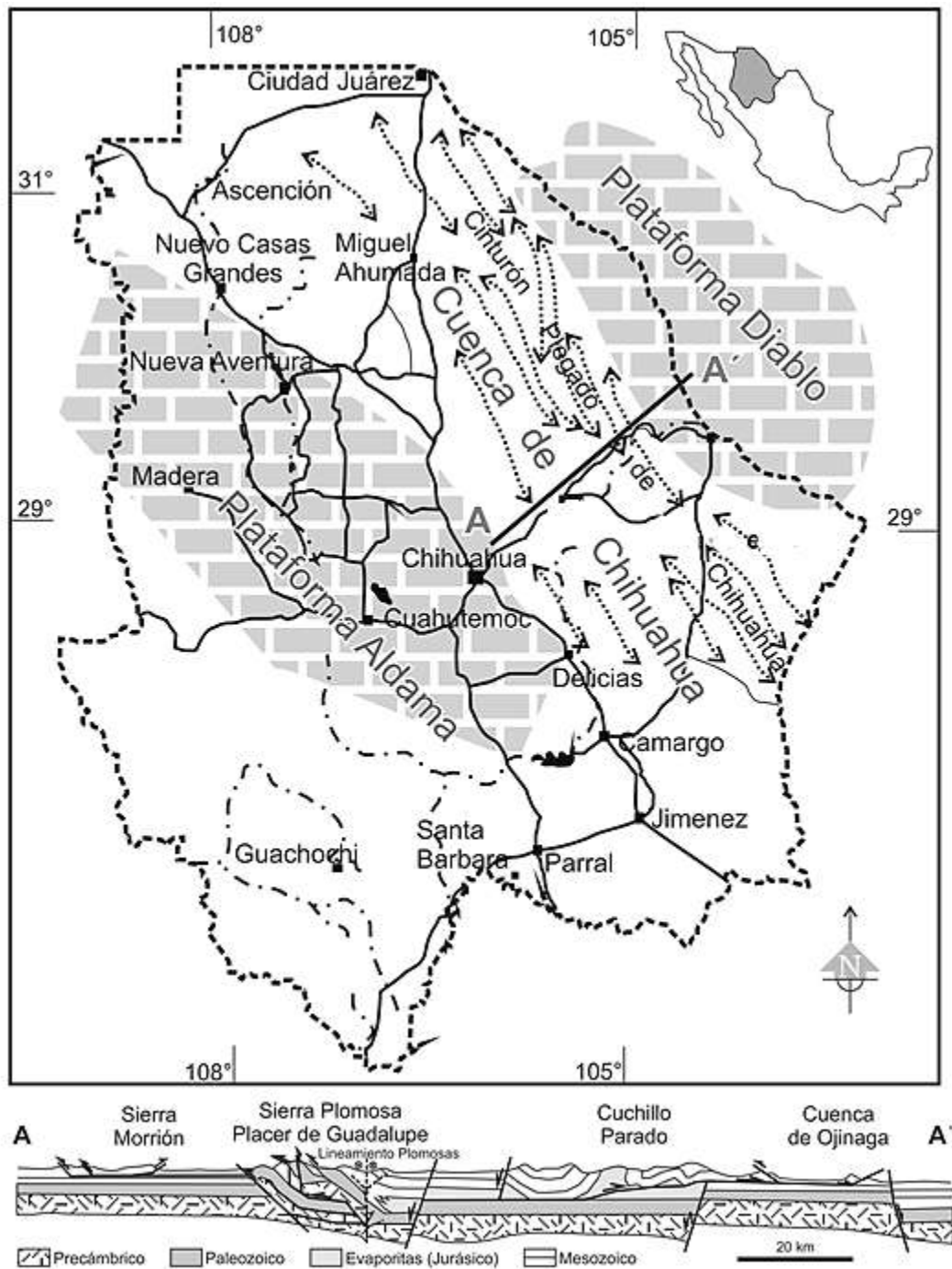


Fig. 17. Mapa geológico regional de la Cuenca Sedimentaria de Chihuahua, en el que se ilustra la distribución de las estructuras de falla, plegamientos y el fosamiento del área. En la sección transversal A-A' se muestra el plegamiento y las fallas que afectan las formaciones de la zona que se atraviesan (tomado de Barboza-Gudiño et al., 2016).

En muchos países se han impulsado las investigaciones sobre el potencial geotérmico que proporcionan las Cuencas Sedimentarias, dentro de ellos podemos mencionar los estudios de Alemania (p. ej., Flores *et al.*, 2001; Norden *et al.*, 2012; Scheck *et al.*, 2013; Fuchs y Förster, 2014; Przybycin *et al.*, 2017) y Australia (p. ej., Gibson *et al.*, 2011; Mather *et al.*, 2015), en los cuales su interés destaca en la posibilidad de generar electricidad de forma limpia y sustentable o de aprovecharla para usos directos. Además, otra de las razones es que no cuentan con recursos geotérmicos de origen volcánico, lo que obliga a centrar los trabajos en la exploración y caracterización de sus cuencas sedimentarias. A diferencia de estos países, México al contar con recursos geotérmicos de origen volcánico, sus trabajos se enfocan en el aprovechamiento de esta clase de yacimientos, y no se ha impulsado la exploración y explotación de las cuencas sedimentarias que representan un potencial de mediana a baja entalpía.

La razón principal para realizar este trabajo en esta área, es la escasez de estudios que existen sobre el potencial geotérmico de las cuencas sedimentarias en México. El objetivo es obtener un panorama general de la distribución del flujo de calor en las cuencas sedimentarias del norte del estado de Chihuahua.

Las anomalías en las cuencas sedimentarias muchas veces se les atribuye a la influencia que provoca el régimen estructural de tipo extensivo, caracterizado por sistemas de fallas normales y el adelgazamiento de la corteza por la formación tectónica de rifts (Moeck, 2014). Las zonas de debilidad cortical favorecen el ascenso de cuerpos plutónicos que generan manifestaciones térmicas.

Moeck (2014) afirma que el mecanismo de transferencia de calor que domina en los sistemas geotermales de las cuencas sedimentarias es la conducción, aunque existen excepciones en las zonas con interferencias de fluidos, en las que las partículas transfieren su energía por convección. Para el caso de los pozos petroleros abandonados, que son considerados en la modelación térmica de este trabajo, no se reportaron fluidos que interfirieran en el sistema (Reiter y Tovar, 1982). El modelo 2D que calcula el estado térmico conductivo en estado estacionario, es de gran ventaja para tener un primer acercamiento de la distribución del campo de temperaturas del sitio en cuestión.

Capítulo III

Marco Teórico

3.1 Ecuaciones Diferenciales [ED]

La naturaleza está escrita en el lenguaje de las matemáticas. Algunos problemas estáticos pueden ser descritos por medio de ecuaciones algebraicas, para la evaluación de cualquier tipo de la mayoría de los fenómenos naturales, esta debe ser descrita por ecuaciones que relacionan cantidades que cambian. A partir de esta idea, surge el concepto de derivada, el cual podemos describir con el siguiente ejemplo donde: $\frac{dx}{dt} = f'(t)$ de la función f , en donde la razón a la cual la cantidad $x = f(t)$ está cambiando respecto a la variable independiente t (Piskunov, 1977; Spiegel, 1983).

Es natural que las ecuaciones que involucran derivadas se usen frecuentemente para describir los fenómenos físicos del universo cambiante. Considerar los cambios que suceden en un proceso físico de la naturaleza involucra contemplar derivadas que nos ayuden a describir el fenómeno. Se dice entonces que, una ecuación que relaciona una función desconocida con una o más de sus derivadas se llama **Ecuación Diferencial** (Piskunov, 1977; Zill, 1997; Edwards y Penney, 2009).

Existen varias clasificaciones de tipos de ecuaciones diferenciales, dentro de ellas están las **Ecuaciones Diferenciales Ordinarias [EDO]**, lo que significa que en ellas la función desconocida (Variable dependiente) depende de una *sol*a variable independiente.

Sin embargo, si la variable dependiente es una función de *dos o más* variables independientes, entonces aparecerán derivadas parciales; si es así, la ecuación se llama **Ecuación Diferencial Parcial [EDP]** (Zill, 1997).

Por ejemplo, la temperatura $u = u(x, t)$ de una barra uniforme en el punto x en el tiempo t satisface (bajo condiciones apropiadas) la siguiente EDP (ver Fig. 18):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2},$$

Donde k es una constante (llamada difusividad térmica de la barra).

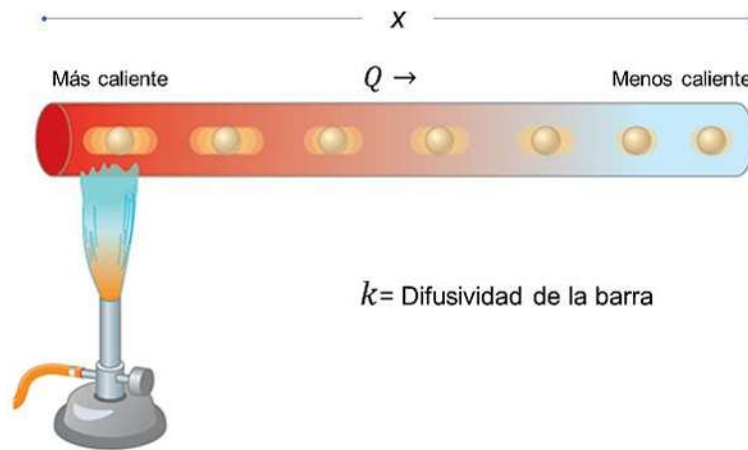


Fig. 18. Mecanismo de Conducción del Calor en una barra uniforme, puede describirse mediante el empleo de EDP (modificado de Holman, 1980).

Entonces, a partir de este ejemplo podemos expresar que una EDP para la función desconocida $u(x_1, \dots, x_n)$ tiene la siguiente forma general:

$$F\left(x_1, \dots, x_n, u, \frac{\partial u}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial u}{\partial x_n}, \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2}, \frac{\partial^2 u}{\partial x_1 \partial x_2}, \dots\right) = 0.$$

Se dice que la función $u(x_1, \dots, x_n)$ es la solución de la EDP si, al sustituirla en dicha ecuación la transforma en una identidad.

El grado correspondiente para las EDP, dependerá del más alto grado de derivación parcial que aparece en la expresión. Así tendremos de primer, segundo, tercer orden, etc (Piskunov, 1977; Edwards y Penney, 2009).

De acuerdo con Suxo-Mamani (2011) los problemas físicos en estado estacionario o en estado temporal son modelados a través de EDP, estas ecuaciones son difíciles de solucionar por métodos exclusivamente analíticos cuando las condiciones de contorno e iniciales no son sencillas, y en muchos casos no es posible encontrar solución analítica, en especial en problemas físicos reales donde su geometría es irregular (p. ej., Guerrero-Martínez *et al.*, 2015; Shao *et al.*, 2016; Watanabe *et al.*, 2017).

Para resolver las EDP, existen varios métodos numéricos que facilitan su solución en función de las condiciones iniciales y de contorno del problema (Piskunov, 1977; Patankar, 1980; Zill, 1997; Belousov *et al.*, 2017). Estos métodos consisten en desarrollar las EDP y mediante operaciones matriciales obtener la solución (Su xo-Mamani, 2011). Más adelante se explicará el método utilizado para resolver las EDP empleadas en el desarrollo de este trabajo en el área de Transferencia de Calor.

3. 2 Mecanismos de Transferencia de Calor

Uno de los procesos de la naturaleza más interesantes es la Transferencia de Calor, cotidianamente estamos en contacto con este mecanismo cuando cocinamos nuestros alimentos, utilizamos ropa adecuada de acuerdo al clima exterior o usamos el aire acondicionado para mantener la temperatura confortable de nuestra habitación. Estamos tan acostumbrados a dichos procesos, que pocas veces reflexionamos del impacto que tienen en nuestra vida diaria. Sin embargo, desde el descubrimiento del fuego, el principal esfuerzo del ser humano ha sido utilizar esta forma de energía para aprovecharla en su beneficio.

Para comprender estos procesos de la naturaleza que involucran un cambio de temperatura, es necesario hacer énfasis en la definición del calor, el cual es conocido como la forma de energía que se puede transmitir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de su temperatura (Cengel, 2007), y la rama de la ciencia que se encarga de saber el tiempo estimado para realizar este proceso se llama Transferencia de Calor (Liang-Ping *et al.*, 1985; Bejan y Kraus, 1993).

Podemos entonces decir que el calor se transfiere siempre de las partículas más energéticas del medio hacia las partículas menos energéticas del sistema (Tannehill

et al ., 1997; Bejan y Kraus, 1993; Cengel, 2007). Este proceso de transferencia se puede realizar por tres mecanismos diferentes: conducción, convección y radiación (Holman, 1980; Patankar, 1980; Bejan y Kraus, 1993; Toth y Bobok, 2017). Cada uno de estos mecanismos sucede de manera particular, y para tener una idea más precisa que nos permita comprender los mecanismos se dará una definición de acuerdo con Holman (1980) y Patankar (1980):

- **Conducción:** es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas.
- **Convección:** es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y un tipo de fluido (líquido o gas) adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de un fluido. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección.
- **Radiación:** Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la TC por radiación no requiere la presencia de un medio, es la más rápida, y no sufre atenuación en el vacío. Ésta es la manera en la que la energía del sol llega a la Tierra.

Para los fines de este trabajo es necesario abordar con más precisión el mecanismo de conducción y su ecuación fundamental sobre la que se derivan las ecuaciones diferenciales utilizadas en el modelo. Se hará hincapié de forma detallada en la conducción en estado estacionario.

Entonces, al analizar un problema de transferencia de calor se involucra contemplar su geometría y sus características, porque de esto depende la rapidez o razón de la conducción de calor, además de considerar su espesor y el material de que está compuesto, así como de la diferencia de temperaturas que pasan a través de él

(Holman, 1980). Por lo tanto, la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y el área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa (ver Fig. 19); es decir:

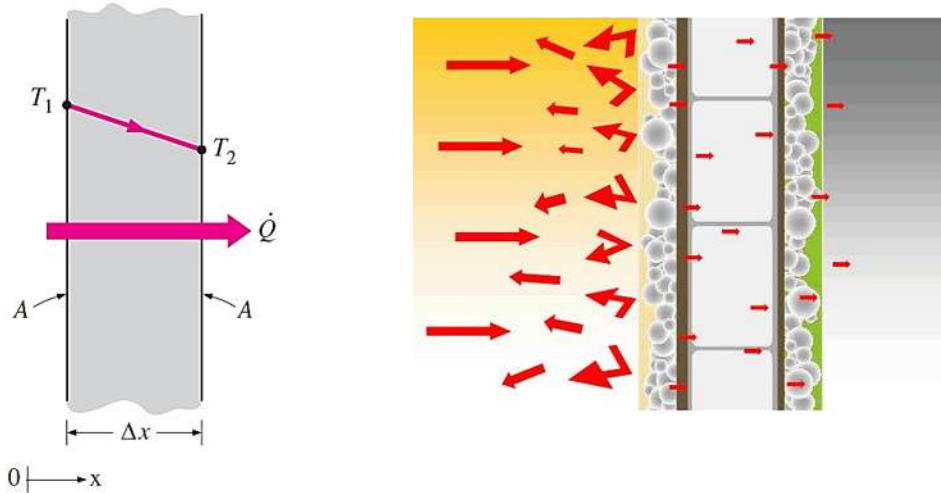


Fig. 19. Conducción de calor a través de una pared plana grande de espesor Δx y área A . (tomado de Cengel, 2007).

$$\text{Razón de conducción del área} \propto \frac{(\text{Área}) (\text{Diferencia de temperaturas})}{\text{espesor}}$$

O bien,

$$Q_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad [1]$$

Dónde k = *Conductividad térmica del material*, considerando que cuando el límite $\Delta x \rightarrow 0$, la ecuación anterior se reduce a la forma diferencial:

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad [2]$$

La cual se llama **Ley de Fourier de la Conducción del Calor**.

3.3 Transferencia de Calor Estacionaria en comparación con la Transitoria.

Cuando queremos determinar el tiempo que tarda el calor en fluir a través de cierto material, o simplemente nos interesa conocer lo que sucede en un estado estacionario (sin cambio en el tiempo), surge una clasificación de los dos tipos de regímenes:

El término *estacionario* implica que **no hay cambio en el tiempo** en cualquier punto dentro del medio, en tanto que *transitorio* implica **variación con el tiempo** o dependencia con respecto al tiempo (Bird, 2006).

La mayoría de los problemas de TC que se encuentran en la práctica son de naturaleza transitoria, pero suelen analizarse bajo condiciones que se suponen estacionarias, ya que los procesos estacionarios suelen no ser tan complejos de modelar y suministran respuestas a nuestras preguntas.

3.4 Transferencia de Calor Multidimensional

Los problemas de TC también se clasifican como unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales, dependiendo de las magnitudes relativas de las razones de transferencia en las diferentes direcciones y del nivel de exactitud deseado (Bejan y Kraus, 1993).

- **Unidimensional:** Cuando la temperatura en el medio varía y el calor se transfiere en una sola dirección y al mismo tiempo, como consecuencia, la transferencia de calor en otras direcciones es despreciable o cero.

Ej: Transferencia en el eje x.

- **Bidimensional:** La temperatura en un medio varía principalmente en dos direcciones primarias y la variación de la temperatura en la tercera dirección es despreciable (Ver Fig. 20).

Ej: Transferencia en los ejes x, y.

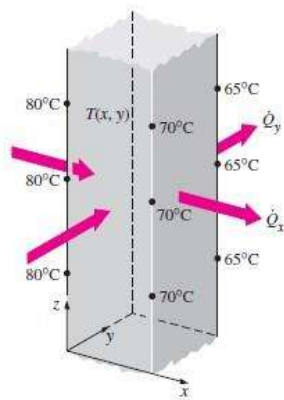


Fig. 20. Ejemplo de Transferencia de Calor Bidimensional (tomado de Holman, 1980).

- **Tridimensional:** La temperatura varía a lo largo de las tres direcciones primarias dentro del medio durante el proceso de TC. En este caso general, la distribución de temperatura de uno a otro lado del medio en un momento específico, así como la razón de la TC en cualquier ubicación se puede describir por un conjunto de tres coordenadas, tales como x, y, z.

3.5 Conductividad térmica variable en paredes planas de capas múltiples

La mayor parte de los materiales de ingeniería son de naturaleza isotrópica y, por lo tanto, tienen las mismas propiedades en todas direcciones. Para esos materiales no es necesario preocuparse por la variación de las propiedades con la dirección. Pero en los materiales anisotrópicos, como los fibrosos o compuestos, pueden cambiar con la dirección. Por ejemplo, en el caso de los yacimientos geotérmicos que dependen del cambio estratigráfico de las rocas. En estos casos se necesita expresar la conductividad térmica como una cantidad tensorial, para tomar en cuenta la variación con la dirección (ver Fig. 21).

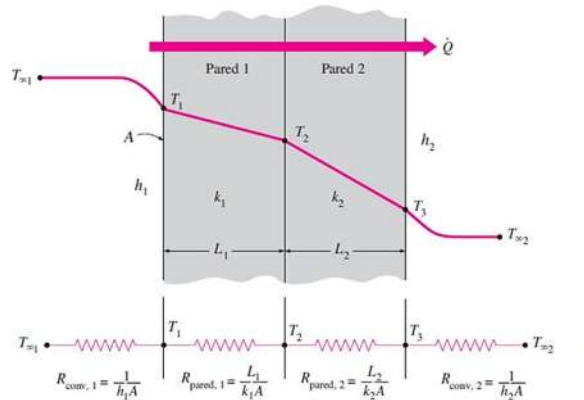


Fig. 21. Ejemplo de transferencia de calor en capas múltiples [tomada de Cengel (2007) y Holman (1980)].

La dependencia de la conductividad es una relación con la configuración de las estratigrafías del yacimiento. Por esa razón, es necesario la construcción de los perfiles de los pozos involucrados en el modelado térmico para conocer los espesores de las capas, su conductividad específica y su variación respecto a la profundidad, lo cual debe ser integrado al modelo para hacer más realistas los cálculos de flujo de calor.

3.6 Condiciones Iniciales y de Frontera.

Las ecuaciones de conducción de calor, que se desarrollan a partir de la Ley de Conducción de Fourier se resuelven aplicando un balance de energía sobre un elemento diferencial en el interior del medio (Tannehill *et al.*, 1997; Bird, 2006; Shao *et al.*, 2016). El Flujo de Calor y la distribución de temperatura en un medio depende de las condiciones de las superficies. Por lo tanto, la descripción tiene que incluir las condiciones térmicas en las superficies límite de este. La expresión matemática de las condiciones térmicas en las fronteras se llama “Condiciones de Frontera” (Diersch, 2014; Shao *et al.*, 2016).

Desde un punto de vista matemático, resolver una ecuación diferencial es en esencia un proceso de *eliminar derivadas*, o sea un proceso de *integración*. Por lo tanto, la solución de una ecuación diferencial comprende constantes arbitrarias.

Se deduce que para obtener una solución única para un problema se necesita especificar más que sólo la ecuación diferencial que lo rige. Es necesario fijar algunas condiciones (como el valor de la función o de sus derivadas) de modo que al forzar la solución a que satisfaga tales condiciones en puntos específicos, arrojará valores únicos para las constantes arbitrarias y por lo tanto una solución única. Puesto que la ecuación diferencial no tiene lugar para la información o condiciones adicionales, se necesita suministrarlas por separado en la forma de condiciones iniciales y de frontera.

Las condiciones de frontera de acuerdo con Tannehill *et al.* (1997) pueden ser del tipo:

- a) **Dirichlet:** Cuando se especifican los valores de la solución que necesita la frontera del dominio, para resolver las ecuaciones diferenciales parciales involucradas en el problema con dicha condición.
- b) **Neumann:** Se presenta cuando una ecuación diferencial ordinaria o en derivadas parciales, se le especifican los valores de la derivada de una solución tomada sobre la frontera o contorno del dominio.
- c) **Robin:** Cuando una ecuación diferencial ordinaria o en derivadas parciales, se le especifica una combinación lineal de los valores de una *función* y , además de los valores de sus derivadas sobre la frontera del dominio.

En cuanto a las **condiciones iniciales**, también se le define como la expresión matemática para la distribución inicial de temperatura del medio (Bejan y Kraus, 1993; Bird, 2006; Sharma, 2017). En condiciones estacionarias la ecuación de conducción de calor no contiene derivadas con respecto al tiempo y , por lo tanto, no se necesita especificar una condición inicial.

3.7 Métodos Numéricos en la Conducción de Calor

La modelación y el análisis matemático han contribuido a la comprensión de procesos cada día más complejos en las diferentes áreas del conocimiento a lo largo de la historia (Edwards y Penney, 2009). Podemos mencionar los procesos de Transferencia de Calor, como una de las principales aplicaciones de la modelación y que han sido de gran utilidad en el desarrollo tecnológico (Patankar, 1980; Toth y Bobok, 2017). Sus principales beneficios de los cuales disfrutamos incluyen desde los aires acondicionados para los automóviles, las calefacciones de los hogares, los sistemas de enfriamiento que nos permiten preservar los alimentos por más tiempo, entre otras más múltiples aplicaciones.

Recientemente en el área de Ciencias de la Tierra, se busca el aprovechamiento de recursos que proporcionan energía térmica denominados Yacimientos Geotérmicos (Stober y Bucher, 2013; Toth y Bobok, 2017). Para aprovecharlos, es necesario su comprensión de su funcionamiento y procesos que ocurren en ellos. Por esta razón la modelación de los principales mecanismos de transferencia de calor en Sistemas Geotérmicos, tiene como finalidad conocer las características de la fuente de calor y la distribución de las temperaturas en el yacimiento (Böttcher *et al.*, 2015; Shao *et al.*, 2016; Watanabe *et al.*, 2017). Para eso es importante tomar en cuenta todos los parámetros que interfieren, lo que vuelve el problema más complejo de analizar al incluir diversas variables, cuando esto sucede los métodos analíticos de solución se vuelven obsoletos y es necesario recurrir a modelos matemáticos para su simulación numérica, haciendo uso de ordenadores para realizar los cálculos computacionales.

Para dar solución a dichas ecuaciones complejas que describen los procesos naturales de Transferencia de Calor se recurre a los llamados métodos numéricos, los cuales consisten en esencia en el reemplazo de la ecuación diferencial por un conjunto de n ecuaciones algebraicas para las temperaturas desconocidas en n puntos seleccionados en el medio, la solución simultánea de estas ecuaciones conduce a valores de la temperatura en esos puntos discretos (Tannehill *et al.*, 1997).

Existen una gran diversidad de métodos-solución para las ecuaciones de Conducción de Calor, entre ellos podemos mencionar algunos ejemplos como:

- Diferencias finitas.
- Elementos finitos.
- Elementos de frontera.
- Balance de energía o de volumen de control.

Cada uno presenta ventajas y desventajas, la selección de alguno de ellos depende de las necesidades del usuario y del problema que plantee resolver. Este trabajo soluciona las ecuaciones de Conducción del Calor en estado estacionario, con el Método de Volumen de Control.

3.8 Método numérico de Volumen de Control o Volumen finito.

Varios autores que tratan el problema de Transferencia de Calor (p. ej., Patankar, 1980; Tannehill, Anderson y Pletcher, 1997; Bejan y D. Kraus, 2003; Bird, 2006; Diersch, 2014) derivan la ecuación principal de diferencias finitas por el método de Series de Taylor, y entonces demuestran que el resultado de la ecuación es consistente haciendo un balance de energía sobre una pequeña región en un punto de la malla (Patankar, 1980).

De acuerdo con Xamán y Guijón-Rivera (2016) el método de volumen de control o de volumen finito (MVF) fue desarrollado originalmente como una forma especial de la formulación en diferencias finitas. El punto de inicio de este método es usar la forma integral de las ecuaciones de conservación. El dominio de estudio es subdividido en un número finito de volúmenes de control (VC) contiguos y las ecuaciones de conservación son aplicadas para cada VC (ver Fig. 22). En el centroide de cada VC recae un nodo computacional en el cual se calcula el valor de las variables. Para expresar los valores de las variables en las superficies de los VC en términos de los valores nodales (localización en el centro del VC) se utiliza algún tipo de interpolación. Las integrales de superficie se aproximan usando alguna fórmula cuadrática disponible.

Como resultado se obtiene una ecuación algebraica para cada VC, en la cual aparecen valores de los nodos vecinos. El MVF puede ser adecuado a cualquier tipo de malla y, por lo tanto, puede ser aplicado a geometrías complejas. La malla define únicamente las fronteras de los volúmenes de control.

El método es conservativo por construcción (las propiedades relevantes cumplen con conservación para cada volumen), así que las integrales de superficie (las cuales representan flujos convectivos y difusivos) son las mismas para las interfaces (fronteras) de los VC contiguos (Xamán y Guijón-Rivera, 2016). La aproximación del MVF es la más simple de entender y de programar. Todos los términos que necesitan ser aproximados tienen significado físico (Patankar, 1980; Stober y Bucher, 2013; Sharma, 2017). Para comprender este método en la Transferencia de Calor es necesario considerar que una fuente de calor en un medio es igual al flujo de calor por el volumen:

$$\text{Fuente de calor} = q V \quad [3]$$

$q = \text{Flujo de calor}$

$V = \text{Volumen}$

Descomponemos el volumen en las coordenadas, y la ecuación anterior sería igual a:

$$\text{Fuente de calor} = q (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad [4]$$

Para nuestros cálculos consideramos una geometría en dos dimensiones en la que:

$$\Delta z = 1$$

Expresando la ecuación [2] en su forma diferencial tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + qV = 0 \quad [5]$$

Donde:

k = Conductividad térmica del material

T = Temperatura

El flujo de calor en cada nodo podemos describirlo en la siguiente expresión:

$$q_N + q_S + q_E + q_W + q_v = 0 \quad [6]$$

Donde q = Flujo de calor, pero cuando consideramos el nodo dadas las coordenadas $[i, j]$ es necesario realizar la sumatoria de cada flujo en la dirección correspondiente, es por eso que en la ecuación [6] los subíndices indican la orientación: N = Norte, S = Sur, E = Este y W = Oeste. Mientras q_v , es equivalente al flujo de calor almacenado en el centro del nodo.

Combinando las ecuaciones [2] y [6] tenemos como resultado la siguiente ecuación que actúa en cada nodo:

$$k(T_N - T_P) + k(T_S - T_P) + k(T_E - T_P) + k(T_W - T_P) + q \Delta x^2 = 0 \quad [7]$$

Donde:

k = Conductividad térmica

T_N = Temperatura Norte

T_S = Temperatura Sur

T_E = Temperatura Este

T_W = Temperatura Oeste

T_P = Temperatura del nodo central

$q \Delta x^2$ = Flujo de Calor en dos dimensiones

Reduciendo términos obtenemos la forma general:

$$T_N + T_S + T_E + T_W + 4T_P \frac{q \Delta x^2}{k} = 0 \quad [8]$$

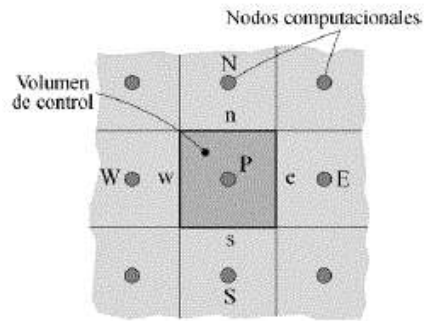


Fig. 22. Esquema de la configuración un nodo de la malla empleada en el cálculo computacional (tomada de Holman, 1980).

La malla utilizada en el cálculo computacional está constituida por la unión de varios nodos que interactúan entre sí, a esos puntos también podemos denominar celdas o puntos internos de la malla (ver Fig. 22). En coordenadas cartesianas podemos representar la celda central P y su interacción con las celdas adyacentes, que de acuerdo a su orientación se representan como: E, W, N, S para el Este, Oeste, Norte y Sur, respectivamente (Patankar, 1980; Sharma, 2017).

3.9 Método Tri Diagonal Matrix Algorithm (TDMA)

El método TDMA está basado sobre eliminación Gaussiana y consiste en dos partes, seguida de una fase de eliminación y regresando a la fase de sustitución (Sharma, 2017). Los pasos para aplicarlo consisten en:

- Discretizar el dominio.
- Transformar en cada nodo la o las constantes diferenciales en ecuaciones algebraicas.
- Resolver el sistema de ecuaciones algebraicas.

Después de la discretización en cada volumen de control, se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas. Las cuales se distribuyen en una matriz que puede ser fácilmente resuelta por el algoritmo de TDMA, que consiste en una simplificación de la forma de eliminación Gaussiana, y después resolviendo por sistema de tres ecuaciones con tres diagonales (Bejan & Kraus, 1993; Cengel, 2007).

El TDMA es en efecto un método directo, pero puede ser aplicado por la iteración en un modo de línea por línea (ver Fig. 23). Para el código 2D, usamos la ecuación general del TDMA que está dada por:

$$a_i x_i + b_i x_{i+1} + c_i x_{i-1} = d_i \quad [9]$$

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & & & & \\ a_2 & b_2 & c_2 & & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & a_i & b_i & c_i \\ & & & & \ddots & \ddots \\ & & & & & a_{n-1} & b_{n-1} & c_{n-1} \\ & & & & & & a_n & b_n \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_i \\ \vdots \\ d_{n-1} \\ d_n \end{pmatrix}$$

Fig. 23. Matriz de sustitución correspondiente a la ecuación general del TDMA (Tridiagonal Matrix Algorithm) (tomada de Sharma, 2017).

El nombre del TDMA se refiere al efecto de escribir los coeficientes de las ecuaciones en una matriz tridiagonal (Patankar, 1980). Por conveniencia, se puede presentar el algoritmo con la siguiente nomenclatura en la que suponemos los puntos de la malla como en la Fig. 22, donde numeramos el *eje x*= 1,2,3...*n*, mientras el *eje y*= 1,2,3...*m*. Los puntos de 1, 2, 3...*n* y 1, 2, 3...*m*, denotan la numeración de las fronteras de la malla. La discretización de las ecuaciones puede ser escrita, a partir de su forma general, como:

$$a_i T_i = b_i T_{i+1} + c_i T_{i-1} + d_i \quad [10]$$

Para *i*= 1, 2, 3...*n*. Entonces, la temperatura *T_i* es relacionada con las temperaturas vecinas *T_{i+1}* y *T_{i-1}*. Lo mismo sucederá si consideramos la variable *i* igual a *j*, para calcular los valores en el eje de las ordenadas, entonces en este caso sustituimos *j*= 1, 2, 3...*m* y los resultados de las temperaturas se relacionarán con los puntos vecinos como sucede en el caso de *i*, en el eje de las abscisas.

Para llegar a la forma especial que rige en los puntos de las fronteras del modelo 2D, vamos a establecer que las fronteras estarán delimitadas por las temperaturas estabilizadas de los pozos, en dónde:

$$c_1 = 1 \quad \text{y} \quad b_N = 0$$

Entonces, en este caso las temperaturas T_0 y T_{N+1} no juegan un papel importante siempre y cuando se asignan las temperaturas de las fronteras, y es cuando esas ecuaciones de los puntos frontera adquieren una forma trivial. Por ejemplo, como conocemos el valor de la frontera que es T_1 , nosotros tenemos que $a_1 = 1$, $b_1 = 1$, $c_1 = 0$, y d_1 está dado por el valor de T_1 (Patankar, 1980; Cengel, 2007; Sharma, 2017).

Esas condiciones implican que T_1 es conocida en términos de T_2 . La ecuación para $i=2$ es una relación entre T_1 , T_2 , y T_3 . Pero ya que T_1 puede ser expresada en términos de T_2 , esta igualdad reduce la relación entre T_2 y T_3 . En otras palabras, T_2 puede ser expresada en términos de T_3 . Este proceso de sustitución puede continuar hasta T_N y es formalmente expresada en términos de T_{N+1} . Pero como T_{N+1} no existe, nosotros obtenemos el valor de T_N en esta etapa. Esto nos permite realizar la “Sustitución hacia atrás”, proceso en el cual T_{N-1} es obtenido de T_N , T_{N-2} de T_{N-1} , ..., T_2 de T_3 , y T_1 de T_2 . Esta es la esencia del TDMA.

Capítulo IV

Metodología

La metodología propuesta en este trabajo de investigación consistió en el procesamiento de los datos, desarrollo de las ecuaciones, integración de la geometría, hasta la presentación de los resultados obtenidos en el modelo. Este proceso, con el objetivo de simplificar su desarrollo y obtener una mejor comprensión del problema, se dividió en tres etapas principales, las cuales tienen el siguiente orden: **[a]** Base de datos; **[b]** Desarrollo del Modelo 2D; y **[c]** Representación de resultados. En el diagrama de flujo de la Fig. 24 se muestran la cronología de las etapas del método empleado durante esta investigación:

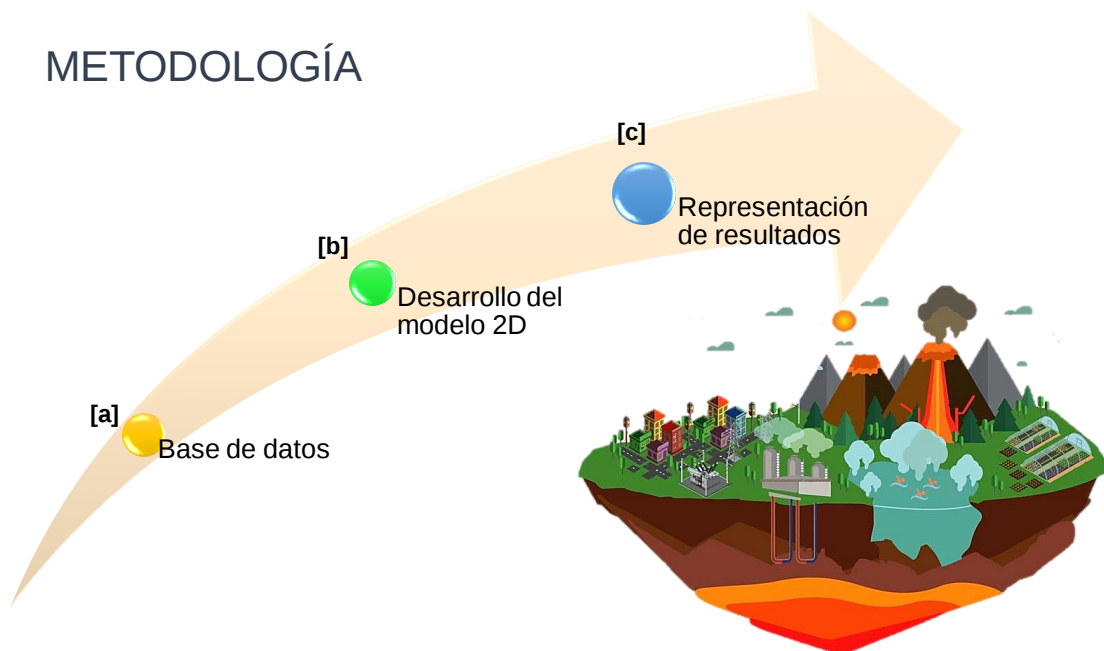


Fig. 24. Etapas que integran la metodología utilizada en este proyecto de investigación.

[a] Base de datos.

Para lograr crear una base de datos sobre las zonas de estudio elegidas para este proyecto, primero se procedió a realizar una exhaustiva y detallada revisión de trabajos de investigación y exploración geotérmica de las áreas de estudio. Esto con la finalidad de conocer más a detalle, así como que tipo de estudios se han realizado en los yacimientos geotérmicos.

En el caso de los pozos geotérmicos de La Primavera, Jalisco, se realizó una revisión de la información de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, comunicación personal, 2017). Mientras que, para la Cuenca Sedimentaria al Norte de Chihuahua, la información fue revisada de los pozos Petroleros abandonados (PEMEX, comunicación personal, 2013, 2015) y la complementación con artículos publicados de las Cuencas Sedimentarias (Reiter y Tovar, 1982).

Por lo tanto, la revisión de la información consistió en integrar datos de la geología de pozos, registros de temperaturas y su relación con trabajos publicados de las áreas. Para comprender mejor estas etapas a continuación, se explican de forma detallada:

- **Geología de pozos:** se consultaron los datos de las estratigrafías de los pozos geotérmicos y de acuerdo con valores promedio publicados en bibliografía internacional, se asignaron las conductividades térmicas correspondientes de los materiales.
- Se revisaron los mapas geológico-estructurales de la zona, para conocer la configuración de las estructuras principales de falla y con la información de los reportes de perforación, se determinó si afectaban las correlaciones de los pozos que fueron construidas.

Para el caso de la Cuenca de Chihuahua, se tomaron en cuenta las variaciones de la conductividad térmica con la información de los reportes técnicos de los Pozos petroleros inoperantes.

- **Datos térmicos:** Los registros de temperatura estabilizada, que fueron estimados y en algunos casos son reportados para cada uno de los pozos geotérmicos, fueron analizados para procesarlos y usarlos para validar el modelo 2D. Se visualizaron en gráficas de Temperatura vs Profundidad, que a su vez se presentan más adelante para cada zona de estudio, con la finalidad de identificar las zonas del subsuelo con comportamiento conductivo y conductivo-convectivo de acuerdo con el proceso de transferencia de calor presente en la zona de estudio.

[b] Desarrollo del Modelo 2D.

El desarrollo del código de simulación numérica consistió en configurar las ecuaciones de TC usando Fortran como lenguaje de programación, en el que se consideró un régimen conductivo en estado estacionario. Se idealizó un escenario en el que la conducción tiene lugar en roca sólida, sin intervención de ningún tipo de fluido.

Las ecuaciones utilizadas en el proceso de modelación térmica de este trabajo se desarrollan a partir de la ecuación de conducción de calor. Sin embargo, las características del reservorio que incluyen las conductividades térmicas de las rocas se necesitan suministrar como variables que condicionen las ecuaciones.

Los registros de temperatura de cada pozo se usaron como condiciones de frontera para validar los cálculos de las temperaturas del Modelo 2D. Entonces, la creación de los perfiles térmicos de los pozos debe incluir características específicas como:

- **La conductividad térmica anisotrópica de los materiales [Estratigrafía]:** Los cambios sucesivos de las capas de roca varían con respecto a la profundidad. En el modelado térmico, se declaran variables en la que se le asignan los valores de conductividad para cada paquete de roca y se asigna el espesor del estrato.

- **Temperaturas estabilizadas de los pozos perforados:** Los registros de temperaturas de los pozos son procesados por métodos estadísticos para analizar su comportamiento y para la validación del modelo.

En muchos de los perfiles de temperatura, la profundidad alcanzada de los pozos geotérmicos es menor a las dimensiones usadas en el Modelo 2D, en estos casos se recurrió al cálculo de las temperaturas por medio de extrapolación del sistema. De acuerdo con las ecuaciones de transferencia de calor, los parámetros que pueden ser usados en la extrapolación numérica, son los gradientes geotérmicos y/o el flujo de calor.

Definición del dominio o geometría del modelo

El problema de resolver el comportamiento de las temperaturas entre dos pozos geotérmicos consiste en plantear un modelo matemático que sea una representación realista y nos conduzca a la solución aproximada del problema físico en cuestión.

Primero, se debe definir una configuración geométrica del modelo en dos dimensiones (2D), construyendo una malla rectangular para cubrir la superficie de cálculo, en ella los extremos laterales están definidos por los pozos geotérmicos y el borde superior está en contacto con la topografía.

Se debe tomar en cuenta la distribución de los nodos que constituyen la malla en el espacio. En la Fig. 25 se ejemplifica la representación real del problema físico que se desea calcular y su comparación con la distribución de la malla estructurada para el cálculo computacional (ver Fig. 26). En este trabajo la topografía de la superficie es despreciable, lo que facilita la construcción de una geometría rectangular del modelo 2D.

Las fronteras del modelo adquieren el nombre de acuerdo con la orientación de los ejes y se dividen en Frontera Norte (T_N), Frontera Sur (T_S), Frontera Este (T_E) y Frontera Oeste (T_W), como se ilustra en la Fig. 27. A las cuales se les asignó

condiciones de frontera específicas por medio de subrutinas que después son retomadas en el modelo 2D, para calcular los valores de las temperaturas.

Las coordenadas de los ejes del modelo están en sistema cartesiano, las cuales, para el modelado computacional, el eje de las ordenadas está representada por la letra j y el eje de las abscisas por la letra i . Es decir, $i = \{1,2,3...n\}$ y $j = \{1,2,3...m\}$ (ver Fig. 27).

Las fronteras T_w y T_E , están limitadas por los registros de temperatura que se utilizan para calibrar y validar el sistema, además de otros parámetros de los pozos como su conductividad térmica variable, profundidad, flujo de calor calculado, etc.

Para el caso de la Frontera Norte [T_N], representa un valor promedio de la temperatura superficial registrada según los datos de INEGI (2016).

Por último, las temperaturas de la Frontera Sur [T_s], se estima mediante una subrutina de cálculo, utilizando los valores de temperatura finales obtenidas en las subrutinas de las fronteras Este y Oeste:

La longitud de las Fronteras Norte y Sur [T_N y T_s], depende de la distancia entre los pozos que se están analizando.

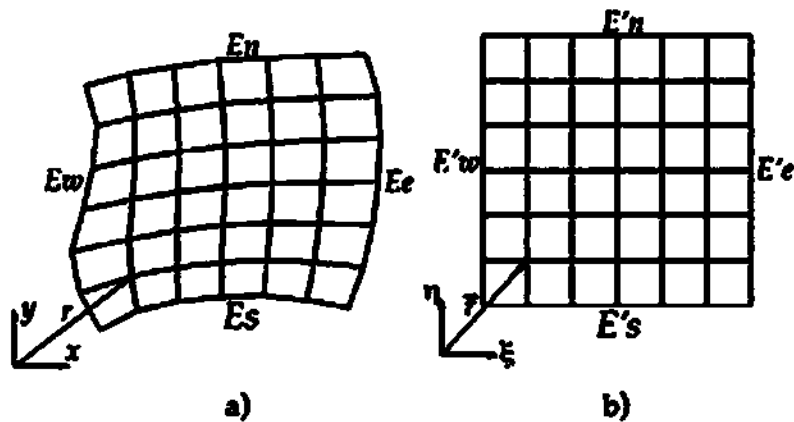


Fig. 25. Representación del espacio curvilíneo; a) Espacio físico b) Espacio computacional (tomada de Sharma, 2017).

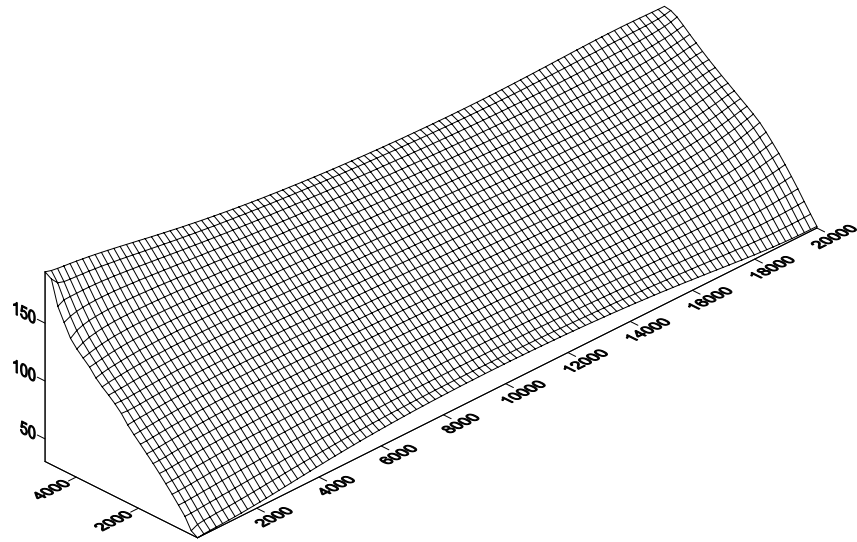


Fig. 26. Ejemplo de malla estructurada que se utilizó en el cálculo computacional.

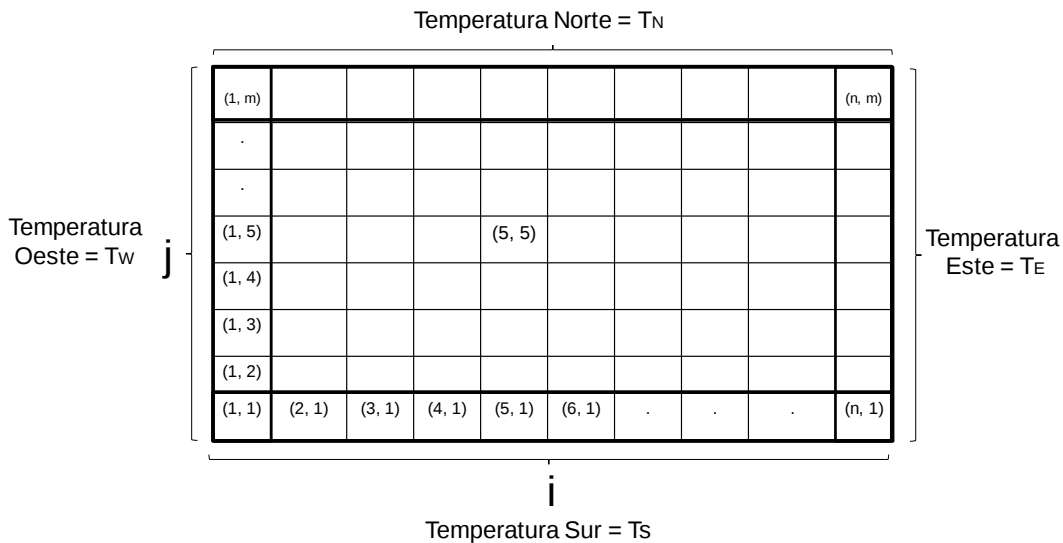


Fig. 27. Configuración geométrica del modelo 2D para el cálculo computacional. Especificando la ubicación de las fronteras y el arreglo de los nodos de la malla.

La modelación térmica requiere de condiciones de frontera reales, para poder obtener valores confiables de la temperatura a profundidad (Flores *et al.*, 2001), tomando en cuenta suposiciones en relación con parámetros del medio, tales como la anisotropía de la conductividad térmica del sistema. Dichos valores son considerados como variables y dependen de la distribución de las estratigrafías de las formaciones geológicas. Se suministran al modelo como coordenadas en los ejes x y y , en los que actúan.

Por eso es importante la construcción de los perfiles estratigráficos, que nos proporcionan la configuración de las conductividades y su distribución conforme la profundidad, para tomarlas en cuenta en el cálculo computacional.

Método de solución numérica TDMA

Después de la discretización en cada volumen de control, se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas. Las cuales se distribuyen en una matriz que puede ser fácilmente resuelta por el algoritmo de Tridiagonal Matrix Algorithm (TDMA), el cual está basado sobre eliminación Gaussiana. Entonces, tenemos la solución de las ecuaciones algebraicas y, por lo tanto, la solución simultánea de las temperaturas calculadas en esos puntos discretos.

[c] Representación de resultados.

Los valores obtenidos a partir del Modelo 2D, desarrollado en Lenguaje Fortran, tienen que ser procesados para poder visualizarse en un entorno gráfico (“amigable”) y de esta manera realizar un análisis de los resultados. Para crear los mapas térmicos, se eligió el software *Surfer 13* en el que se procesaron los datos de temperatura y el *Strater 5* para desarrollar las secciones estratigráficas.

Los resultados de las temperaturas se obtienen de Fortran en un archivo de salida con formato “.txt”. Por lo que es necesario trasladarlos a una hoja de cálculo para poder graficarlos en el software *Surfer 13* y así, crear mapas térmicos para visualizar los cambios de acuerdo con las profundidades de los pozos. En este programa se editaron también los mapas de localización de las zonas de estudio y los resultados que se presentan en este trabajo.

Las secciones estratigráficas se dibujan y verifican antes de ser editadas en el Software comercial *Strater 5*. En este programa se procesan de manera manual y se adecuan a las características que se necesitan representar entre los pozos correlacionados. Indicando los espesores, las escalas, colores y, para los casos de la existencia de fallas, se desplazan las capas correlacionadas.

Capítulo V

Resultados y Discusión

El Modelo 2D, fue aplicado para las zonas de la Caldera de Acoculco, Puebla, la zona de La Primavera, Jalisco y las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua. Con el objetivo de conocer el comportamiento de su campo de temperaturas en régimen conductivo estacionario. Es necesario mencionar que se trata de tres tipos diferentes de yacimientos geotérmicos, el primero de ellos es clasificado como Roca Seca Caliente (HDR), el segundo como un sistema geotérmico convencional con dominio de un mecanismo de convección y el último, considera la geotermia en un ambiente de Cuencas Sedimentarias.

A continuación, se presentan y describen los perfiles térmicos obtenidos de cada una de las áreas y su comportamiento respecto a sus estratigrafías.

5.1 Caldera de Acoculco, Puebla.

Entonces, partiendo de esta idea, este trabajo incluyó las propiedades de las rocas que fueron analizadas de los registros de pozos geotérmicos perforados en la Caldera de Acoculco. Con su información se construyó la correlación estratigráfica y se obtuvieron las conductividades térmicas. Tales características del medio se incluyeron en el modelado térmico. Desafortunadamente, no se tiene información de las propiedades termofísicas medidas directamente de los recortes de roca, sacados durante la perforación de los pozos. Por lo tanto, se recurrió a utilizar valores promedio de conductividades termofísicas, los cuales fueron publicados por Jessop (1990), Ahrens (1995), Schön (1996) y Beardsmore y Cull (2001).

La Caldera Volcánica de Acoculco, Puebla, por sus características es probable que se encuentre en enfriamiento, cuenta con un basamento de roca ígnea de composición granítica que muy posiblemente corresponda a la cámara magmática de la Caldera, es seguido de un paquete de rocas sedimentarias metamórficas con la intrusión de sills de aplita, que compactan y disminuyen la porosidad de la roca. Finalmente, la cima está constituida de capas de rocas procedentes de flujos piroclásticos de los eventos volcánicos de la Caldera (López-Hernández, 2009). Estas características se pueden apreciar en la sección estratigráfica construida en la Fig. 29. Los paquetes de flujos piroclásticos y las rocas sedimentarias metamórficas se encuentran desplazados. Estos desplazamientos verticales y los cambios laterales de las capas se incluyen en la modelación térmica, cuando se indican los valores de las conductividades de los materiales por medio de coordenadas en las que actúan. Los niveles bajos de permeabilidad de las formaciones geológicas de la Caldera favorecen la conducción del calor a través de los materiales, lo cual proporciona certeza a los resultados de nuestro modelo conductivo.

En la validación del modelo 2D se utilizaron los registros de temperatura estabilizada de los pozos geotérmicos, para ajustar los resultados a una tendencia más aproximada a la realidad del sistema. Las gráficas de la Fig. 28 muestran las temperaturas de formación de los pozos geotérmicos y su comportamiento

conductivo. De estas gráficas, podemos observar que en el caso del pozo MEX0060 [Fig. 28(a)], el comportamiento conductivo de las temperaturas de formación se da en todo el perfil, y para reforzar esta observación, un ajuste lineal por mínimos cuadrados (OLS, por sus siglas en inglés) fue añadido para determinar si había o no una tendencia lineal en los datos. Esto se pudo corroborar al ver que los datos están situados prácticamente sobre la línea punteada del ajuste OLS. En el caso del pozo MEX0061 [Fig. 28(b)], se omitió el primer dato por ser una medición muy somera. Después, se puede observar que hay tres tendencias, las cuales cada una tiene su propia pendiente (gradiente geotérmico), siendo identificadas a través de los ajustes OLS, indicando a que datos corresponden. El valor de la pendiente promedio de estas tres tendencias, es decir, el gradiente geotérmico promedio, no describe el comportamiento de los datos graficados.

De este análisis, se concluyó que el gradiente geotérmico estimado entre el segundo y último dato, si describe la tendencia del perfil térmico. Finalmente, se anexaron en cada gráfica de la Fig. 28, su correspondiente simulación numérica, con el fin de demostrar la confiable reproducción de los datos reales.

De acuerdo con los estudios de Teng y Koike (2007), Verma *et al.* (2012), Verma y Gómez-Arias (2013), la profundidad promedio estimada a la que se encuentra la cámara magmática de un reservorio geotérmico, oscila en un rango de 3000 a 5000 metros de profundidad. Aunque esto puede variar y depende de muchos factores del sitio seleccionado para el estudio geotermal. Entonces, se consideró para el sistema de Acoculco, la distancia entre los pozos en el eje-x = 560 metros, mientras la profundidad en el eje-y = 3000 metros, de los cuales obtenemos una malla de 560 x 3000 metros. Entonces, resultan 560 x 3000 volúmenes de control para resolver por las ecuaciones de flujo de calor en dos dimensiones.

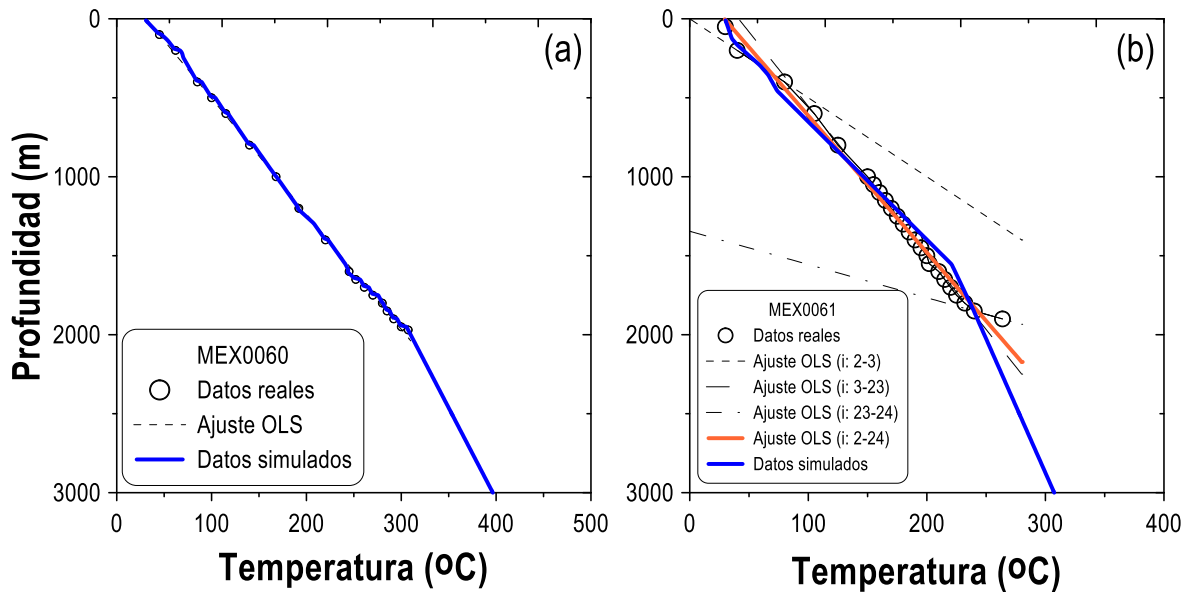


Fig. 28. Perfil de temperaturas estabilizadas de los pozos MEX0060 (a) y MEX0061 (b) de Acoaculco, Puebla. Se incluye ajuste lineal por medio de mínimos cuadrados (OLS) para identificar que datos describen un comportamiento conductivo del reservorio y la línea azul corresponde al comportamiento de los datos simulados en el Modelo 2D.

La Fig. 29 ilustra los resultados del comportamiento de las temperaturas entre los pozos perforados, incluyendo una extrapolación hasta los 3000 m. Esto nos brinda un escenario teórico del perfil de temperaturas más allá de la profundidad máxima registrada. La frontera Oeste, que contempla el pozo MEX0060, a los 3000 m su punto máximo de temperatura calculada fue de 396 °C (ver Fig. 30). Mientras que para el pozo MEX0061 se alcanzó una temperatura máxima de 328 °C.

Se sabe que el comportamiento de las isothermas de temperatura depende de los cambios estratigráficos especificados en la conductividad térmica anisotrópica, además, reproducen las temperaturas estabilizadas proporcionadas como parámetros fijos asignados para cada uno de los pozos (p. ej., Sundberg *et al.*, 2009; Fuchs *et al.*, 2015; Wen *et al.*, 2015; Merriman *et al.*, 2017) (ver Fig. 29).

Sundberg *et al.* (2009) afirma que existe una relación entre las propiedades físicas de las rocas y su conductividad térmica, y que esta última depende de sus características mineralógicas. En este caso, esos cambios más significativos se ven reflejados del paquete de Flujo Piroclásticos de la cima (desde la superficie a los 400 metros), que contrastan con las conductividades de las rocas sedimentarias que se encuentran en la zona intermedia del perfil (aproximadamente de los ~400 a

~1600 metros) e incrementa el valor de la conductividad en el basamento granítico (a partir de los ~1600 metros) (ver Fig. 29).

La geometría del modelo no considera la topografía del terreno, por lo que se supone tener los pozos geotérmicos a la misma altura. Los estudios recientes de Verma y Gómez-Arias (2016) sugieren tomar en cuenta en la modelación térmica, las diferencias de altitud del terreno, y concluyen que cuando la elevación no es incluida, las isothermas presentan un ligero desplazamiento respecto de la profundidad. En el caso de Acoculco, los pozos perforados presentan una diferencia de altitud de ~2 metros, lo que a la escala de computo realizado, puede considerarse despreciable para un posible desplazamiento de los isothermas en función de la profundidad.

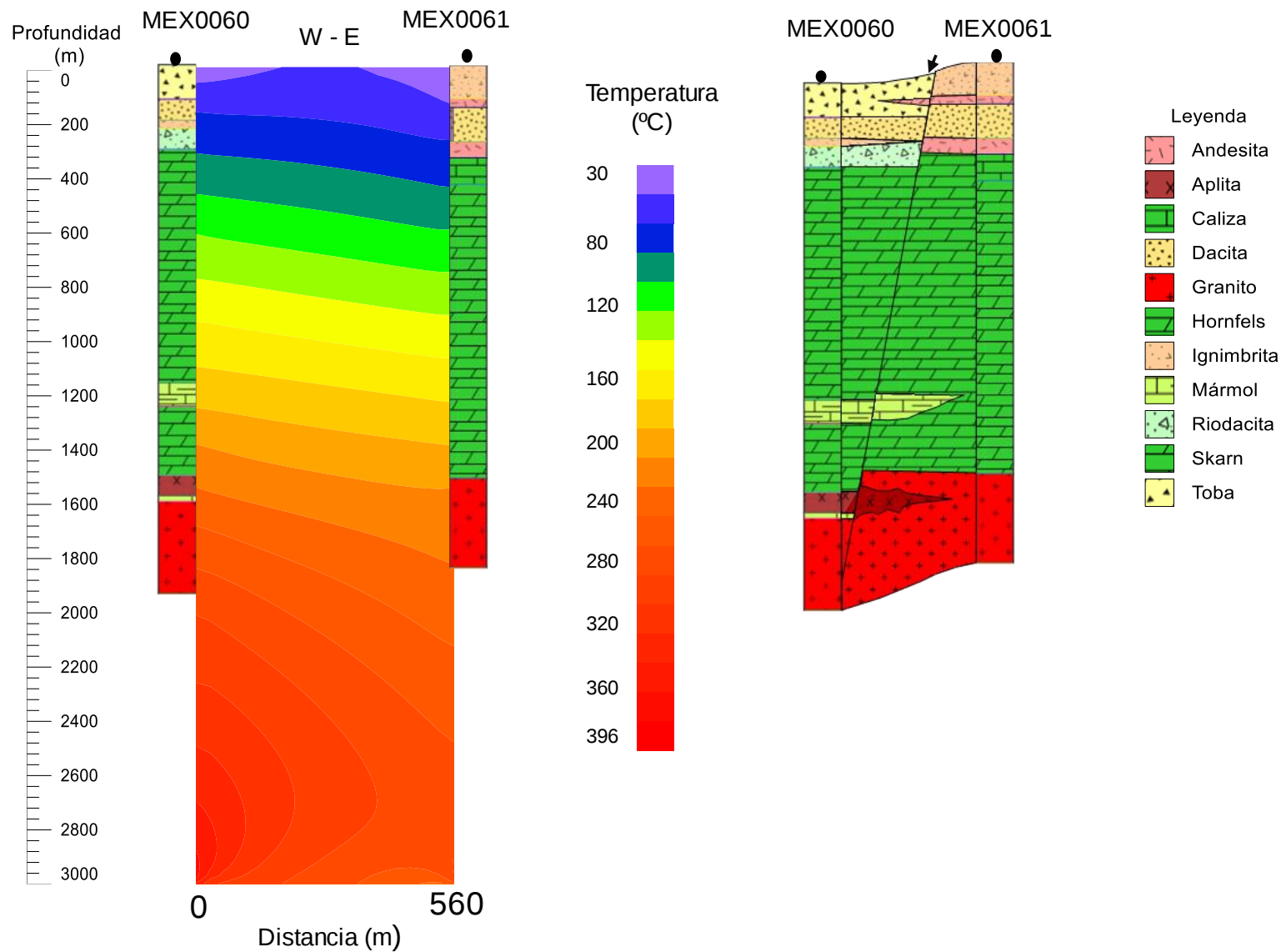


Fig. 29. Perfil de temperaturas y estratigrafía de los pozos MEX0060-MEX0061 de Acoculco, Puebla. Sección W-E.

5.2 Caldera de La Primavera, Jalisco.

El Campo Volcánico de la Sierra La Primavera (LP), se localiza al occidente de la ciudad de Guadalajara, Jalisco. Es clasificada como una estructura de Caldera con productos volcánicos ácidos (Mahood, 1981), en dónde como remanente de la actividad volcano-tectónica cuaternaria, ha quedado un sistema hidrotermal convectivo a profundidad (Maciel-Flores y Rosas-Elguera, 1992).

Fueron perforados trece pozos profundos en la parte central de LP, de estos fueron analizados a detalle los datos de nueve pozos. Con esta información generada por las actividades del proyecto de la CFE, en este trabajo se evaluó el comportamiento conductivo estacionario del campo de temperaturas del reservorio, lo que permitió obtener resultados suficientes para evaluar en forma preliminar y parcial el yacimiento.

El factor más importante que intervino para construir las secciones térmicas fue la distribución de los pozos en la parte central de la caldera. En la Tabla 1, se presenta la orientación, distancia y profundidad del cálculo de las secciones construidas a partir del Modelo 2D.

Tabla 1. Secciones propuestas para el análisis geológico y térmico de la Caldera de La Primavera, se dividieron en dos zonas principales de acuerdo con su orientación: Oeste-Este [W-E] y Norte-Sur [N-S].

SECCIÓN	ORIENTACIÓN	DISTANCIA ENTRE LOS POZOS [m]	PROFUNDIDAD [m]
MEX0825-MEX0821	OESTE-ESTE [W-E]	330	3000 m
MEX0821-MEX0827		230	
MEX0824-MEX0823		210	
MEX0827-MEX0824		240	
MEX0821-MEX0826	NORTE-SUR [N-S]	760	
MEX0824-MEX0828		350	
MEX0010-MEX0823		480	
MEX0826-MEX0827		850	
MEX0827-MEX0828		430	

Las suposiciones más importantes que fueron tomadas en cuenta para la realización del modelo 2D de la Caldera LP, primero fue definir una profundidad de cálculo adecuada para obtener resultados confiables. Los trabajos de Verma y Rodríguez-González (1997), Verma *et al.* (2012), Verma y Gómez-Arias (2016), evalúan el comportamiento del flujo de calor de la cámara magmática, mediante modelación numérica. En estos trabajos, la profundidad promedio para sus modelos en la que se reportan los efectos de la fuente de calor, se encuentra en un rango de cinco a diez kilómetros. Con el objetivo de evitar interferencias del mecanismo de convección que gobierna en la cercanía con la fuente magmática, la profundidad definida para el cálculo computacional de este trabajo fue de tres kilómetros y la longitud de separación depende de la distancia entre los pozos. El cálculo a partir de la profundidad máxima de los pozos se realiza mediante extrapolación, utilizando el flujo de calor promedio estimado para cada uno.

La condición de Frontera Norte equivale a la temperatura superficial, en este caso fue tomada de los valores publicados por la INEGI que oscila entre los 28 y 32°C.

Las condiciones que actúan en las Fronteras Este y Oeste de la malla estructurada dependen de las temperaturas estabilizadas de los pozos involucrados en el cálculo. En la Fig. 30 se presentan las gráficas de los perfiles térmicos de los pozos analizados, las cuales consisten en datos de temperatura-profundidad que fueron utilizadas para el cálculo de las secciones térmicas. Como se mencionó anteriormente, La Primavera es un sistema geotérmico en cuyo reservorio predomina la transferencia de calor conductiva-convectiva, esto puede ser constatado en la Fig. 30. De manera general, se puede observar de los registros térmicos, que la zona conductiva del subsuelo predomina en promedio hasta los 1000 metros de profundidad, ya que el aumento de la temperatura en función de la profundidad tiene generalmente una tendencia lineal. En su mayoría, se puede decir que después de los 1000 metros, comienza la zona conductiva-convectiva (ver Fig. 30). Esto quiere decir, que la conducción del calor que fluye desde la fuente de calor se ve perturbada térmicamente por el flujo de fluido (generalmente agua meteórica que se filtra en el subsuelo), lo que ocasiona una disminución drástica en las temperaturas, rompiendo con la tendencia lineal del aumento de la temperatura-profundidad. La teoría nos dice que el flujo de calor fluye de lo más profundo hacia la superficie, por eso, en un proceso puramente conductivo

de transferencia de calor, se esperaría que el incremento de la temperatura conforme la profundidad se expresara de manera lineal. Sin embargo, esta tendencia lineal no puede ser constante debido a la composición no-homogénea del subsuelo, generando cambios en la pendiente de acuerdo con la variación de la estratigrafía, pero manteniendo siempre la tendencia lineal (p. ej., Bullard, 1939; Lee, 1965; Blackwell, 1971; Chapman y Rybach, 1985; Haenel et al., 1988; Čermák y Rybach, 1991; Beardsmore y Cull, 2001).

La variación de las conductividades térmicas se expresa en el modelo, como la configuración de capas múltiples que obedecen la composición de los materiales geológicos del pozo. Davey *et al.* (2009) comprueba que la conductividad termal de una roca está directamente relacionada o determina la eficiencia con la cual el calor se propaga a través de ella, y después, Merriman *et al.* (2017) mencionan que la variación de las conductividades de las rocas depende de su composición mineral.

Por lo tanto, es esencial para la modelación incluir la conductividad térmica como una variable que dependa de las composiciones del medio rocoso. Lo que hace más precisos y aproximados los resultados calculados en el programa computacional. En este Modelo 2D, cuando las capas de roca no siguen una geometría regular o no hay una relación entre las rocas de los pozos, se decidió construirlos como paquetes rectangulares. Esta suposición se debe a que sería difícil integrar geometrías irregulares en el cálculo computacional, dificultando los cálculos de temperaturas.

En este contexto, se procedió a analizar cada perfil térmico, con la finalidad de determinar las variaciones verticales en el gradiente geotérmico (y flujo de calor). Por ejemplo, de la Fig. 30(a), se muestra el perfil térmico del pozo MEX0821, del cual se pueden observar algunas variaciones verticales. Al menos 4 variaciones son identificadas en la zona conductiva (hasta aprox. los 1000 m de profundidad). Al subconjunto de datos que integra cada una de estas variaciones verticales, se les aplicó un ajuste lineal por mínimos cuadrados (OLS) para estimar los valores de cada pendiente, es decir, las variaciones del gradiente geotérmico, como se puede observar en la Fig. 30(a). Una vez determinadas las pendientes, se procedió a calcular el gradiente geotérmico promedio de dos maneras. Primero, calculando la media de todos los gradientes estimados, en este caso se obtuvo un valor de 283 °C/Km. Segundo, se

estimó la media del gradiente geotérmico (GG) a través de un ajuste OLS aplicado a todos los datos que conforman la zona conductiva, obteniendo un valor de $291\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$. Y por último, se aplicó el mismo ejercicio al flujo de calor que es calculado por el método de Bullard (Bullard, 1939). Estimando un HF promedio de 517 mW/m^2 a través de todas las variaciones verticales identificadas, y un HF promedio de 551 mW/m^2 para todos los datos que integran la zona conductiva. Los valores promedio del gradiente geotérmico y del flujo de calor son de gran utilidad para determinar con mayor exactitud el comportamiento térmico en el subsuelo, más allá de donde se tienen registros Temperatura-Profundidad. Así como la suposición idealizada de cómo sería el perfil térmico, si la transferencia de calor en el reservorio fuera puramente conductiva.

Por mencionar otros ejemplos donde se aplicó el análisis propuesto mencionado anteriormente. Los resultados fueron los siguientes: (I) MEX0823 con un GG promediado a través de los subconjuntos de los cambios de pendiente, $267\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$, y un GG de todos los datos contemplados en la zona conductiva, $251\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$, y para los HF, son 483 mW/m^2 y 469 mW/m^2 , respectivamente. (II) MEX0826 con GG promedios de $107\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$ y $98\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$, y para ambos HF promedio fueron 199 mW/m^2 . (III) MEX0827 con GG promedio de $277\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$ y $300\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$, mientras que para HF, los promedios fueron de 505 mW/m^2 y 546 mW/m^2 , respectivamente. Y (IV) MEX0828 con GG promedios de $177\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$ y $184\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$, y para HF fueron 317 mW/m^2 y 344 mW/m^2 , respectivamente.

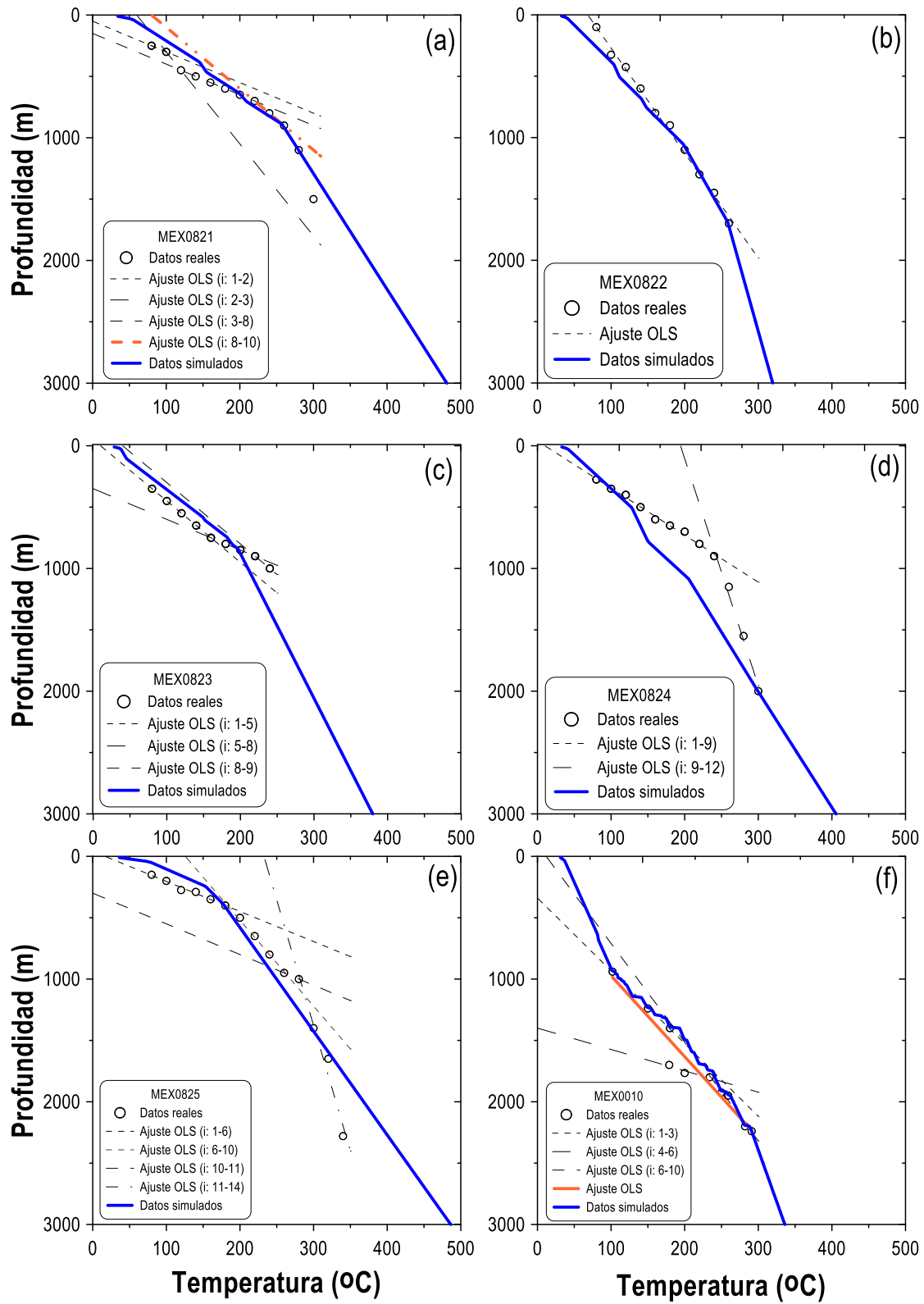


Fig. 30. Gráficas de temperaturas estabilizadas de los pozos de La Caldera de la Primavera, Jalisco (Círculos huecos). Los ajustes OLS realizados a distintos subconjuntos de datos, identificados por líneas punteadas, para distinguir las diferentes tendencias y cambios de pendiente en el gradiente geotérmico. La línea continua (azul) describe el comportamiento de las temperaturas en la simulación numérica.

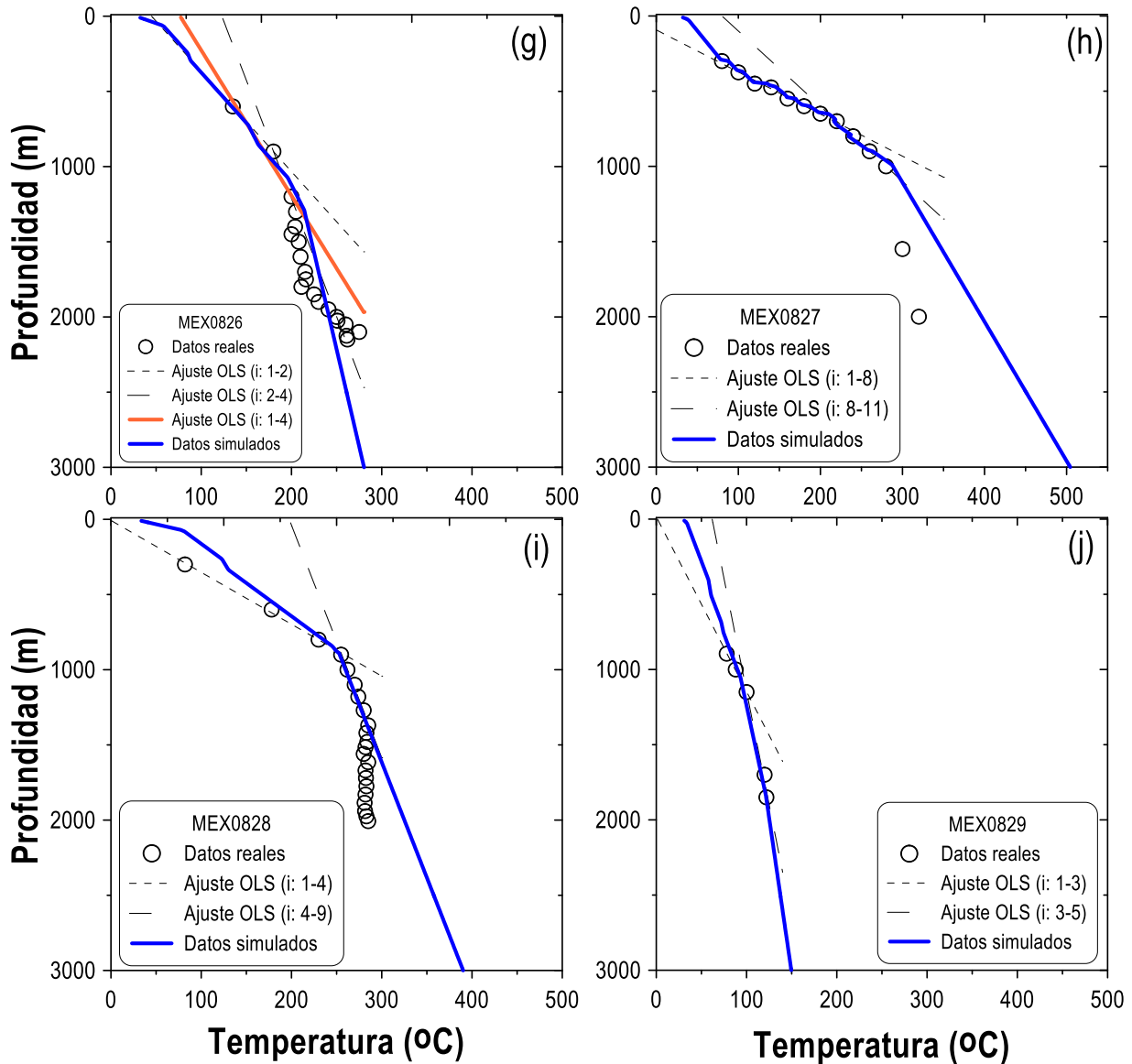


Fig. 30. (Continuación) Gráficas de temperaturas estabilizadas de los pozos de La Caldera de la Primavera, Jalisco (Círculos huecos). Los ajustes OLS realizados a distintos subconjuntos de datos, identificados por líneas punteadas, para distinguir las diferentes tendencias y cambios de pendiente en el gradiente geotérmico. La línea continua (azul) describe el comportamiento de las temperaturas en la simulación numérica.

Entonces, una vez obtenidos los GG y HF promedio, se procedió a simular los perfiles térmicos de cada pozo, como se muestran en la Fig. 30, la línea azul continua describe la reproducción numérica de los datos temperatura-profundidad.

Sin embargo, por no ser perfiles térmicos puramente conductivos, el simulador se ajusta en promedio al comportamiento de todo el perfil, y de acuerdo con la suposición hecha en este trabajo, una vez terminada la zona con tendencia conductiva, se hicieron los cálculos de extrapolación usando los valores promedio del GG y HF.

5.2.1 Secciones con orientación de Oeste a Este [W-E]

Para fines prácticos en este trabajo se decidió dividir las secciones de acuerdo con su orientación. A continuación, se analizarán los perfiles construidos con dirección [W-E], que son MEX0825-MEX0821, MEX0821-MEX0827 y MEX0827- MEX0824:

Estos perfiles fueron seleccionados porque se localizan en la parte central de la Caldera LP, y presentan un comportamiento similar en la distribución de temperaturas. Por encontrarse alineados, muestran cortes consecutivos del área. De estos tres perfiles térmicos seleccionados, en la sección MEX0825-MEX0821 (ver Fig. 31), se puede observar que el pozo MEX0825 tiene una profundidad de 2986 metros, siendo el más profundo de la zona, lo que favoreció la construcción de las correlaciones estratigráficas en las que se asumieron las distribuciones de los estratos de manera aproximada con los reportados en este pozo

Como se puede observar en estas tres secciones térmicas MEX0825-MEX0821, MEX0821-MEX0827 y MEX0827- MEX0824 (ver Fig. 31, 32 y 33), la respuesta del comportamiento de las isothermas es un reflejo de la distribución estratigráfica de los pozos, debido a los valores de las conductividades térmicas de los materiales. Los primeros 400 metros los integran estratos conformados por Sedimentos de lago y por capas de flujos piroclásticos correspondientes a la formación de la Toba Tala, la poca consolidación de los materiales y su alta porosidad le atribuyen conductividades bajas ($<1.5 \text{ W/mK}$), actuando como materiales aislantes, lo cual se refleja con temperaturas menores de $<100 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Las siguientes capas son de riolita, toba lítica y andesita, que aumentan la temperatura, desde los 100 a los $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

En la sección MEX0825-MEX0821 (ver Fig. 31) se tiene una distancia de separación de 330 metros, las temperaturas más elevadas en la profundidad máxima de cálculo (3000 metros) se localizan en el pozo MEX0821 con $486 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a través de los cálculos de extrapolación. La correlación estratigráfica que le corresponde a esta sección térmica se localiza a la derecha de la Fig. 32, en la que de acuerdo con el mapa geológico del sitio (Tinoco-Murillo, 2017), las estructuras de falla más importantes que

afectan los pozos geotérmicos se localizan a la superficie de las capas. En esta sección se encuentran dos fallas normales que desplazan los primeros 1000 metros.

El pozo MEX0825, atraviesa toda la columna estratigráfica que constituye la Caldera LP, lo que facilitó la construcción de las correlaciones de la mayoría de los pozos geotérmicos del área. Lo destacable es la presencia de un basamento que es cortado por el pozo MEX0825 a una profundidad de 2800 metros, conformado por granodiorita y granito, materiales que en la modelación térmica representan los valores más altos de conductividad (>3 W/mK). Las líneas punteadas en la sección estratigráfica representan la interpretación de las distribuciones de las capas en el campo extrapolado.

La sección térmica de la Fig. 32, presenta los valores de temperatura de ~ 503 °C a los 3000 metros, coincidiendo con la misma tendencia de la sección MEX0825-MEX0821 (ver Fig. 31), lo que indica una probable fuente de calor hacia el centro de la Caldera, pero que no tiene relación directa con algún intrusivo por la ausencia de metamorfismo, y que quizás se deba al proceso de enfriamiento de la cámara magmática.

En la Fig. 32, la distancia de separación entre los pozos MEX0821-MEX0827 es de 230 metros, a la derecha se muestra la correlación estratigráfica en la que es apreciable los espesores de las capas y se ilustra el desplazamiento del estrato superficial por fallamiento normal, el cual se localiza entre los ~ 400 a 600 metros de profundidad. Sin embargo, la distribución de los materiales en ambos pozos es muy parecida, lo que facilita los cálculos de temperaturas en el modelo. En este caso los cambios de las conductividades se aprecian como pequeños contrastes que definen las distribuciones de las isothermas y su incremento conforme la conductividad aumenta (ver sección térmica de la Fig. 32).

Los resultados de la simulación térmica de la sección MEX0827-MEX0824 se presentan en la Fig. 33. Cuenta con una separación longitudinal de 240 metros. A la derecha de la figura se ilustra la correlación estratigráfica de los pozos geotérmicos. La máxima temperatura calculada a la profundidad de 3000 metros es de ~ 504 °C y en donde ambos pozos tienden a oscilar en ese rango de temperatura como se puede ver en las isothermas del perfil (ver Fig. 33).

Las correlaciones estratigráficas, se corroboraron con las estructuras del mapa geológico y su correspondencia con los registros de las perforaciones. Así, validando la información del mapa estructural y las pérdidas de fluidos reportados durante la perforación, fue posible localizar una estructura de falla normal con una componente vertical, que desplaza los estratos que conforman los pozos de esta sección. Además, es muy probable que la capa de riolitas corresponda a una probable estructura de domo que inicia en la parte central de la caldera con una raíz, el cual podemos observar en color rojo en la correlación estratigráfica (ver Fig. 33), y se expande de forma radial y se registra en una capa de riolitas de diferentes espesores en todos los pozos geotérmicos de LP.

Asociando el comportamiento de estas tres secciones térmicas de la Caldera LP podemos interpretar que hacia la parte central le corresponden las temperaturas calculadas más elevadas ~500 °C, y la distribución de las isothermas es proporcional a los valores de las conductividades asignados a los materiales.

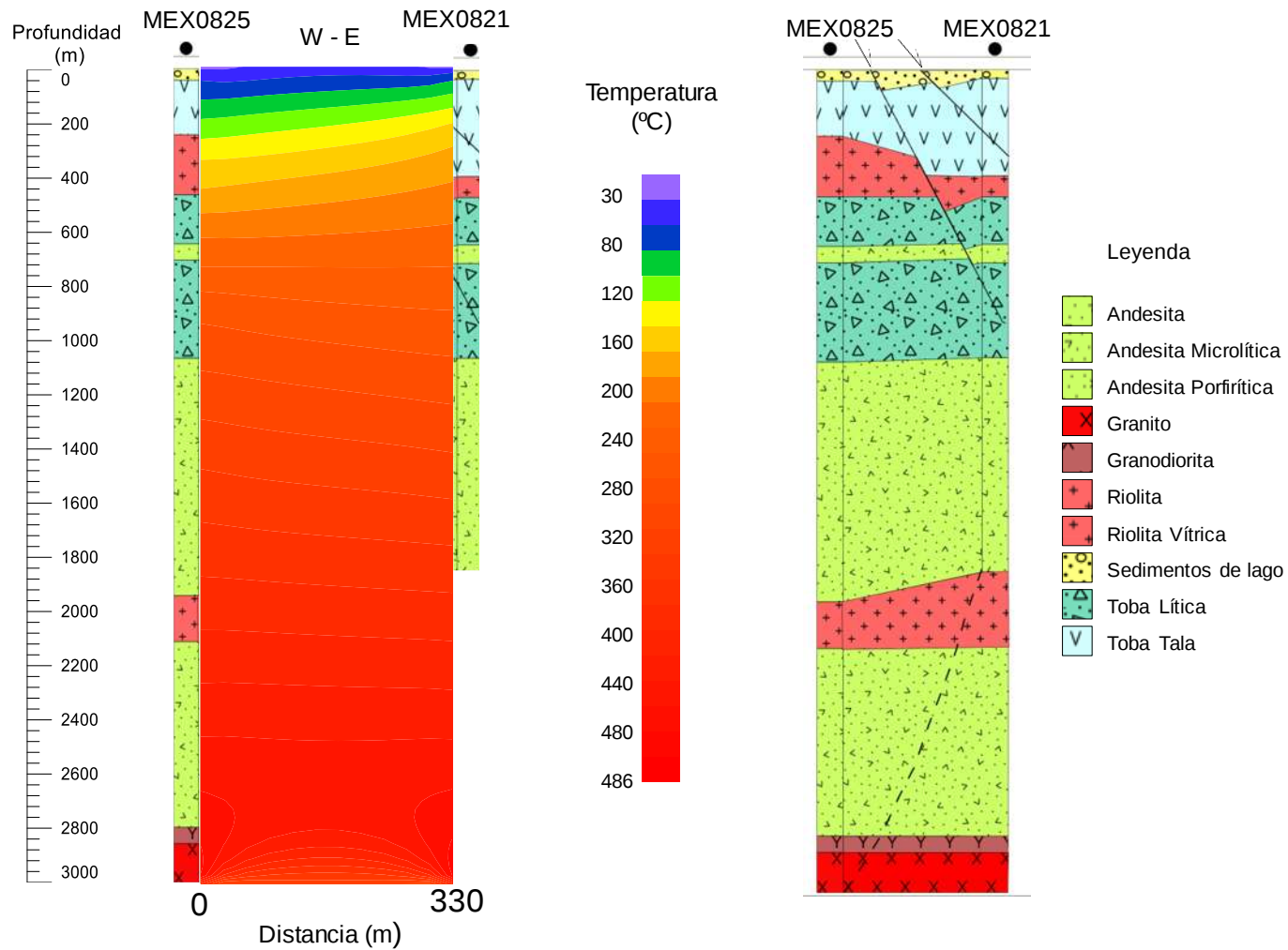


Fig. 31. Perfil de temperatura de los pozos MEX0825-MEX0821 (orientación W-E), pertenecientes a la Caldera de La Primavera. Del lado derecho se localiza la correlación estratigráfica de los pozos y las estructuras de falla que desplazan las capas, así como un basamento granítico registrado en el pozo MEX0825.

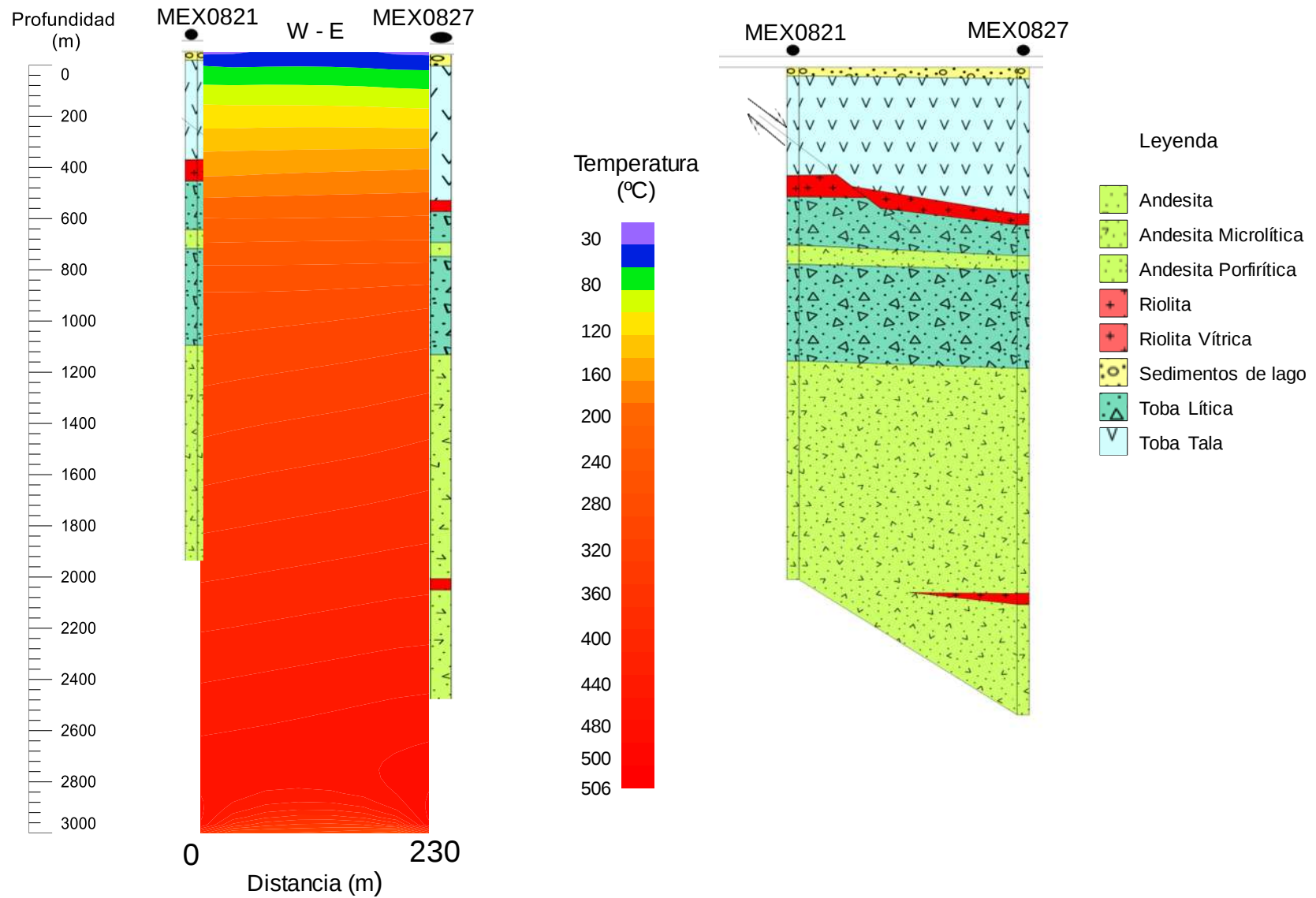


Fig. 32. Perfil de temperatura y correlación estratigráfica de los pozos MEX0821-MEX0827 (orientación W-E), perteneciente a la Caldera de La Primavera.

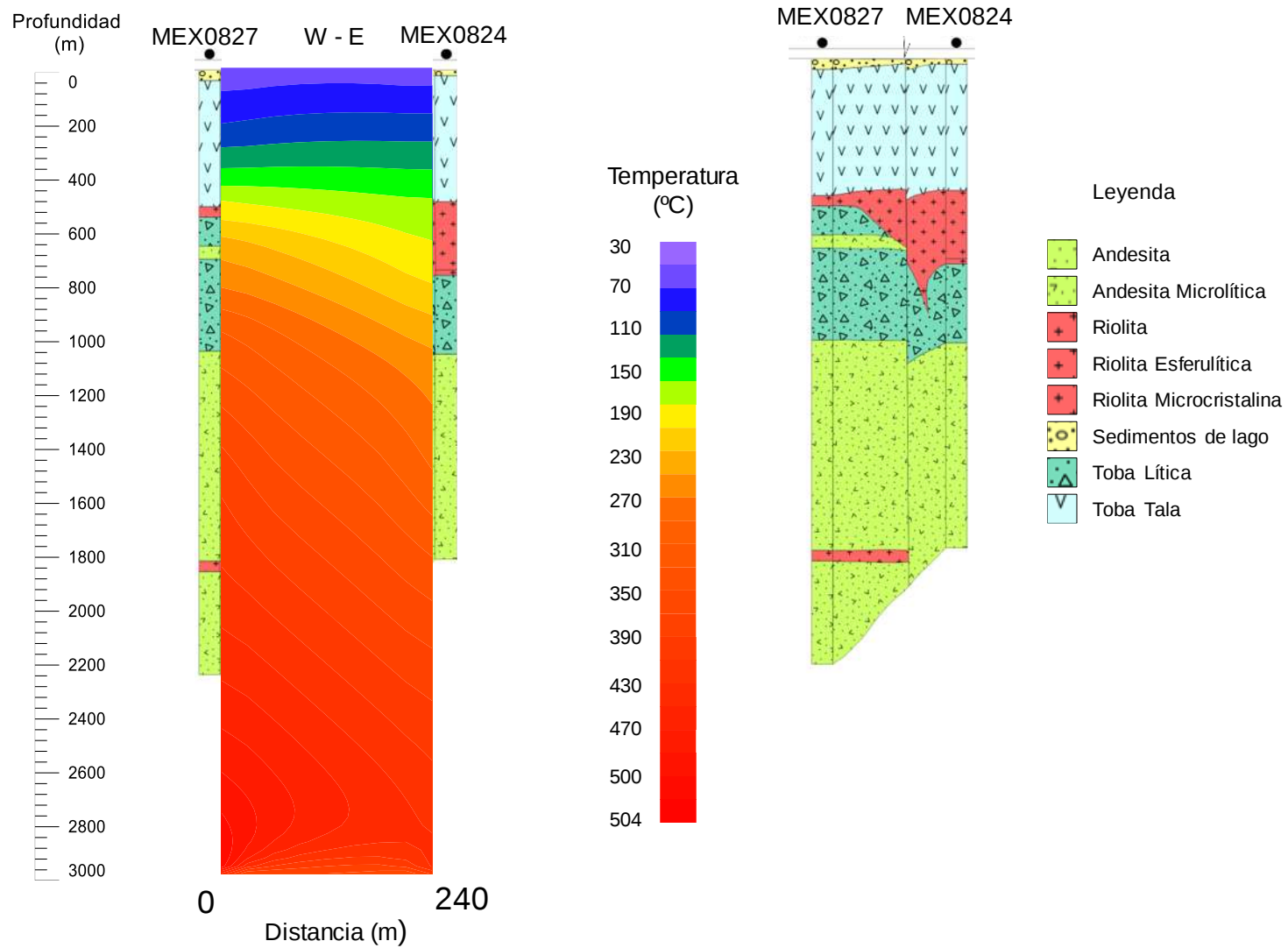


Fig. 33. Perfil de temperatura y correlación estratigráfica de los pozos MEX0827-MEX0824 (orientación W-E), perteneciente a la Caldera de La Primavera. En el perfil estratigráfico, se localiza una posible estructura de domo que tiene su raíz hacia la parte central de la Caldera LP y se expande de forma radial, registrándose en todos los pozos geotérmicos.

La Fig. 34 corresponde a la sección MEX0824-MEX0823, en la cual se reportan temperaturas calculadas de $\sim 405^{\circ}\text{C}$ a la profundidad máxima de cálculo. Lo cual ayuda a corroborar que conforme nos acercamos a la parte central de la Caldera, la temperatura incrementa en esos pozos geotérmicos.

Asumimos que considerando los cambios de los materiales en el modelo 2D, las isothermas tienen un efecto proporcional a las conductividades, lo cual se puede comprobar en el comportamiento de las temperaturas en las capas superficiales constituidas por Sedimentos de lago y flujos piroclásticos de la formación Toba Tala, en los que se tienen valores bajos de conductividad térmica y las temperaturas también lo son. Lo cual coincide con los estudios realizados por Sundberg *et al.* (2009), Fuchs *et al.* (2015) y Wen *et al.* (2015), quienes comprueban que las propiedades mineralógicas de las rocas son un factor determinante en los valores de conductividad y por lo tanto, esto afecta directamente el comportamiento de las temperaturas, en este caso las propiedades mineralógicas de las capas superficiales proporcionan valores bajos de conductividad y por consecuencia también de su temperatura, lo cual es observable en los perfiles térmicos.

De 2000 a 3000 metros se obtienen temperaturas que van del rango de ~ 400 a 500°C , por lo que podemos clasificarlas dentro de las temperaturas de un Sistema Geotérmico de alta entalpía.

La correlación estratigráfica en este caso, como en la sección MEX0827-MEX0824 (ver Fig. 33), considera la existencia de una posible estructura de domo que tiene un conducto de ascenso en la parte central de la Caldera LP, con la existencia de una falla normal con componente vertical que desplaza todas las capas de rocas. La existencia del fallamiento en el caso de esta zona, puede ser producto del colapso de la Caldera y de los eventos de los volcánicos posteriores (Mahood, 1981), que incluyeron un levantamiento por el ascenso de domos alrededor de la estructura de la Caldera. Eso es un factor importante en la geotermia porque garantiza el fracturamiento del yacimiento y favorece su explotación.

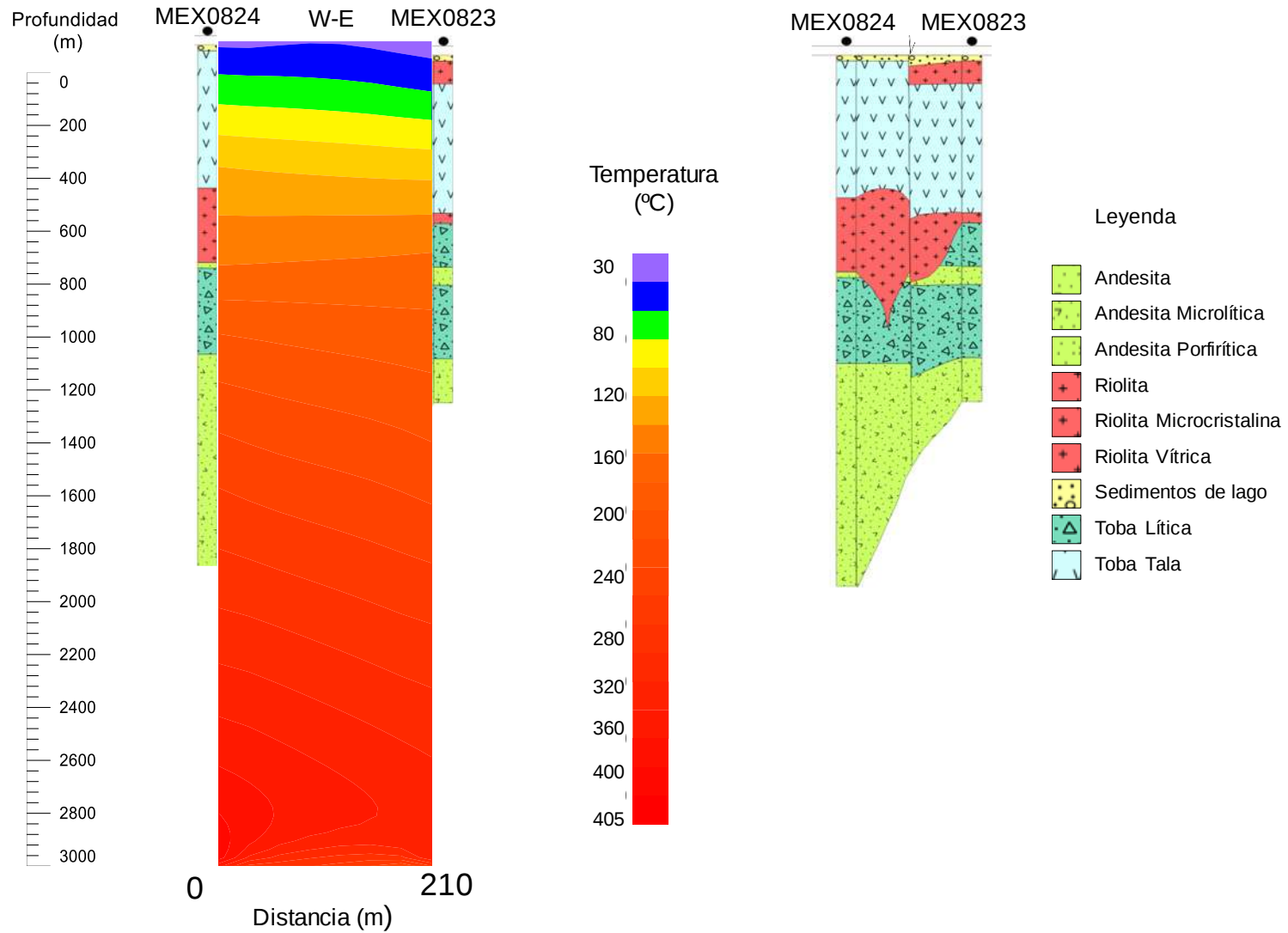


Fig. 34. Perfil de temperatura y correlación estratigráfica de los pozos MEX0824-MEX0823 (orientación W-E), perteneciente a la Caldera de La Primavera. En la correlación estratigráfica se observan los desplazamientos de la falla normal que afecta todas las capas de roca que constituyen los pozos geotérmicos, además, en la parte central se ilustra un posible domo con un conducto de ascenso en la parte central.

5.2.2 Secciones con orientación Norte-Sur [N-S]

A continuación, se describirán tres secciones correspondientes a los resultados de las temperaturas calculadas en los perfiles Norte-Sur:

En la primera correlación realizada entre los pozos MEX0821-MEX0826 (ver Fig. 35), la temperatura máxima de cálculo obtenida a los 3000 metros de profundidad oscila en un rango de 440 a 480 °C. Ocurre una tendencia a incrementarse en la orientación del pozo MEX0821 en los intervalos de profundidad de los 2500 a 3000 metros.

Cabe señalar que las secciones en esta orientación cortan la geomorfología donde existen pequeños grabens limitados por fallas normales a los extremos laterales, las cuales están asociadas con el hundimiento del evento volcánico que formó la Caldera de LP (Mahood, 1981). En la correlación estratigráfica de esta sección MEX0821-MEX0826 (ver Fig. 35), se localizan dos fallas normales que conforman un pequeño graben. Estos desplazamientos se contemplaron en la construcción del Modelo 2D y los efectos de estos cambios están asociados al comportamiento de las isotermas que siguen esta tendencia y se observan en el perfil térmico de la Fig. 35.

El siguiente perfil térmico de los pozos MEX0826-MEX0827 (ver Fig. 36), es la continuación de la sección anterior (Fig. 35). Por lo tanto, los resultados de las temperaturas se complementan y el incremento de la temperatura se concentra hacia la parte central en donde se localiza el pozo MEX0827, las temperaturas máximas calculadas en este perfil térmico han sido hasta de ~504 °C, que ha sido la máxima calculada en el modelado de esta área.

La correlación estratigráfica refleja las estructuras de falla normales localizadas en el mapa geológico, formando una estructura pequeña de graben en la parte central de la Caldera. Las fallas se extienden hasta los ~2000 metros de profundidad de los pozos geotérmicos, desplazando todas las capas de la correlación. La distancia de separación de los pozos geotérmicos en este perfil es de 850 metros y en este estudio es la distancia máxima de cálculo que se contempló.

El perfil térmico de los pozos MEX0010-MEX0823 (ver Fig. 37), tiene una longitud de 480 metros. Este perfil registra una temperatura de ~349°C a los 3000 metros de profundidad.

En la construcción de la correlación estratigráfica, además de los dos pozos involucrados, se agregó el pozo MEX0824 para poder correlacionar las capas y tener una mejor aproximación de la configuración de los estratos de roca. En esta correlación, es posible observar las fallas normales que desplazan las capas de roca, formado pequeños grabens y se ilustra en color rojo los estratos de riolitas que conforman la posible estructura de domo, que se expande de forma radial desde la zona central de la caldera, y se registra en los pozos geotérmicos como una capa de riolita que aumenta su espesor hacia la parte central de la Caldera y disminuye conforme se aleja.

La estructura de domo también se encuentra afectada por las estructuras de falla normales, lo que proporciona al yacimiento geotérmico las condiciones adecuadas de fracturamiento que favorecen el ascenso de fluidos.

En esta sección se observa como las isotermas obedecen la distribución de los valores de las conductividades consideradas en el Modelo 2D (ver Fig. 37).

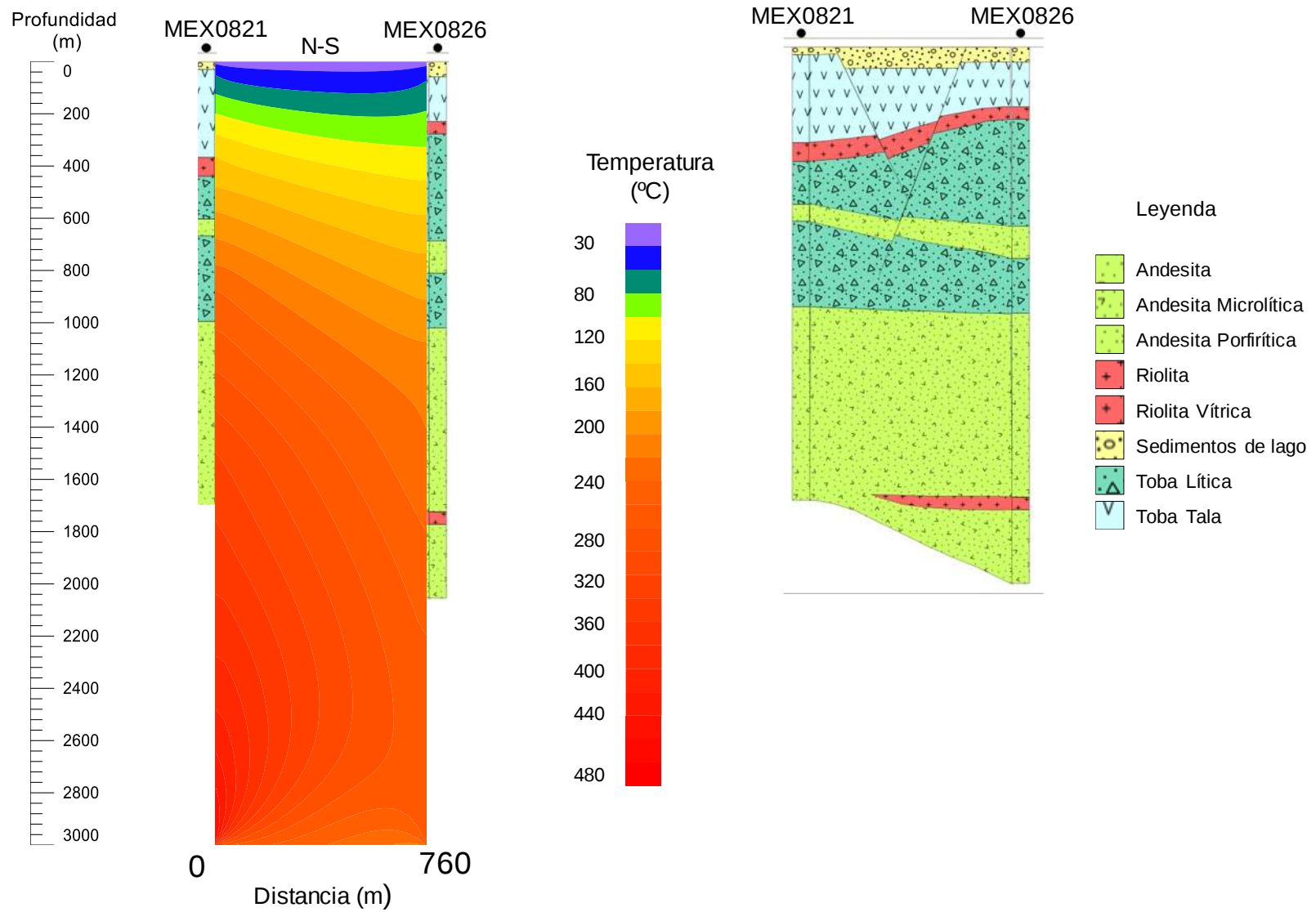


Fig. 35. Perfil de temperatura y correlación estratigráfica de los pozos MEX0821-MEX0826 (orientación N-S), perteneciente a la Caldera de La Primavera.

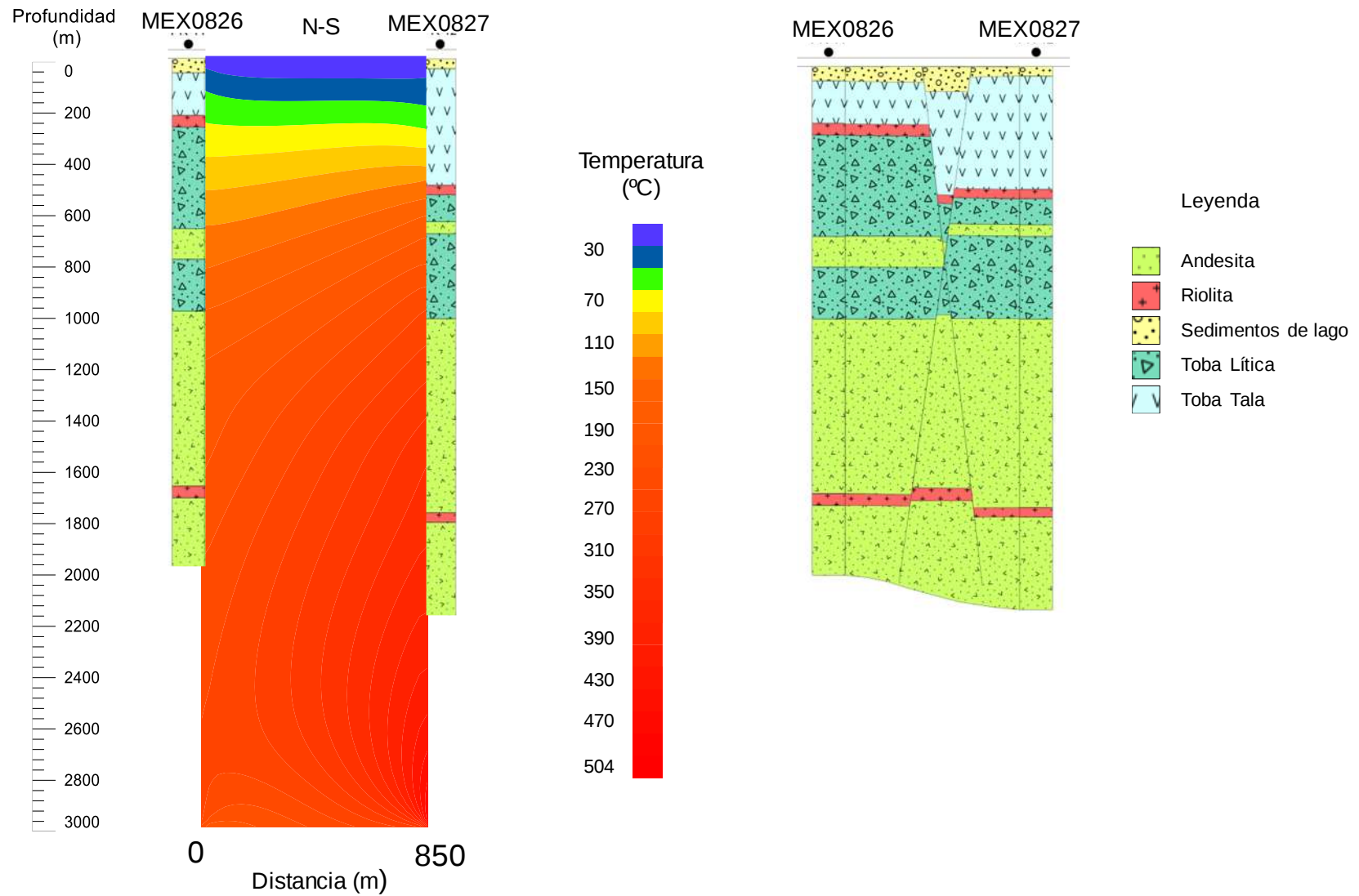


Fig. 36. Perfil de temperatura y correlación estratigráfica de los pozos MEX0826-MEX0827 (orientación N-S). Incluyendo ilustración del fallamiento normal que forma una pequeña estructura de graben.

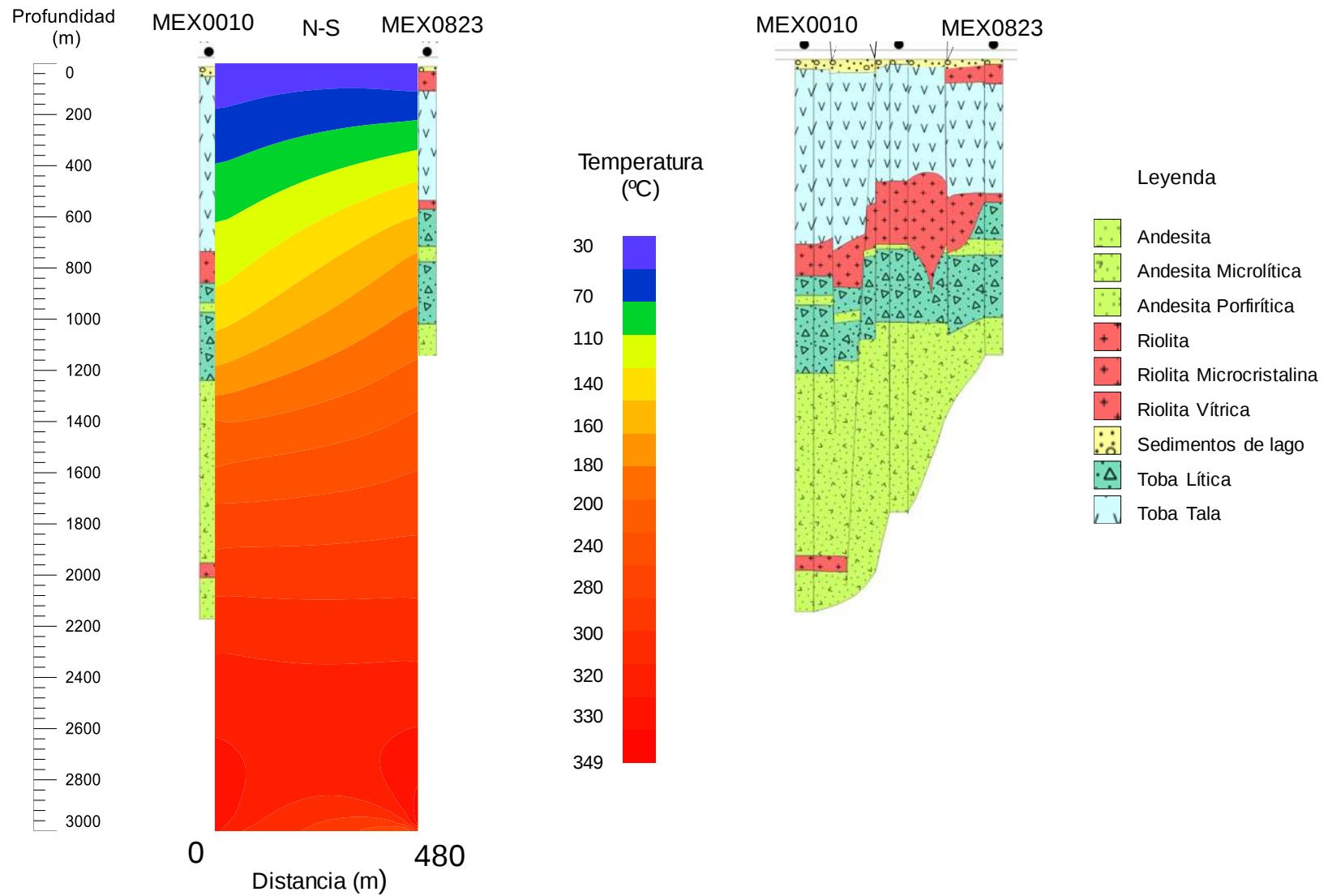


Fig. 37. Perfil de temperatura y correlación estratigráfica de los pozos MEX0010-MEX0823 (orientación N-S). El perfil estratigráfico nos ilustra la distribución de las fallas normales en la sección que genera desplazamiento de las capas en bloques, proporcionando permeabilidad al yacimiento.

Las Fig. 38 y 39 exhiben las temperaturas calculadas de las secciones MEX0824-MEX0828 y MEX0827-MEX0828.

El perfil conformado por los pozos MEX0824-MEX0828, alcanza una temperatura máxima de $\sim 405^{\circ}\text{C}$ (ver Fig. 38), en su correspondiente correlación estratigráfica es posible observar el desplazamiento de los estratos por fallamiento normal y la raíz del posible domo de composición riolítica.

Mientras el perfil integrado por los pozos MEX0827-MEX0828, presenta temperaturas de ~ 470 a 504°C (ver Fig. 39), en un rango de profundidad de 2500 a 3000 metros. Para la construcción de su sección estratigráfica se consideró la integración del pozo MEX0824, para complementar la información y realizar una correcta correlación de los estratos.

Se asumió que las capas de roca transmiten el calor de manera conductiva y despreciamos los efectos de la circulación convectiva de los fluidos que puedan existir a profundidad. Estos perfiles se localizan en la región central de la primavera y las temperaturas evaluadas se encuentran en un rango de ~ 400 a 504°C (ver Fig. 40 y 41). En este caso, se puede notar como la raíz de la estructura del domo se localiza en el punto central de las correlaciones y está formado por la capa superior de riolitas.

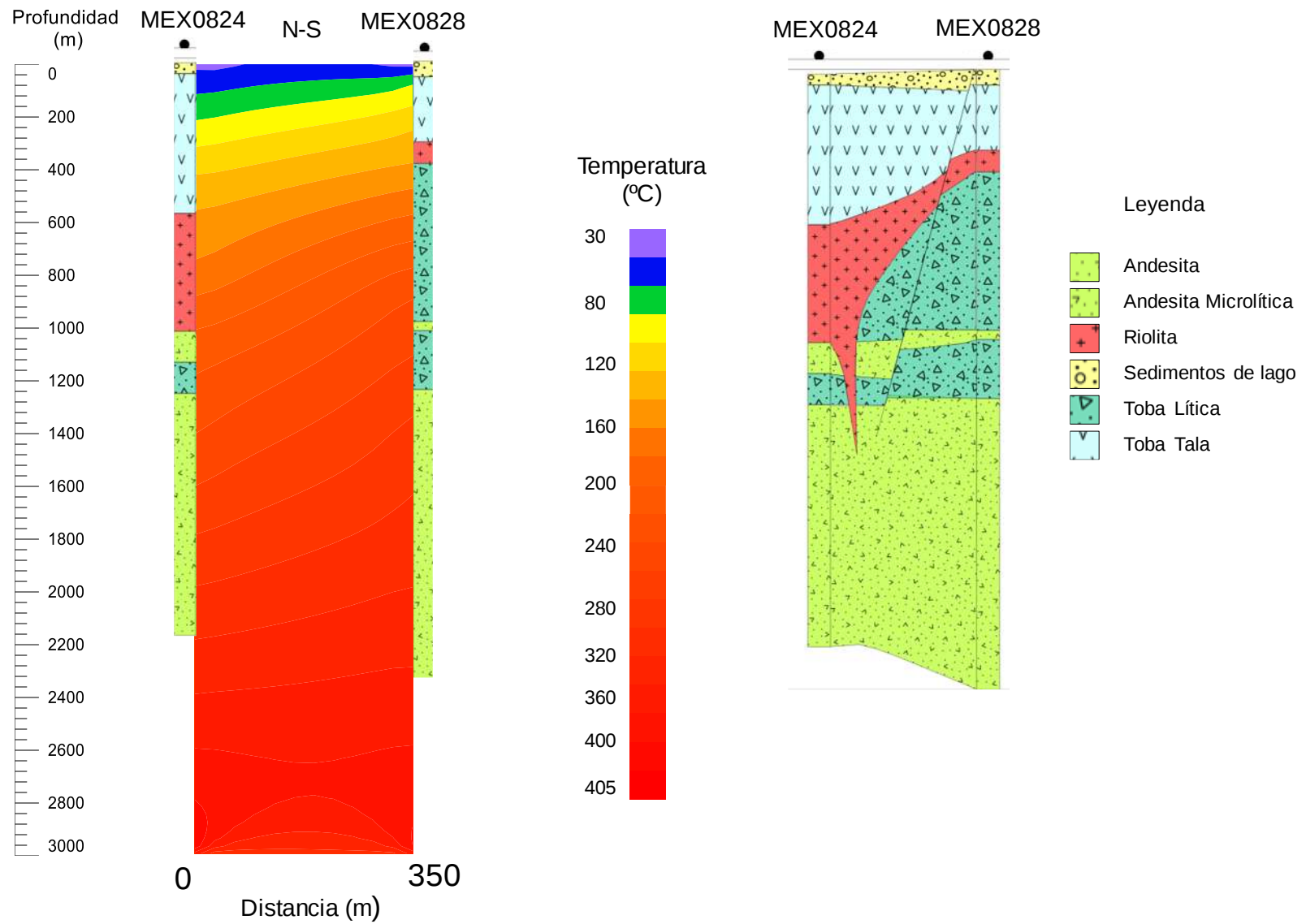


Fig. 38. Perfil de temperatura y correlación estratigráfica de los pozos MEX0824-MEX0828 (orientación N-S), perteneciente a la Caldera de La Primavera.

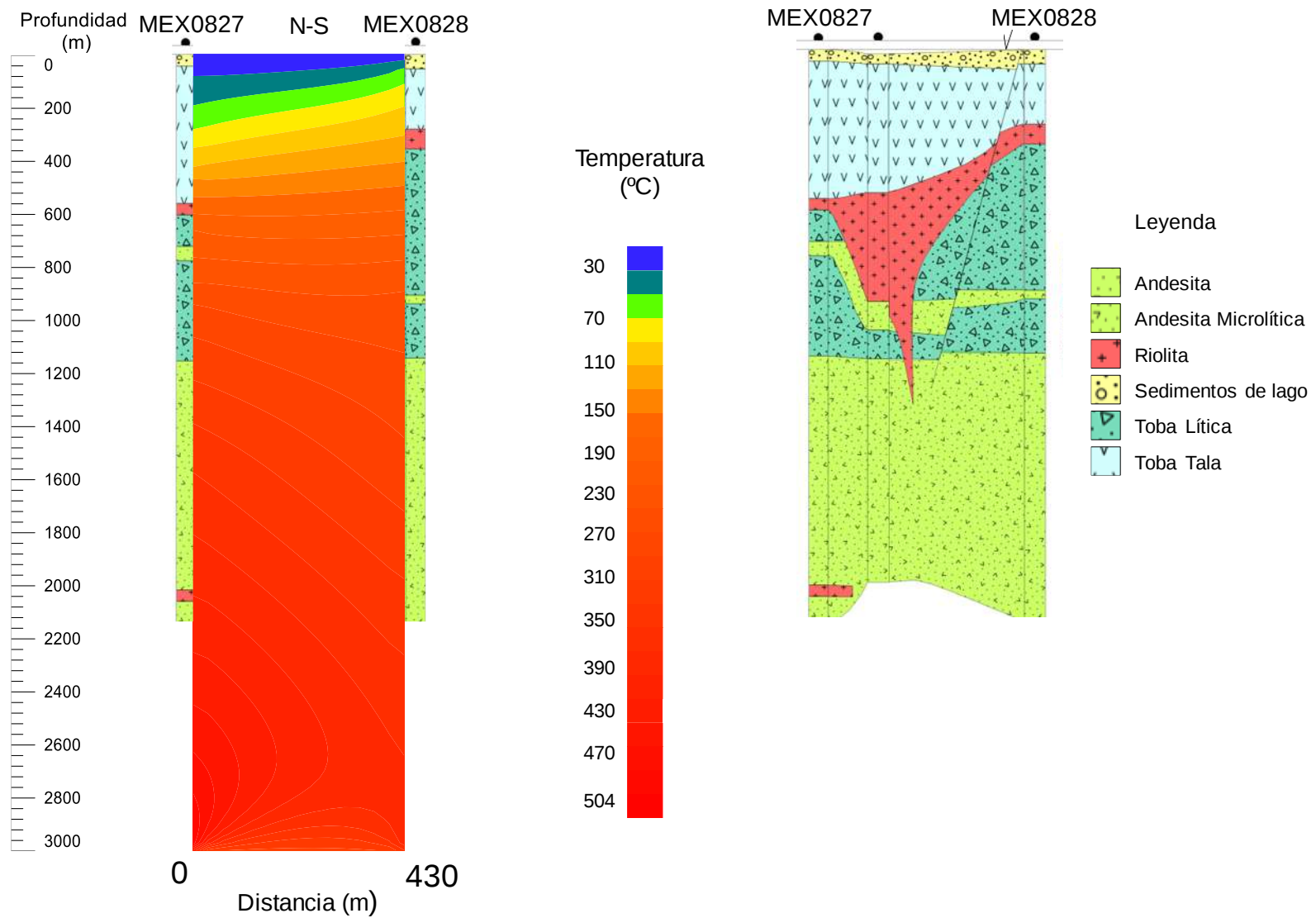


Fig. 39. Perfil de temperatura y correlación estratigráfica de los pozos MEX0827-MEX0828 (orientación N-S), perteneciente a la Caldera de La Primavera.

En resumen, de los perfiles térmicos mostrados en las Figs. 31-39, se pudo observar como sería el estado natural térmico conductivo en la Caldera La Primavera, de acuerdo con el análisis y suposiciones hechas en este trabajo las altas temperaturas estimadas en el reservorio a los 3000 metros de profundidad nos indican que sin duda LP es un sistema geotérmico de alta temperatura. Remarcando que estas temperaturas estimadas son el producto de suponer que no existe zona convectiva en el subsuelo, como se observa en los registros de temperatura-profundidad en la Fig. 30. Las tendencias conductivas observadas en los registros térmicos, al ser extrapoladas dieron los resultados aquí reportados. Otra manera de expresar lo anterior, es que las temperaturas estimadas a los 3000 metros de profundidad son las teóricamente necesarias para que se dieran las temperaturas observadas en la zona conductiva del reservorio. Aunado a esto, de la Fig. 30 se puede observar que las temperaturas de la zona conductiva-convectiva oscilan en los 300 °C. Por último, para reforzar los resultados obtenidos en los cálculos de los perfiles de temperatura de la Caldera de LP, estos se ajustan a los resultados de simulación numérica de los trabajos de Verma *et al.* (2012), Verma y Gómez-Arias (2016), de la Caldera LP, en los que se evaluó el comportamiento de la temperatura de la cámara magmática.

Otra manera de visualizar los perfiles de temperatura fue a través de una perspectiva tridimensional (ver Figs. 40-43), para complementar el análisis y la representación del comportamiento de las isotermas y la estratigrafía de los pozos calculados en el Sistema Geotérmico.

Se pueden observar los datos extrapolados de temperatura, y la relación directa con la estratigrafía de los pozos geotérmicos. Es importante destacar que el incremento de las temperaturas es hacia el centro de la caldera, y el comportamiento teórico conductivo del yacimiento describe el estado natural del macizo rocoso. Las temperaturas estimadas oscilan en un rango de los 450 a los 504 °C, a los 3000 metros de profundidad.

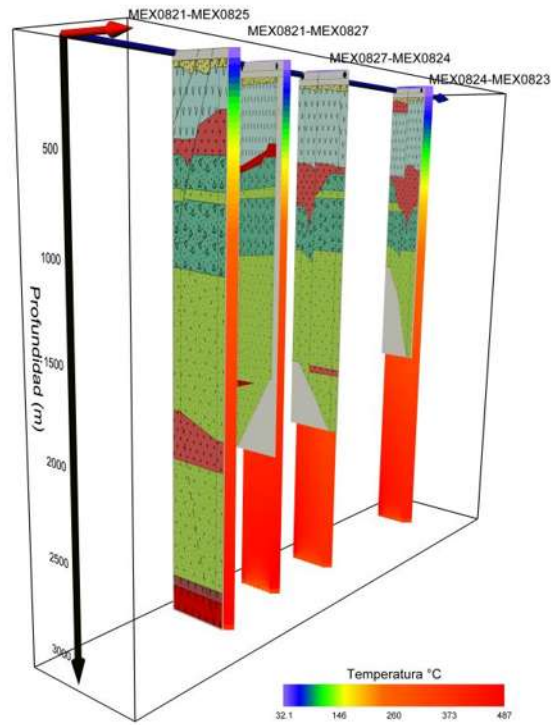


Fig. 40. Perfiles térmicos con orientación Este-Oeste (W-E), incluyendo los perfiles estratigráficos.

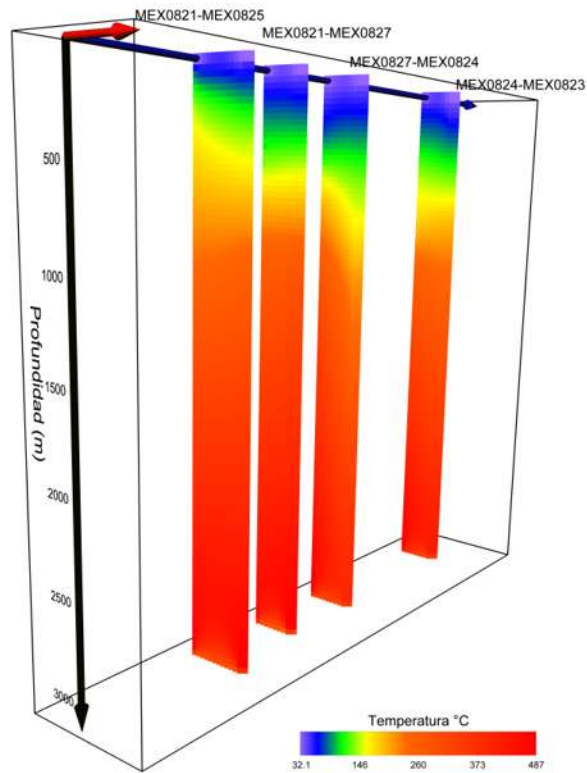


Fig. 41. Perfiles térmicos con orientación Este-Oeste (W-E).

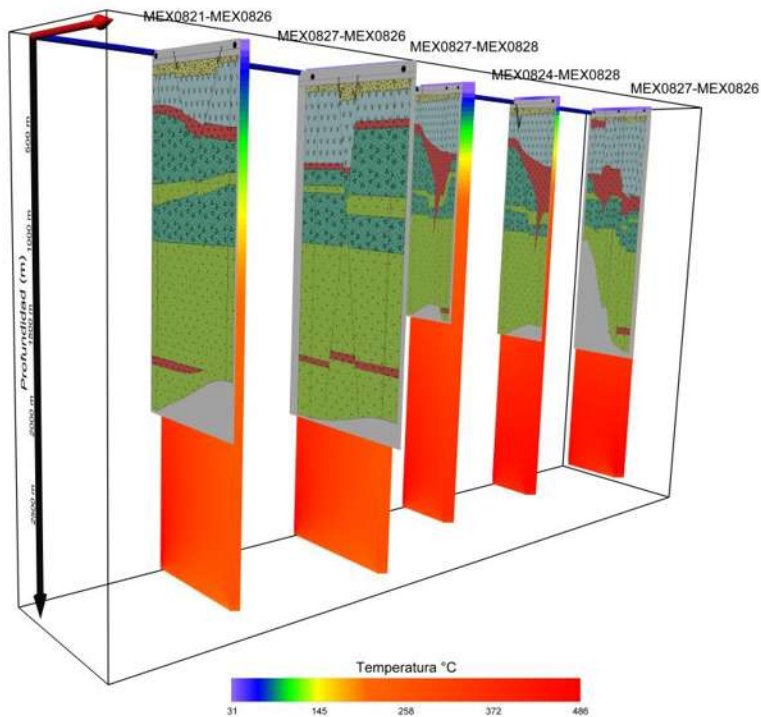


Fig. 42. Perfiles térmicos con orientación Norte-Sur (N-S), incluyendo los perfiles estratigráficos.

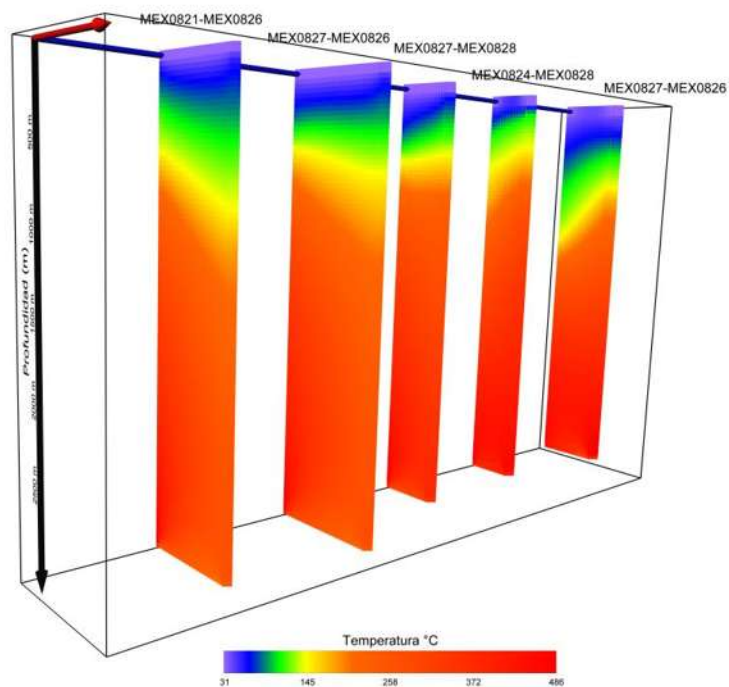


Fig. 43. Perfiles térmicos con orientación Norte-Sur (N-S).

5.3 Mapa de Flujo de Calor de La Primavera, Jalisco.

Con los valores de Flujo de Calor calculados a partir de la información de los pozos geotérmicos, y las coordenadas de los pozos, se construyó un mapa para visualizar la dispersión de los datos (ver Fig. 44). La ubicación de los pozos seleccionados para realizar los cálculos con el Modelo 2D pueden ser apreciados en el mapa. Lo que resalta a simple vista es una concentración de Flujo de Calor hacia el centro de la Caldera, que coincide con los resultados obtenidos en los perfiles térmicos de este trabajo. Sin embargo, es necesario señalar que la distancia y número de pozos puede ser un factor importante al momento de generar el mapa. Lo cual significa que los pozos más alejados del centro no necesariamente presentan valores bajos de Flujo de Calor, si no por la ausencia de datos intermedios con los cuales se puedan correlacionar los sitios que se muestran como puntos aislados. Por lo tanto, para evitar interpretaciones erróneas de interpolación se consideró necesario delimitar el mapa HF con la información de los pozos que se tenía (ver Fig. 44).

El pozo MEX0825, es el más profundo del área de estudio y presenta el valor de Flujo de Calor más alto para la zona de La Primavera. Esto podría ser efecto de su cercanía con la posible fuente de calor del Sistema Geotérmico. Su información estratigráfica fue de utilidad para validar el modelo y construir las secciones de los otros pozos geotérmicos. Mismas consideraciones integradas a la modelación térmica para obtener cálculos que pueden ser más realistas.

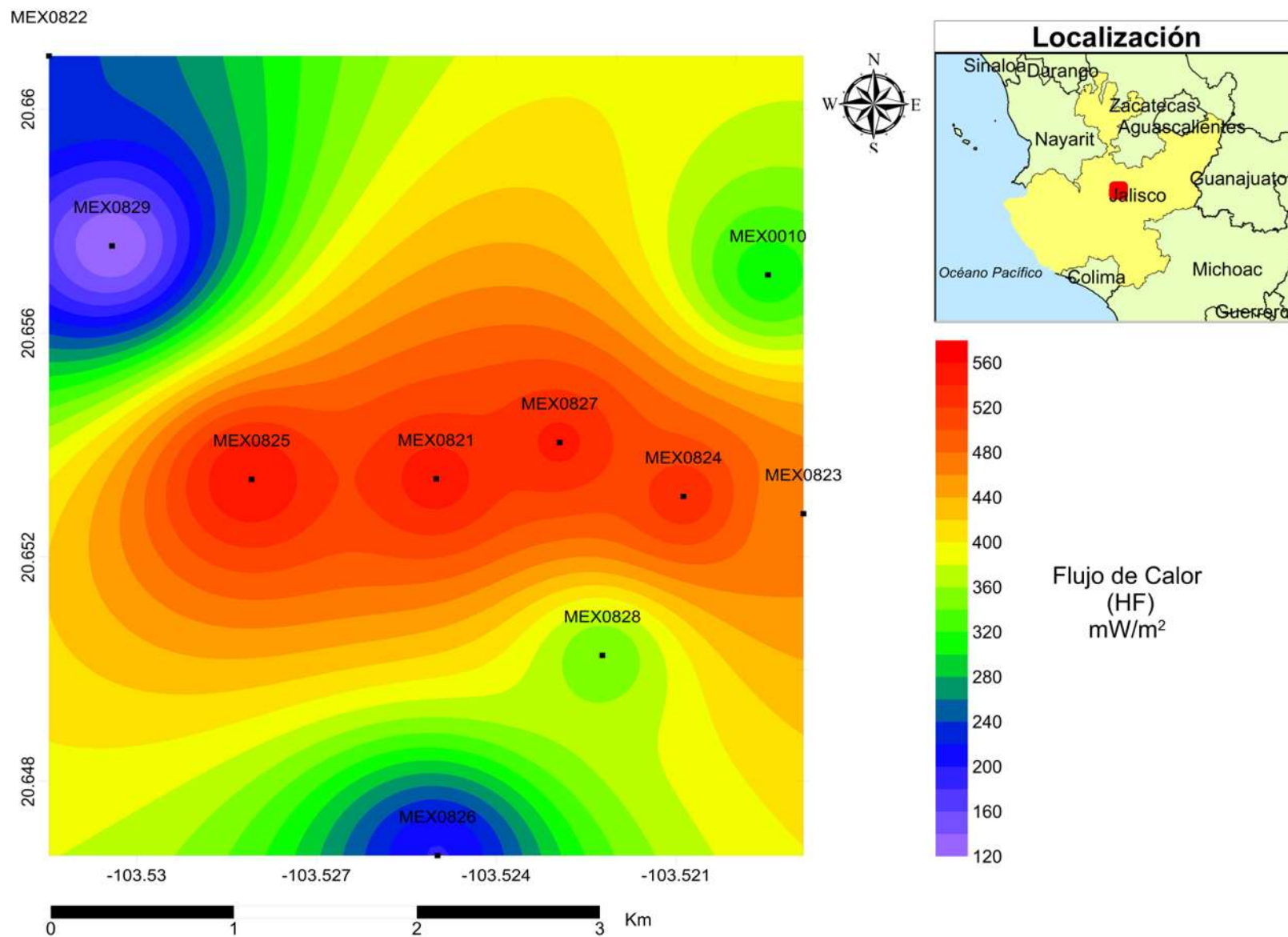


Fig. 44. Mapa de Flujo de Calor superficial de La Primavera, Jalisco.

5.4 Cuencas Sedimentarias al Norte de Chihuahua

La zona en la que se distribuyen los pozos petroleros abandonados abarca una extensión de aproximadamente 44,000 km² y para realizar la simulación térmica utilizando el modelo 2D, se dividió en dos regiones principales: La Región I, que se localiza al norte; y la Región II, al sur de de la cuenca sedimentaria. A su vez se realizaron las secciones correspondientes para cada región, en dos direcciones preferenciales Norte-Sur [N-S] y Oeste-Este [W-E] (ver Fig. 46).

Se tomaron en cuenta los cambios estratigráficos reportados en los pozos petroleros abandonados, con la finalidad de tener un comportamiento más realista del modelo térmico. En los cambios de facies de los paquetes de rocas sedimentarias que tienen una conductividad semejante, se tomó su promedio representativo de los estratos de las formaciones sedimentarias, con la finalidad de hacer más simple el cálculo computacional. Las rocas sedimentarias se encuentran en un rango de valores de conductividad de >1.5~2.5 (W/m K) según datos reportados por Sundberg *et al.* (2009), Wen *et al.* (2015) y Merriman *et al.* (2017), que coinciden con los datos proporcionados en los reportes de PEMEX y que fueron empleados en los cálculos de este modelo térmico.

A su vez, en el eje-x del modelo se representa la distancia de separación entre los pozos, en este estudio la longitud supera los 10 km, lo que simboliza una desventaja para realizar con detalle los cambios horizontales sucesivos de las facies sedimentarias. Una manera para resolver este problema fue construir secciones cronoestratigráficas con la utilización de las eras geológicas. Las correlaciones que se muestran, es una ilustración del acomodo de las formaciones sedimentarias, pero no representan las condiciones reales de los paquetes tomados en el modelo que fueron asignados por las conductividades, el cual se consideró como un arreglo geométrico rectangular que representan los cambios de los materiales.

Los trabajos de modelación geotérmica como el de Fuchs y Balling (2016) de cuencas sedimentarias de Alemania o los realizados por Verma y Gómez-Arias (2013) en la Caldera de La Primavera en México, consideran un promedio de profundidades de 5 a 20 km, con el cual resaltan el comportamiento de las temperaturas en el basamento

cristalino o modelan la fuente magmática. En este proyecto, el objetivo es obtener el cálculo de las temperaturas en la capas superficiales de la cuenca sedimentaria, por lo que se estableció tomar como medida promedio 5 km de profundidad en el eje-y. Además, la mayoría de los pozos petroleros abandonados sobrepasan esta medida de profundidad.

Las condiciones de frontera, fueron indicadas en el modelo como cuatro subrutinas que se integran al código numérico 2D por medio de una iteración. Las fronteras fueron especificadas para cada una de las secciones, con las características de los pozos involucrados en el cálculo. A continuación, se mencionan los parámetros generales de las Fronteras Este [E], Oeste [W], Norte [N] y Sur [S]:

La Frontera Este [E] y Oeste [W]: Se indican en dos subrutinas, cada una por separado, en las que se integra las características de los pozos, una para la posición Este [E] y la otra en la orientación Oeste [W] de la sección que esta siendo calculada. Se consideran los cambios de la conductividad relacionados con la estratigrafía reportada para el pozo, su distribución en la profundidad y en el eje horizontal. Se indican mediante intervalos de coordenadas en los que actúan tales condiciones. En el caso que el pozo tenga profundidades menores a los 5 km, se utiliza el flujo de calor promedio para la extrapolación del sistema.

La Frontera Norte [N]: En la subrutina se indica como una condición inicial constante que involucra la temperatura ambiente del sitio bajo estudio.

La Frontera Sur [S]: En esta subrutina se hace una interpolación entre el último dato calculado de la temperatura de la Frontera Oeste y la temperatura final de la Frontera Este del sistema. A partir de estas temperaturas, se especifican las ecuaciones que actúan en el borde de la frontera sur.

Conforme la distancia incrementa, la malla para realizar el cálculo de temperaturas también lo hace, aumentando el número de volúmenes de control que son necesarios resolver, en este caso el problema de resolver una malla más fina es que se necesita mayor capacidad del equipo computacional. Lo cual representa una desventaja, en este caso se decidió resolver el problema tomando una malla, que resolviera un volumen de control cada 100 metros de distancia en el eje-y, como consecuencia los resultados

obtenidos nos permiten un acercamiento aproximado al comportamiento del flujo de calor en estas cuencas sedimentarias.

En la Tabla 2 se muestran las secciones que fueron realizadas con los pozos petroleros de la Cuencas de Chihuahua, en ella se indica la orientación y distancia entre los pozos, así como la región de cálculo que se determinó trabajar.

La distribución de los pozos se muestra en el mapa de flujo de calor que fue construido en el área (ver Fig. 46).

Tabla 2. Secciones de temperatura realizadas con los pozos petroleros inoperantes de la Cuenca de Chihuahua, México, se dividieron en dos Regiones principales. Se indica la orientación, distancia entre los pozos considerando una profundidad de cálculo de 5000 metros.

SECCIÓN	ORIENTACIÓN	DISTANCIA ENTRE LOS POZOS [Km]
MXPUB010-MXPUB012		20
MEXPUB003-MXPUB013	REGIÓN I NW-SE	50
MEX0247-MXPUB004		38
MXPUB015-MEX0127		88
MXPUB008-MEXPUB015		110
MEX0247-MXPUB013	REGIÓN I N-S NE-SW	42
MEX0245-MXPUB008		30
MXPUB013-MXPUB009		56
MXPUB009-MXPUB015		44
MXPUB003-MEX0247		40
MXPUB010-MXPUB003	REGIÓN I W-E	106
MXPUB012-MEX0245		21
MXPUB011-MEXPUB008		36
MXPUB013-MEXPUB004		14
MXPUB008-MEXPUB013		120
MXPUB008-MEXPUB009		124
MX0245-MEXPUB013		112
MEX0009-MEX0123	REGIÓN II	56
MEX0009-MEX0246		66
MEX0246-MEX0106	N-S	72
MEX0106-MEX0107		52
MEX0246-MEX0123	REGIÓN II W-E	27

Las siguientes gráficas (ver Fig. 45) muestran los datos de temperatura estabilizada que fueron estimados para los pozos petroleros de la zona de Chihuahua, como se propuso en el trabajo de Espinoza-Ojeda *et al.* (2017). En las cuales se puede observar su comportamiento del tipo conductivo para la TC descrita por las temperaturas. Los datos fueron considerados en el modelo 2D para validar las temperaturas calculadas

en la simulación. Desafortunadamente, no hay registros reportados de temperatura-profundidad de algunos de los pozos petroleros utilizados en este trabajo.

En las gráficas de la Fig. 45, se incluyen los datos simulados que reproducen las temperaturas estabilizadas consideradas en el modelado, describiendo un comportamiento conductivo del sistema.

La importancia de considerar los datos de temperaturas estabilizadas radica en obtener resultados que sean más aproximados en cuanto a la simulación de la TC conductiva en el sistema.

Con la información obtenida de trabajos publicados y de reportes técnicos inéditos de PEMEX (2013, 2015, comunicación personal), se describirán los modelos térmicos de esta zona del estado de Chihuahua.

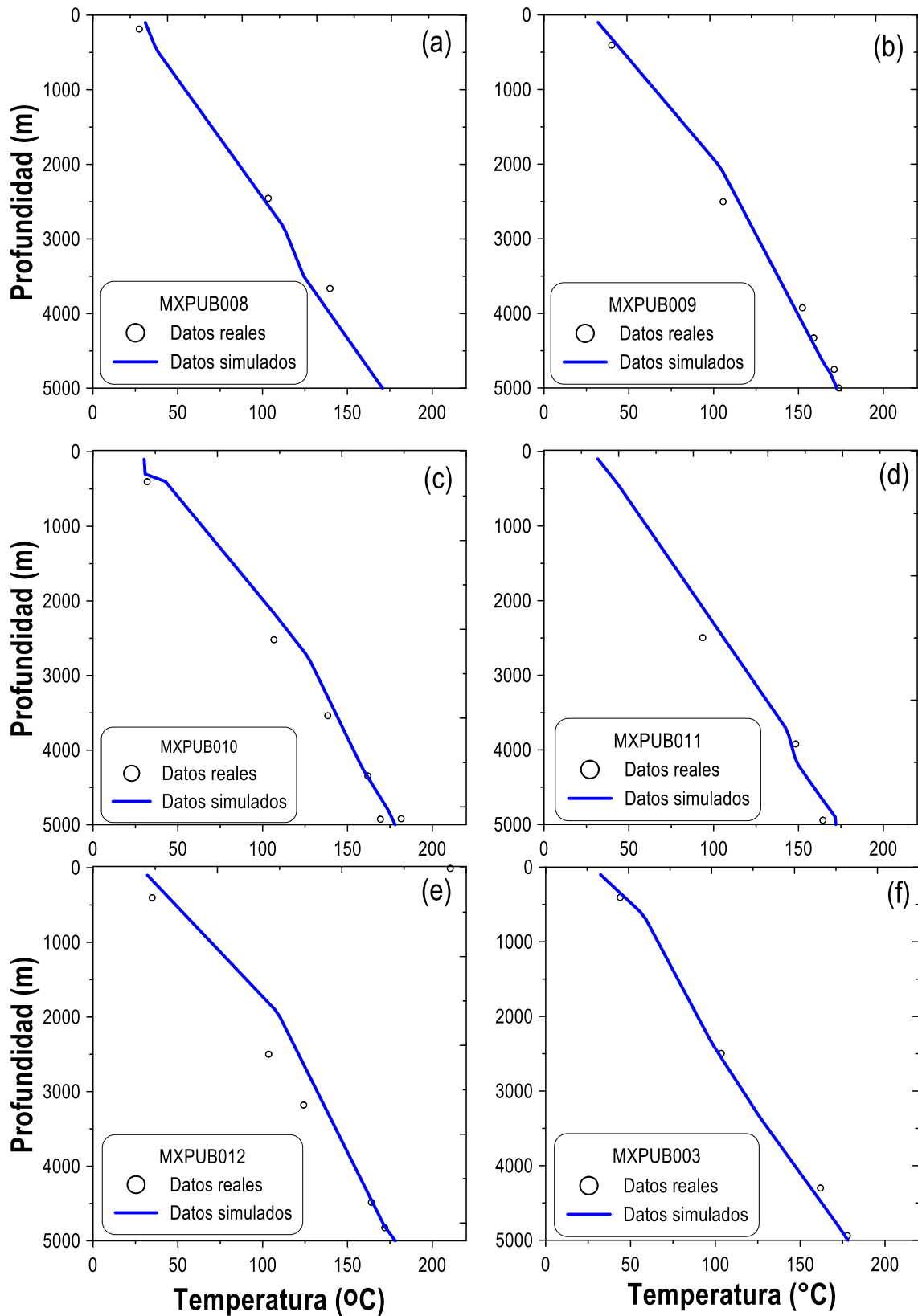


Fig. 45. Gráficas de los perfiles de temperatura de los pozos petroleros ubicados en las Cuencas Sedimentarias del norte de Chihuahua. Los círculos huecos indican los datos de temperatura reales de los pozos y con la línea de color azul se representan los resultados de las temperaturas obtenidos en la simulación.

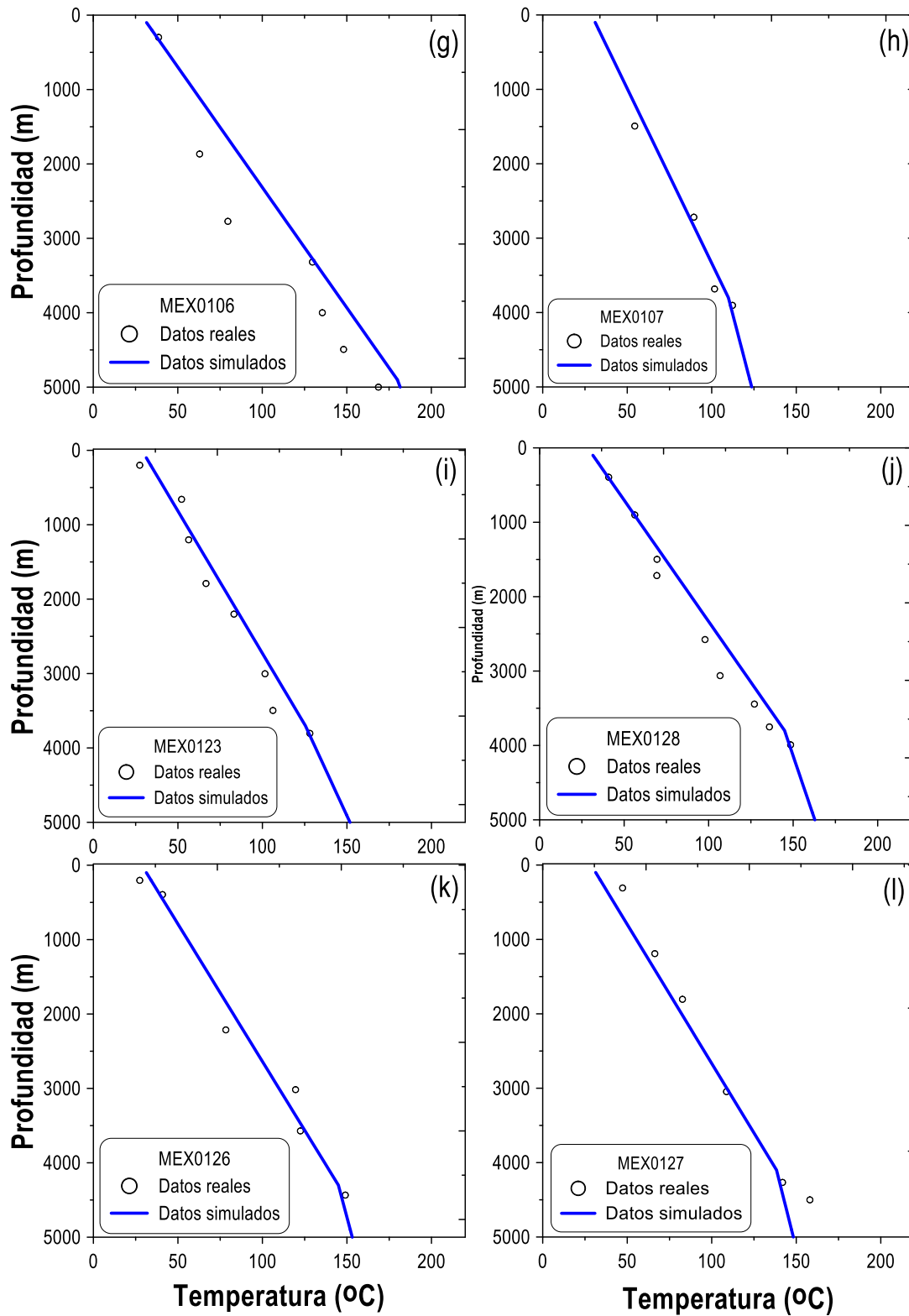


Fig. 45. (Continuación) Gráficas de los perfiles de temperatura de los pozos petroleros ubicados en las Cuencas Sedimentarias del norte de Chihuahua. Los círculos huecos indican los datos de temperatura reales de los pozos y con la línea de color azul se representan los resultados de las temperaturas obtenidos en la simulación.

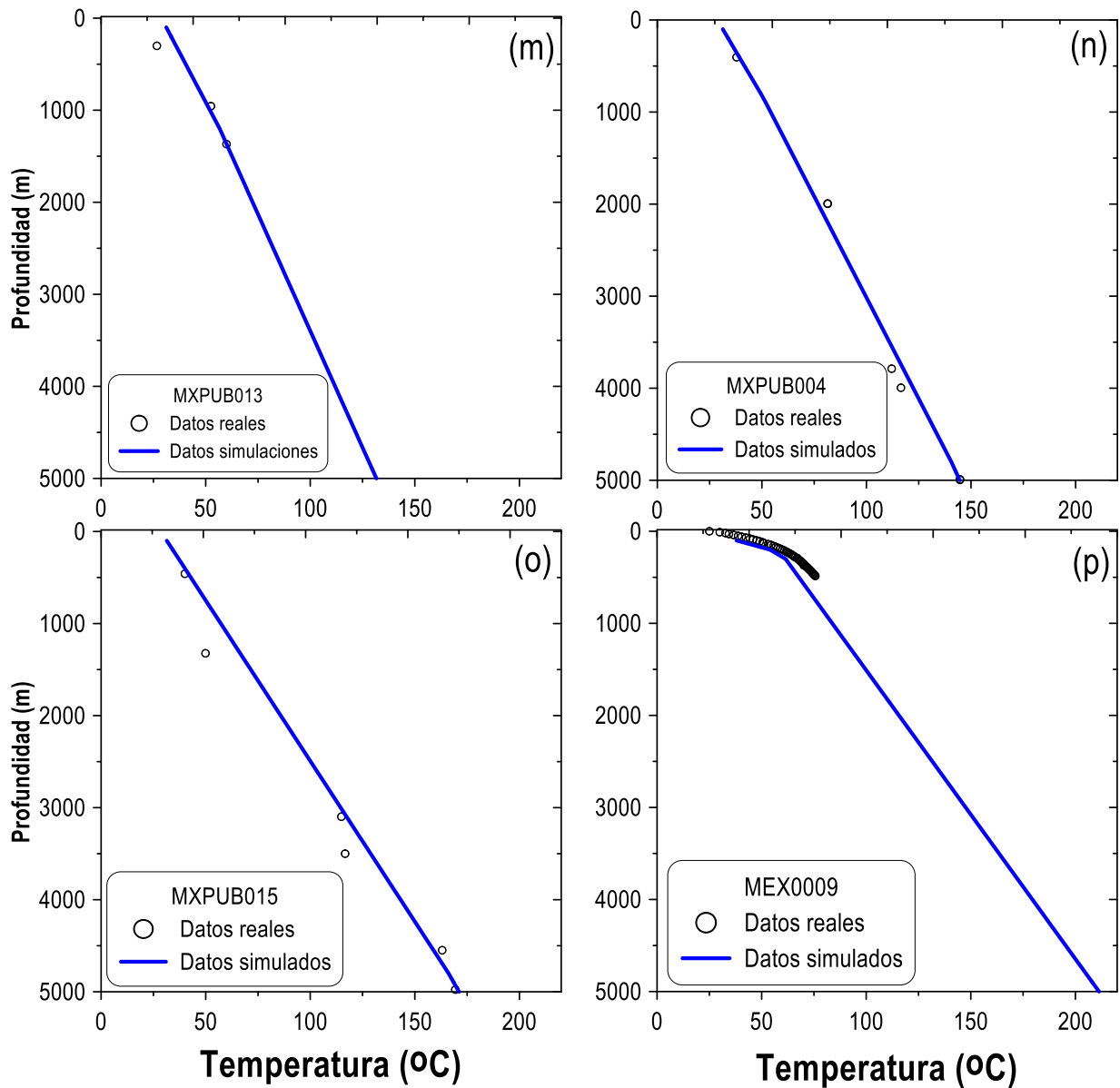


Fig. 45. (Continuación) Gráficas de los perfiles de temperatura de los pozos petroleros ubicados en las Cuencas Sedimentarias del norte de Chihuahua. Los círculos huecos indican los datos de temperatura reales de los pozos y con la línea de color azul se representan los resultados de las temperaturas obtenidos en la simulación.

Mapa de Flujo de Calor de las Cuencas Sedimentarias de Chihuahua

Los mapas de flujo de calor nos permiten evaluar los rangos de energía térmica que fluye en el subsuelo, así definir la presencia de recurso geotérmico explotable. Cuando se trata de evaluar una zona en específico, se vuelve indispensable conocer la distribución superficial del flujo de calor promedio de cada pozo involucrado en el modelado térmico. Por esas razones, fue indispensable crear un mapa que proporcionara la configuración del flujo de calor de los pozos petroleros abandonados en las Cuencas Sedimentarias de Chihuahua (ver Fig. 46).

En la construcción, se realizó una interpolación de los valores del flujo de calor promedio de los 28 pozos. Las distancias entre cada uno de los pozos sobrepasan los 10 kilómetros, al ser demasiado extensas se necesita más información para validarlas. Sin embargo, este primer mapa muestra una perspectiva generalizada del comportamiento térmico de la zona y ha servido como base para la creación de las secciones de perfil térmico a partir de la aplicación del Modelo 2D.

En el mapa de flujo de calor (Fig. 46) se identifica en la zona Norte (N) un incremento del valor térmico con valores que alcanzan los 168 mW/m^2 , lo mismo sucede hacia el lado Este (E) del mapa, pero a diferencia de la parte norte existe una menor concentración de pozos. Hacia la zona central los valores oscilan en un rango de $50\text{-}120 \text{ mW/m}^2$, y por último hacia el sur del mapa se registran valores bajos de flujo de calor de aproximadamente 20 mW/m^2 .

5.5 Mapa de Flujo de Calor de las Cuencas Sedimentarias al Norte de Chihuahua

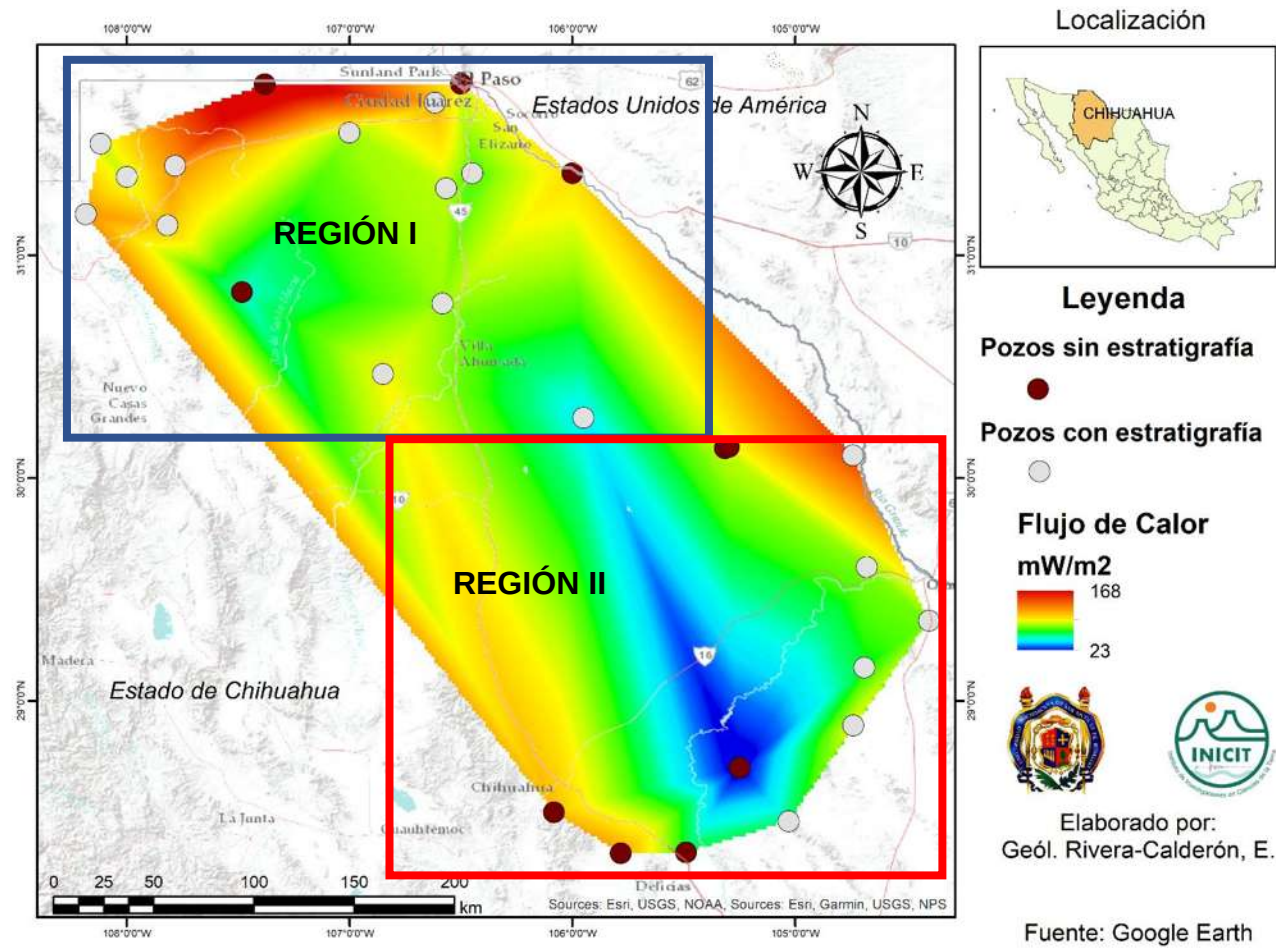


Fig. 46. Mapa de Flujo de Calor de la Cuenca Sedimentaria del Norte de Chihuahua. La Región I identificada por el recuadro de color azul, y la Región II en el recuadro rojo. Se muestra la distribución de los pozos de Chihuahua, Méx.

REGIÓN I

Es la zona con mayor concentración en la dispersión de los pozos petroleros abandonados, lo que justifica los 17 perfiles térmicos propuestos en este trabajo. De los cuales 9 son con orientación Norte-Sur (N-S) y 8 con dirección preferencial Oeste-Este (W-E). Se eligieron 6 secciones representativas de la zona las cuales son descritas a detalle y las demás pueden ser consultadas en los Apéndices A y B de este trabajo.

De acuerdo con la construcción del mapa de Flujo de Calor (ver Fig. 46), es la región con la mayor densidad de HF, por lo que se espera un comportamiento de las temperaturas más elevadas respecto con la Región II.

Región I: Secciones Norte [N] - Sur [S]

En esta dirección se eligieron 3 secciones térmicas que se describen a continuación, mientras las demás pueden ser consultadas al final en el Apéndice A.

Los pozos MEX0245 –MEXPUB008 (ver Fig. 47) tienen una separación aproximada de 30 km de longitud. Para la construcción de esta sección se tomaron en cuenta las características del pozo MEX0245 que tiene una profundidad de 4411.4 metros. La estratigrafía se encuentra constituida por rocas del paleozoico de origen sedimentario y rocas metamórficas del precámbrico de origen volcánico (Reiter y Tovar, 1982).

Mientras tanto el pozo MEXPUB008s tiene una profundidad de 3671 metros y su estratigrafía la constituyen rocas metamórficas de origen volcánico en la parte del basamento, seguidos de un paquete de calizas de distintas facies sedimentarias del mesozoico. Finalmente, hacia la cima rocas clásticas y sedimentos recientes del cenozoico de acuerdo con los datos de Reiter y Tovar R. (1981), que a su vez reportan la conductividad de estas rocas sedimentarias con un valor promedio de 3.14 W/mK y un Flujo de Calor de 98.5 mW/m². Para validar los datos de temperatura de la simulación, se utilizaron las temperaturas estabilizadas del pozo (ver Fig. 45).

En la Fig. 47, se muestra el perfil de temperatura obtenido a partir del modelo 2D en el que el pozo MEX0245, el cual mantiene temperaturas en un rango de 30-70 °C, mientras tanto en el pozo MEXPUB008 sus isotermas se elevan hasta alcanzar

temperaturas de hasta 170 °C a los 5 km. A su vez se muestra el perfil con las correlaciones cronoestratigráficas de las rocas que pertenecen a los pozos simulados.

El siguiente perfil (ver Fig. 48) es una sección construida entre los pozos MXPUB003-MXPUB013 con una dirección NW-SE. La distancia de separación es de 50 kilómetros de longitud. Podemos resaltar las características del pozo MXPUB003 el cual tiene de profundidad 4943 metros, su estratigrafía está conformada por rocas del precámbrico seguido de una intercalación de rocas sedimentarias del Mesozoico y finalmente a la cima, un paquete de rocas clásticas y sedimentos del Cenozoico. El promedio de la conductividad de estas rocas es de 3.21 W/mK y su Flujo de Calor es de 75 mW/m².

En la Frontera Este [E] se localiza el pozo MXPUB013 de profundidad 1372.5 metros. En el modelo 2D se indican las condiciones de este pozo mediante una subrutina, la cual integra el Flujo de Calor promedio del pozo que es de 77.9 mW/m² y se consideran los cambios de la estratigrafía.

El comportamiento de las isotermas registra un aumento de las temperaturas hacia el pozo MXPUB003, dónde la máxima temperatura calculada es de 178 °C a los 5 km de profundidad. Mientras el pozo MXPUB013 oscila en un rango de temperaturas de 60 a 135 °C como se ilustra en la Fig. 48.

La siguiente sección es una correlación entre los pozos MXPUB008-MXPUB015 (ver Fig. 49), con dirección NW-SE y una distancia de separación de 110 kilómetros. Se integran a la simulación los parámetros de cada uno de los pozos que a continuación se describen:

Las características del pozo MXPUB008 consideradas en el cálculo incluyen su profundidad de 3.671 kilómetros. La estratigrafía de este pozo está conformada por rocas del paleozoico, seguido de un paquete formaciones que pertenecen al Mesozoico, a la cima rocas clásticas y sedimentos del Cenozoico. El promedio de la conductividad de estas rocas que conforman el pozo es de 3.14 W/mK y su Flujo de Calor reportado es de 98.5 mW/m².

El pozo MXPUB015 tiene una profundidad de 5 kilómetros con un Flujo de Calor reportado de 85 mW/m² y la estratigrafía constituida por rocas del Mesozoico tienen una conductividad promedio de 2.93 W/mK.

El comportamiento de las isotermas registra un aumento de las temperaturas hacia el pozo MXPUB015 dónde la máxima temperatura calculada es de 171 °C a los 5 km de profundidad, mientras el pozo MXPUB008 oscila en un rango de temperaturas de 130 a 150 °C como se ilustra en la Fig. 49.

Las secciones térmicas construidas en esta Región I pueden ser consultadas en los Apéndices A y B al final de este trabajo. En ellos es posible observar temperaturas que oscilan desde los 60 °C grados hasta temperaturas de 170 °C y 182 °C. Las propiedades de térmicas de las rocas son similares al tratarse de una serie de cuencas sedimentarias, lo que puede representar una ventaja en el momento de realizar las correlaciones estratigráficas y los valores de las conductividades. Sin embargo, las distancias de separación representan una desventaja en el momento de correlacionar los pozos petroleros inoperantes. De acuerdo con estos resultados de la simulación térmica en esta región, podemos decir que se trata de un yacimiento geotérmico de baja a mediana entalpía.

REGIÓN I CHIHUAHUA: SECCIÓN NE-SW

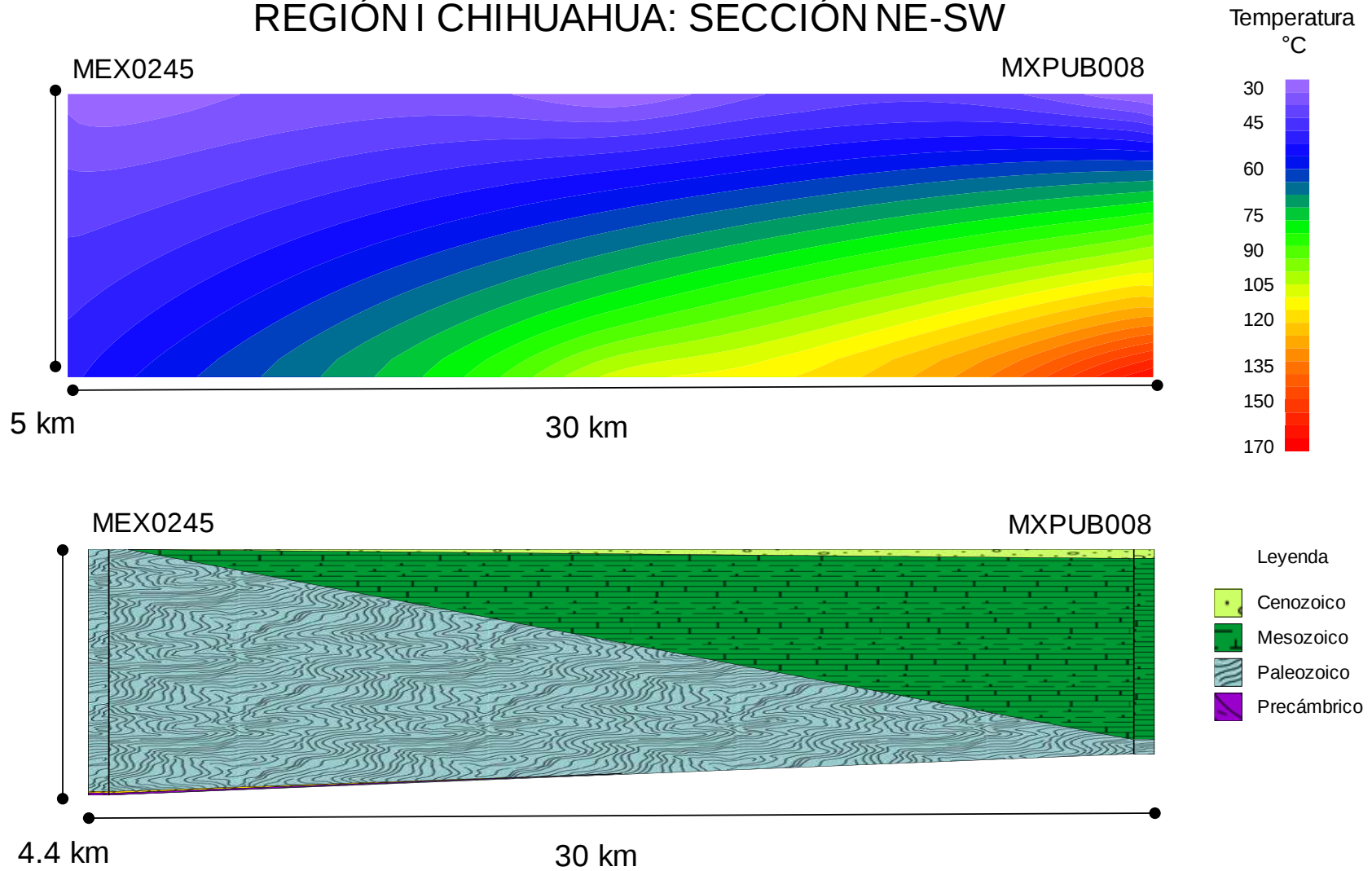


Fig. 47. Perfil de temperatura de los pozos MEX0245-MXPUB008 con orientación N-S, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

REGIÓN I CHIHUAHUA: SECCIÓN NW-SE

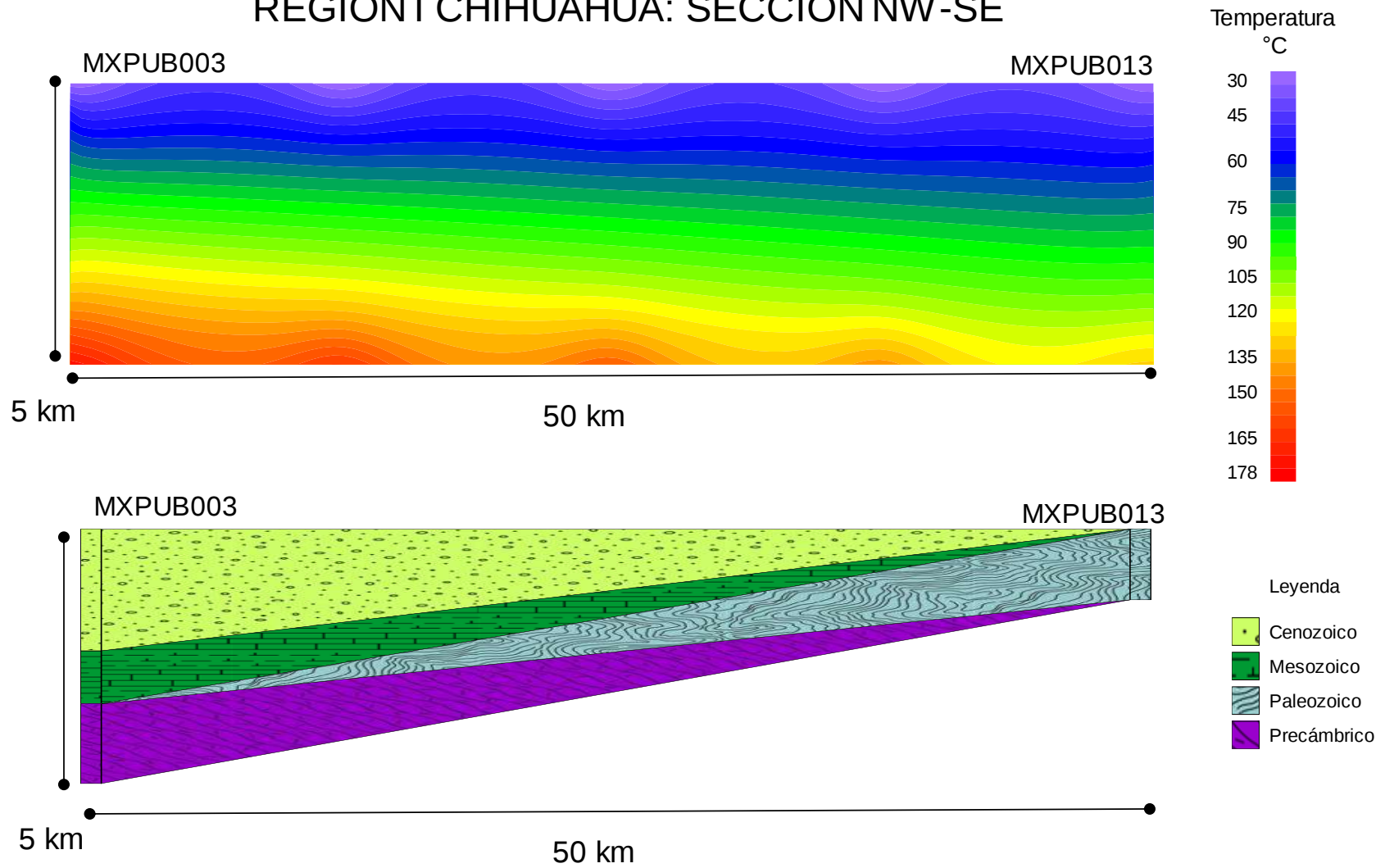


Fig. 48. Perfil de temperatura de los pozos MXPUB003-MXPUB013 con orientación N-S, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

REGIÓN I CHIHUAHUA: SECCIÓN NW-SE

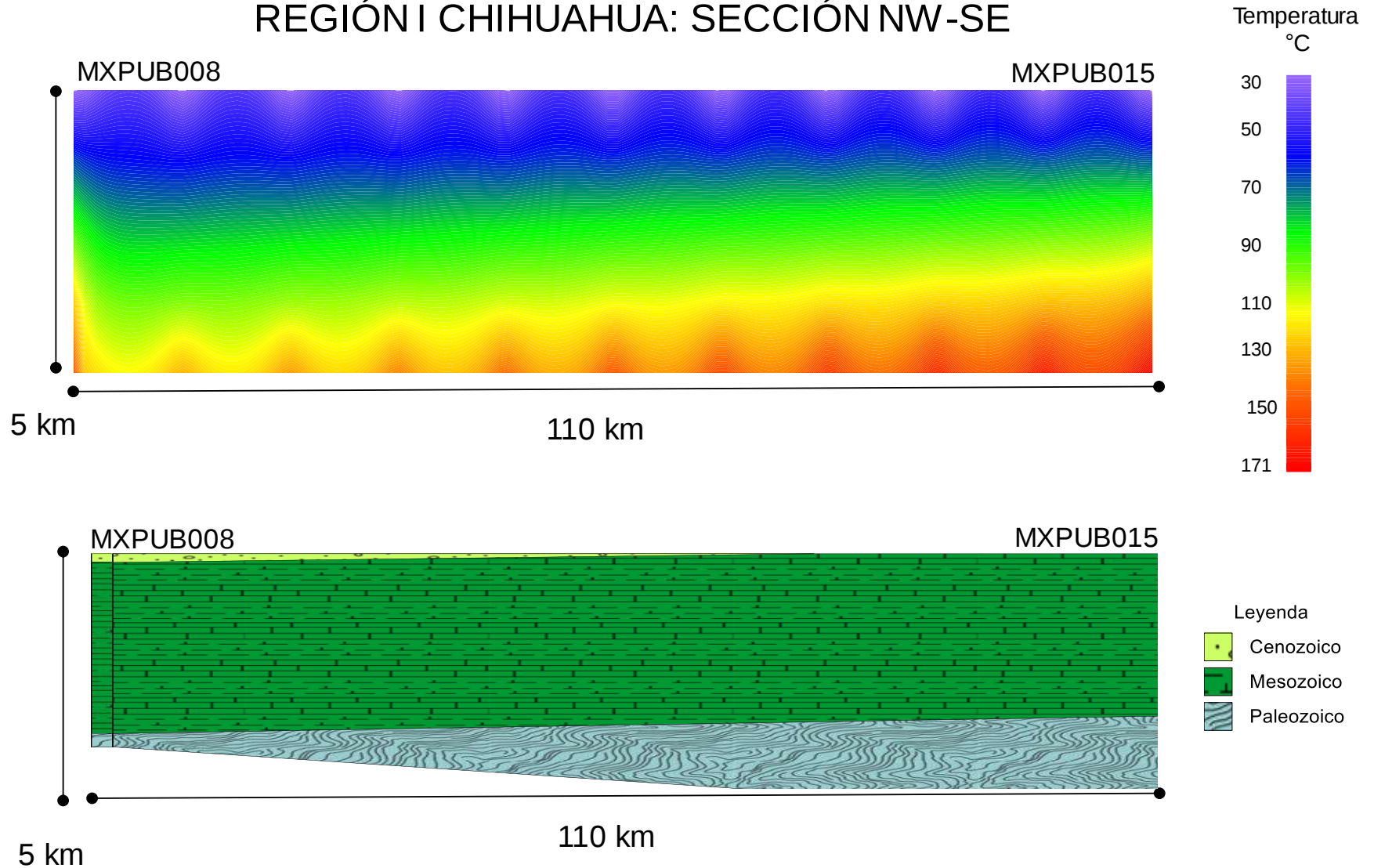


Fig. 49. Perfil de temperatura de los pozos MXPUB008-MXPUB015, con orientación N-S, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

Región I: Sección Oeste [W] - Este [E]

En esta dirección se construyeron 8 secciones de perfiles térmicos con sus respectivas correlaciones estratigráficas. De las cuales se hizo un análisis y se presentan 3 secciones de los resultados obtenidos de la simulación térmica del Modelo 2D, las demás pueden ser consultadas en el Apéndice B.

Las siguientes secciones de temperatura MXPUB003-MEX0247 y MXPUB008-MXPUB013 (ver Figs. 50, 51). Tienden a incrementar su temperatura hacia el pozo situado al Oeste [W] del Modelo 2D. Las temperaturas calculadas en los perfiles fueron de 171 a 178 °C.

En la sección MXPUB008-MXPUB013 (ver Fig. 51) se pueden observar como las capas superiores exhiben una tendencia a tener temperaturas bajas (<70 ° C), mientras las temperaturas calculadas incrementan con la profundidad de manera lineal esta tendencia sugiere que la transferencia de calor está en función de la conductividad de los materiales.

Es importante señalar la presencia de rocas cristalinas de origen ígneo en el basamento (ver Fig. 50) con evidencia de metamorfismo pertenecientes al Precámbrico, según reportes de los pozos petroleros. Lo que proporciona condiciones de conductividad adecuadas para la transferencia de calor. Otro factor importante que aumenta la temperatura en las cuencas sedimentarias es la subsidencia de los materiales, al compactarse incrementan los valores del gradiente geotérmico de la zona y por lo tanto el flujo de calor. Por la distancia de separación, la subsidencia puede ser una de las razones más fuertes que probablemente provoca las anomalías térmicas que se registran.

Las temperaturas calculadas en la siguiente sección modelada entre los pozos MEX0245-MXPUB013 (ver Fig. 52), presenta una tendencia a aumentar hacia el lado Este del perfil térmico con temperaturas máximas de 132 °C. Las rocas del basamento que constituyen su estratigrafía se encuentran metamorfizadas (Barboza-Gudiño *et al.*, 2016), lo cual incrementa su compactación y sus valores de conductividad térmica, eso favorece el aumento de sus temperaturas.

Aunque la distancia representa una desventaja al momento de validar los datos de los perfiles de temperatura, en trabajos de modelación térmica de Cuencas Sedimentarias se asume que las condiciones de los materiales no presentan cambios significativos que afecten los resultados de la simulación y se contemplan conductividades constantes con distancias de más de 200 kilómetros (p. ej., Vosteen *et al.*, 2004; Meixner *et al.*, 2009). Por lo que se asume que, en este trabajo de prospección térmica los resultados que se obtienen de estos perfiles son una aproximación confiable, que nos permite evaluar y estimar de manera preliminar el potencial de los pozos petroleros abandonados de las Cuencas Sedimentarias de Chihuahua.

Los perfiles estratigráficos se construyeron a partir de la agrupación de las formaciones geológicas estableciendo una cronoestratigrafía que asocia los grupos de estratos por eras geológicas, para poder generalizar los cambios sucesivos horizontales y verticales que se registran en los reportes de los pozos petroleros, con el objetivo de hacer más visual la comparación de los materiales.

REGIÓN I CHIHUAHUA: SECCIÓN W-E

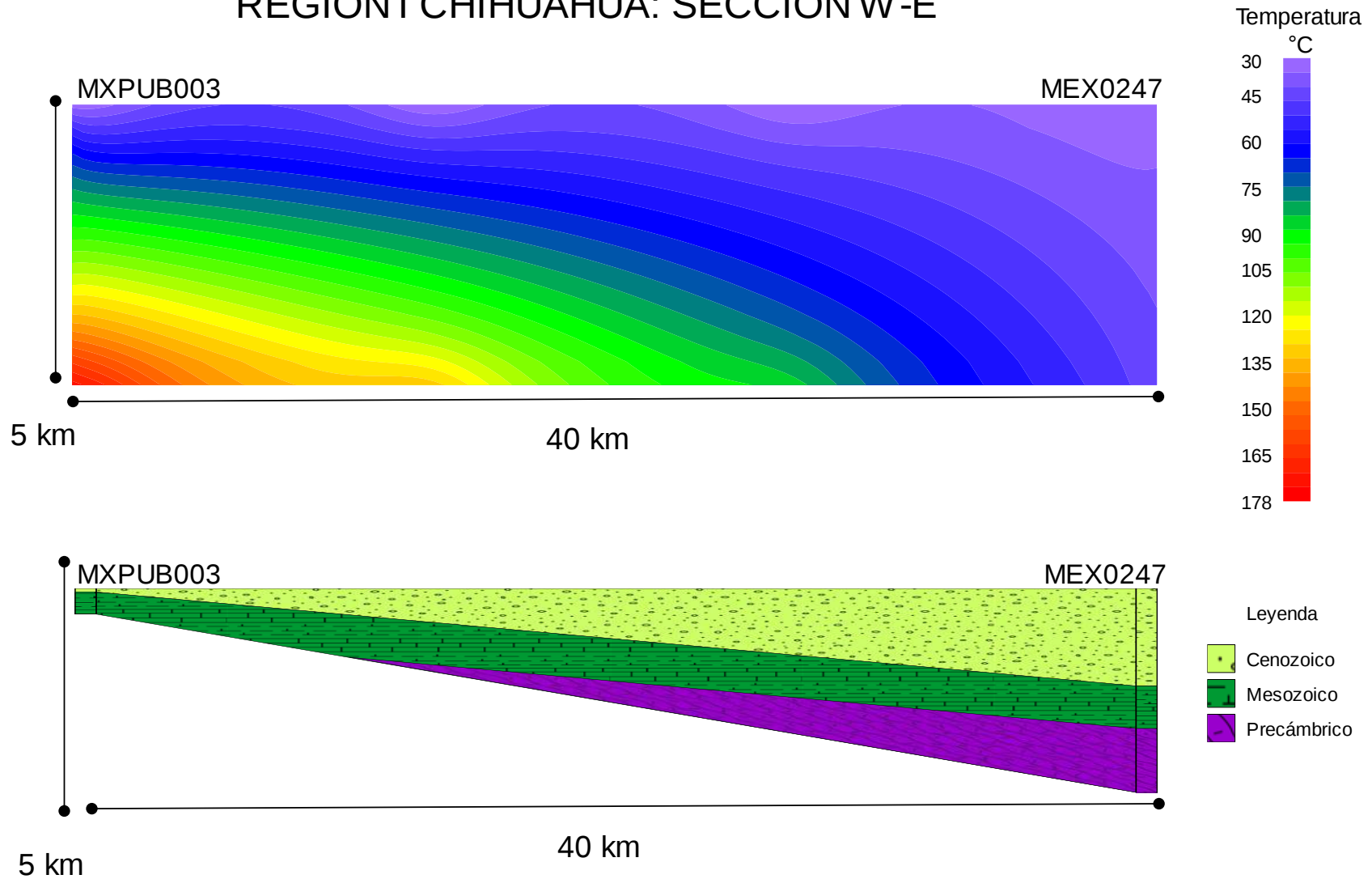


Fig. 50. Perfil de temperatura de los pozos MXPUB003-MEX0247 de la Región I con orientación W-E, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

REGIÓN I CHIHUAHUA: SECCIÓN W-E

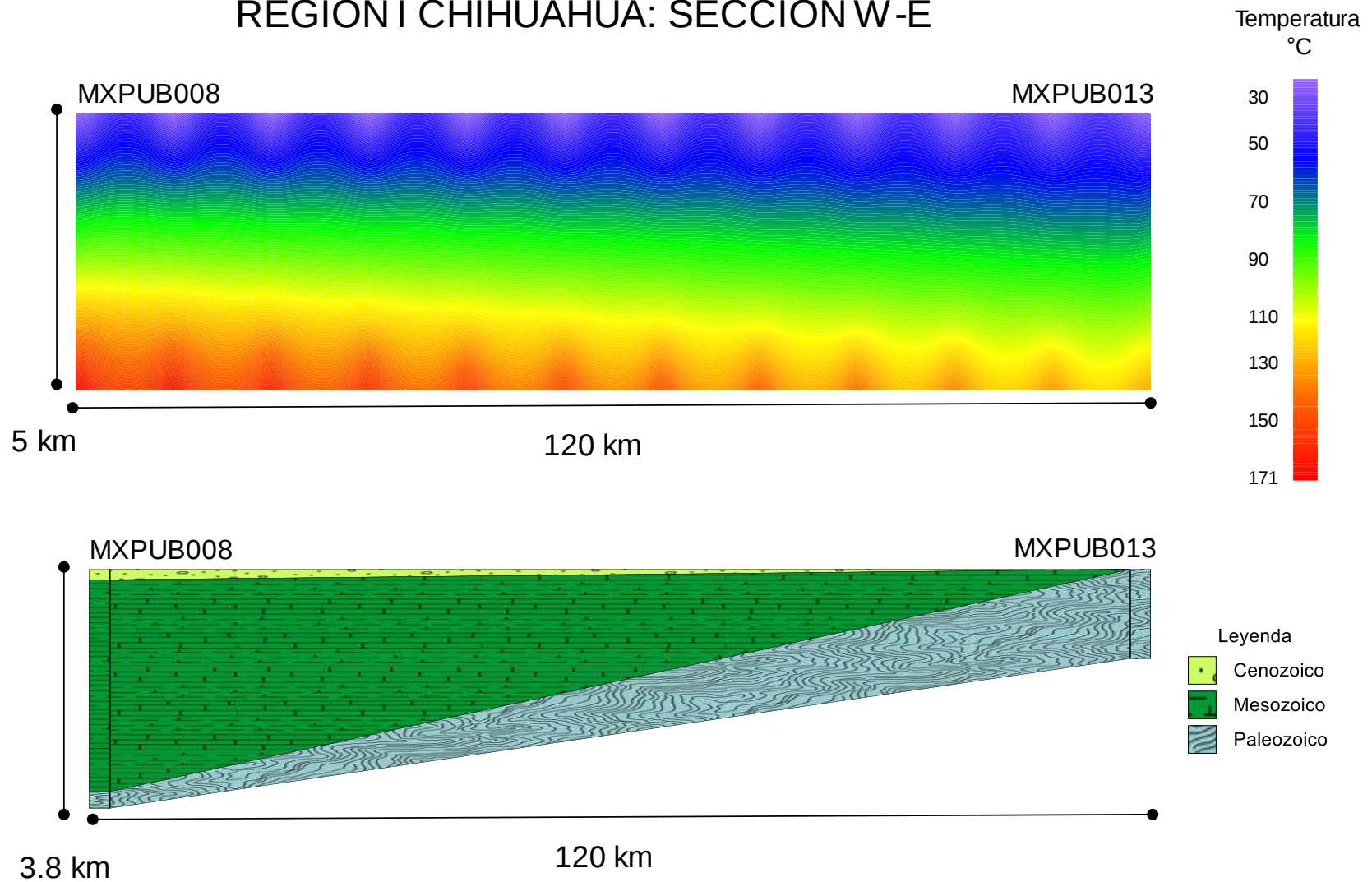


Fig. 51. Perfil de temperatura de los pozos MXPUB008-MXPUB013 de la Región I con orientación W-E, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

REGIÓN I CHIHUAHUA: SECCIÓN W-E

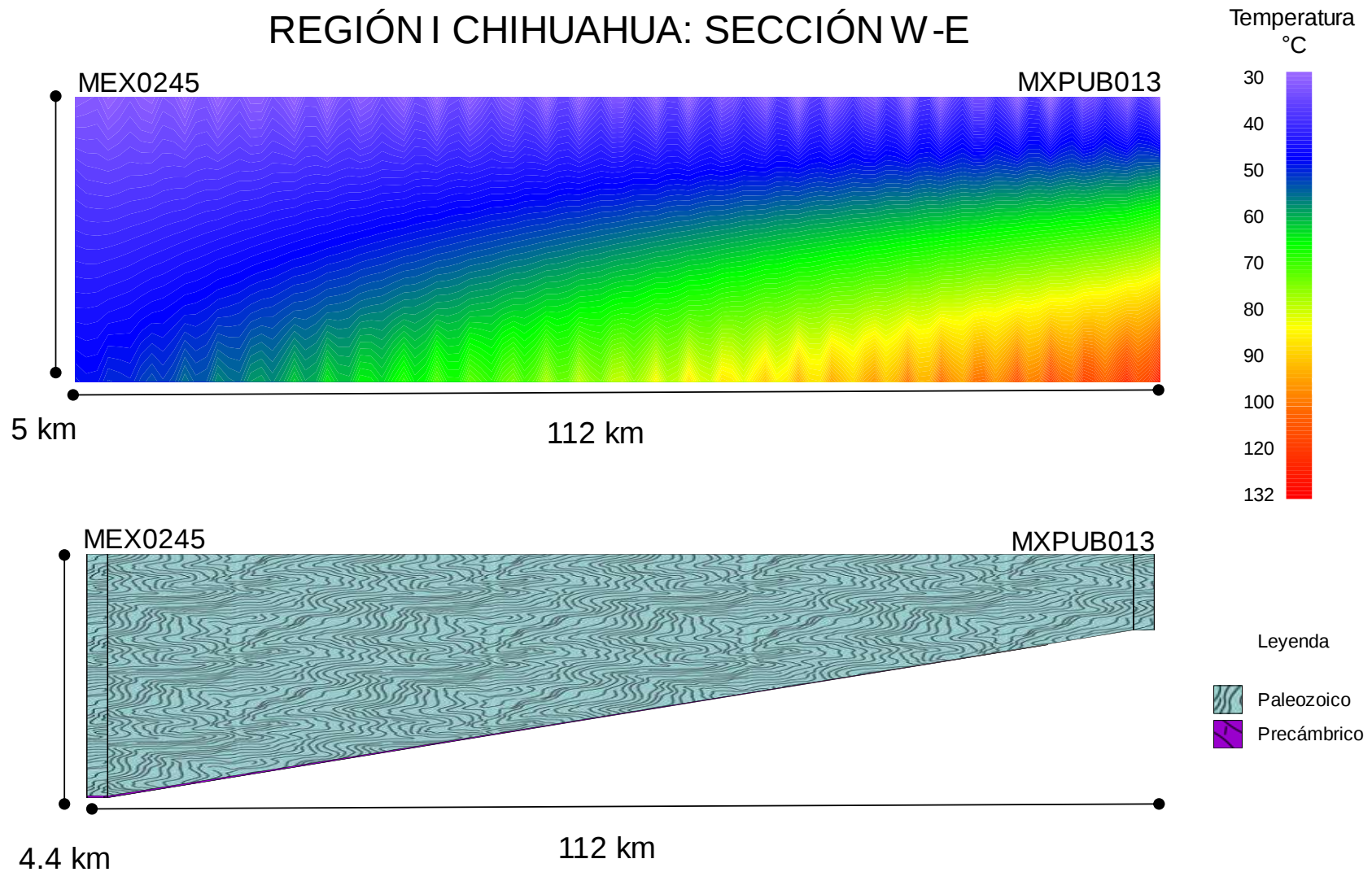


Fig. 52. Perfil de temperatura de los pozos MEX0245-MXPUB013 de la Región I con orientación W-E, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

REGIÓN II

En esta región se presenta una menor dispersión de pozos petroleros abandonados y desafortunadamente de algunos de ellos no se tiene información, por esa razón se realizaron sólo cuatro secciones térmicas con dirección Norte-Sur y se describirán dos de ellas a continuación, mientras las otras pueden ser consultadas al final en el Apéndice C.

Región II: Secciones Norte [N] - Sur [S]

El perfil MEX0009-MEX0123 (ver Fig. 53) se encuentra al sur del mapa de Flujo de Calor (Fig. 46), en esta región existe fallamiento normal que ha formado la Cuenca Sedimentaria con presencia de rocas Sedimentarias Carbonatadas y Clásticas del Mesozoico y rellenos de sedimentos del Holoceno que pertenecen al Cenozoico (Barboza-Gudiño *et al.*, 2016). La distancia entre los pozos MEX0009-MEX0123 (ver Fig. 53) es de 56 kilómetros y presenta un aumento de temperatura hacia el pozo MEX0009, en el que alcanzan los 211 °C a los 5 kilómetros de profundidad, mientras el pozo MEX0123 tiene temperaturas entre un rango de 130 a 150 °C.

Como se podrá observar en la siguiente sección MEX0106-MEX0107 (ver Fig. 54) las temperaturas más altas tienen una tendencia al lado Norte [N] de los pozos, con temperaturas desde los 181 a 211°C.

La sección estratigráfica está constituida por rocas sedimentarias del Mesozoico y Cenozoico, principalmente rocas carbonatadas con intercalaciones de rocas clásticas. El régimen estructural dominante es de tipo extensivo, causante de la formación de la Cuenca y se caracteriza por la presencia de fallamiento normal que geomorfológicamente da lugar a los valles y sierras (Pilares y fosas tectónicas). Sin embargo, existe evidencia de plegamiento y metamorfismo en algunas formaciones de la Cuenca sedimentaria (Barboza-Gudiño *et al.*, 2016).

REGIÓN II CHIHUAHUA: SECCIÓN N-S

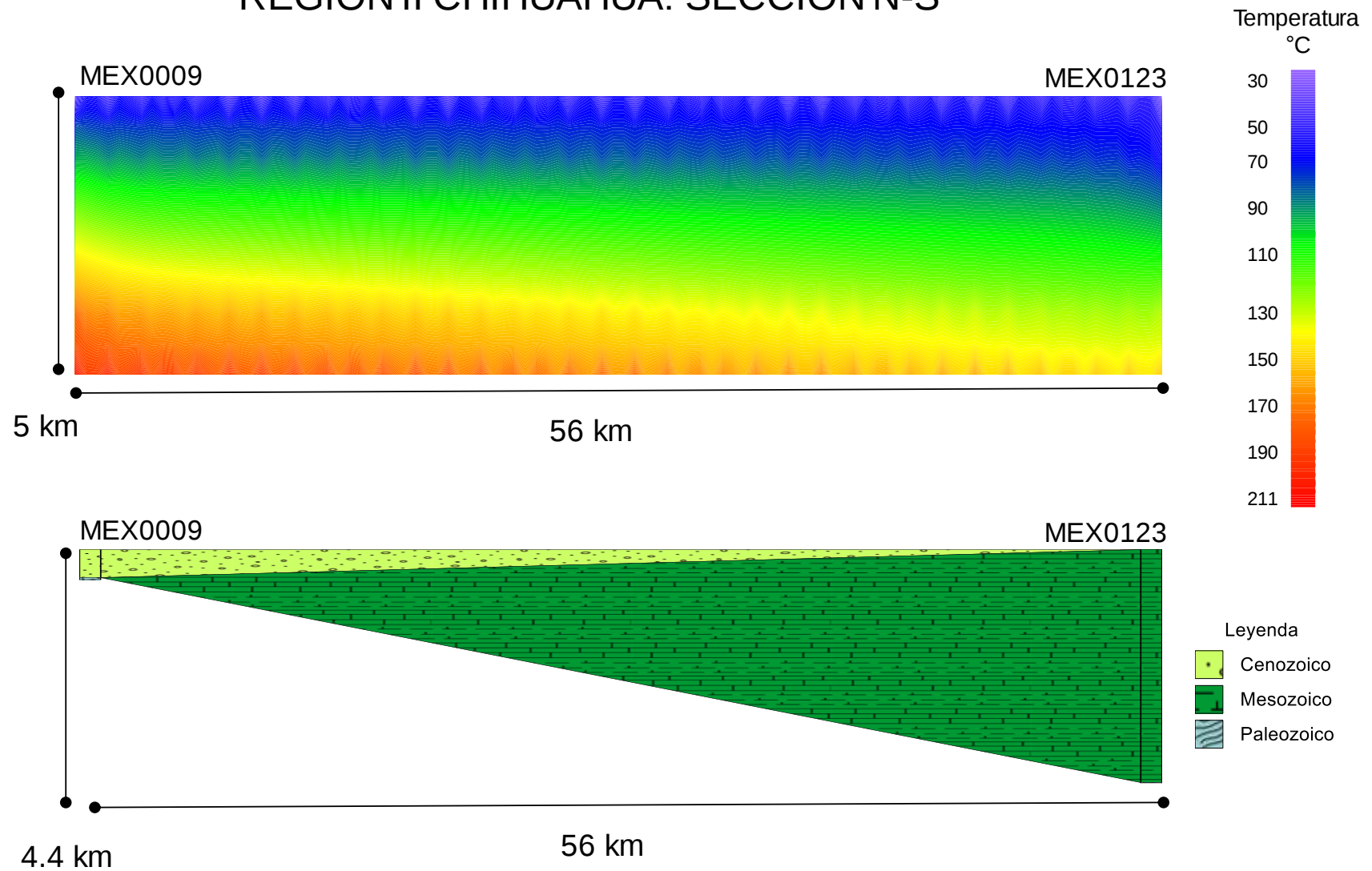


Fig. 53. Perfil de temperatura de los pozos MEX0009-MEX0123 de la Región II con orientación N-S, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

REGIÓN II CHIHUAHUA: SECCIÓN N-S

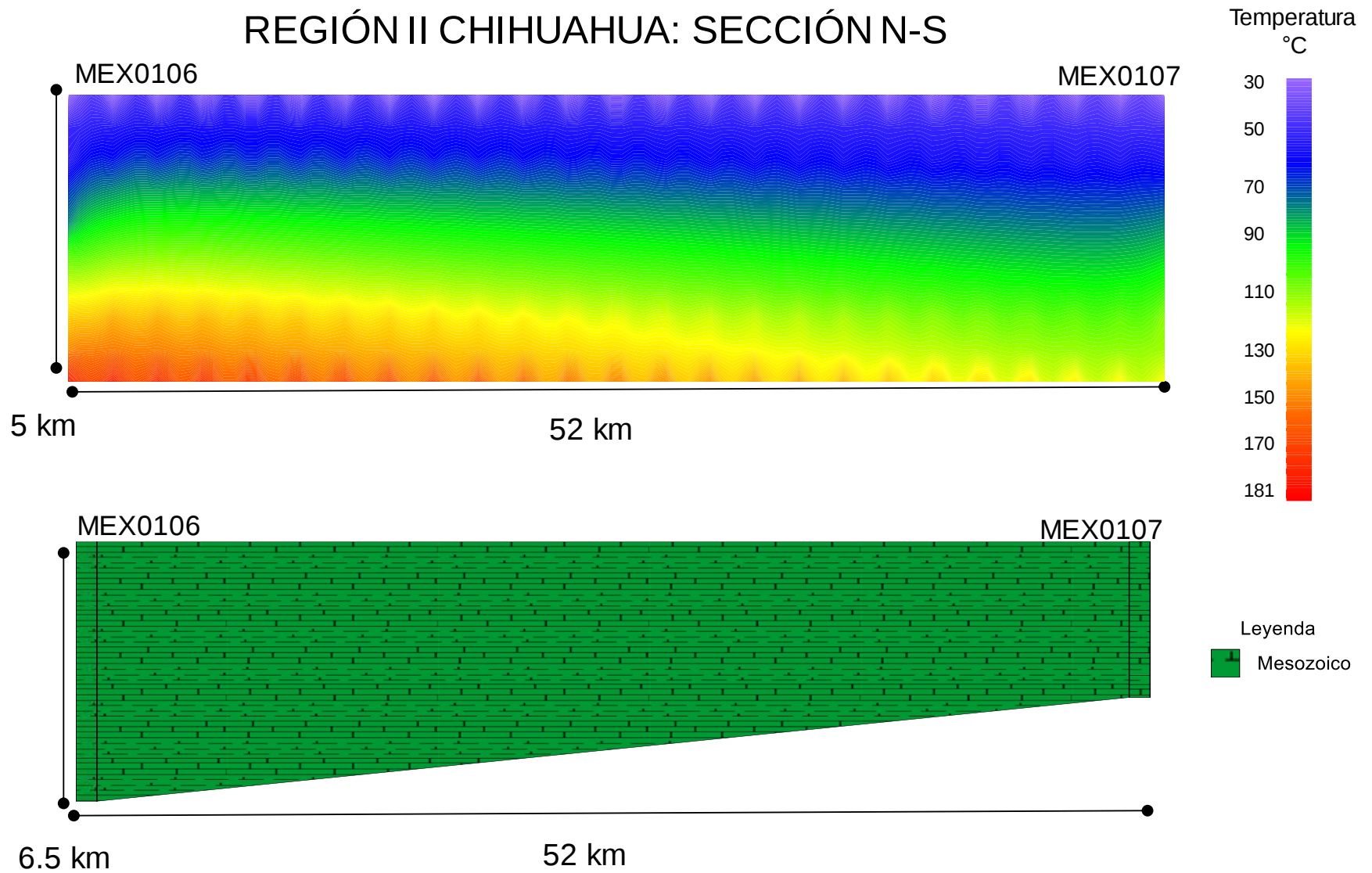


Fig. 54. Perfil de temperatura de los pozos MEX0106-MEX0107 de la Región II con orientación N-S, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

Región II: Secciones Oeste [W] – Este [E]

Se realizaron tres secciones con esta orientación de las cuales se describe una de ellas y las demás pueden ser consultadas en el Apéndice D. En esta área la distancia de separación entre los otros pozos sobrepasaba los 250 kilómetros y algunos de los pozos situados no contaban con la información suficiente para realizar las secciones térmicas.

La sección de los pozos MEX0246-MEX0123 (ver Fig. 55), tiene una distancia de separación de 27 kilómetros y las rocas que integran ambos pozos petroleros pertenecen a rocas sedimentarias carbonatadas con intercalaciones de terrígenos que pertenecen al mesozoico.

Los resultados de la simulación térmica indican temperaturas de 152 °C a una profundidad máxima de 5 kilómetros hacia el pozo MEX0123 en el lado Este [E] del perfil, mientras el lado Oeste [W] donde se localiza el pozo MEX0246 se mantiene en temperaturas de 90 a 110 °C.

En esta orientación las temperaturas máximas de los perfiles de temperatura oscilan en un rango de 152 °C a 182 °C (ver Apéndice D).

REGIÓN II CHIHUAHUA: SECCIÓN W-E

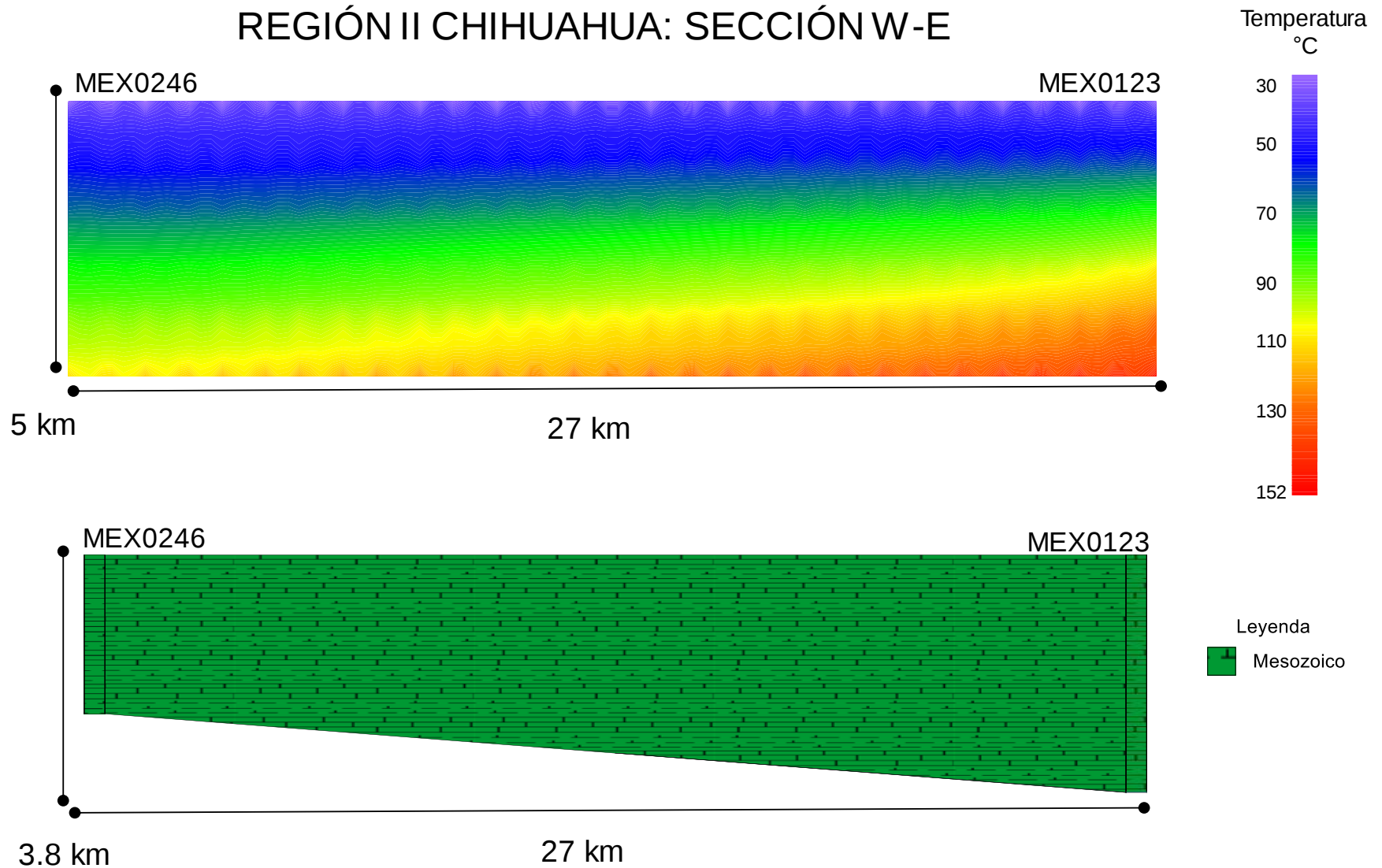


Fig. 55. Perfil de temperatura de los pozos MEX0246-MEX0123 de la Región II con orientación W-E, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

Los perfiles de temperatura han sido agrupados de acuerdo con la región que pertenecen y a su orientación en una vista tridimensional (ver Figs. 56-59).

Se puede observar el comportamiento de las temperaturas en un rango de 190 °C a 211 °C en la Región I y a su vez las distancias correlacionadas de los pozos son menores con respecto a la Región II, lo que permite una mejor aproximación de los cálculos computacionales.

Mientras tanto la Región II presenta perfiles térmicos con distancias más grandes y temperaturas que oscilan entre 150 °C a los 203 °C.

Al analizar los datos de la Cuenca Sedimentaria de Chihuahua, se ha podido establecer un primer acercamiento del comportamiento de las temperaturas de esta región. Sin embargo, la desventaja principal ha sido la gran distancia entre los pozos (>10 km) y los pequeños cambios sucesivos de las capas que son difíciles de representar de manera detallada a grandes escalas.

Los resultados obtenidos utilizando esta simulación numérica en dos dimensiones, permiten mostrar un primer escenario del comportamiento del campo de temperaturas de estos pozos petroleros abandonados y se puede clasificar a la Cuenca sedimentarias como un tipo de yacimiento geotérmico de baja a media entalpía.

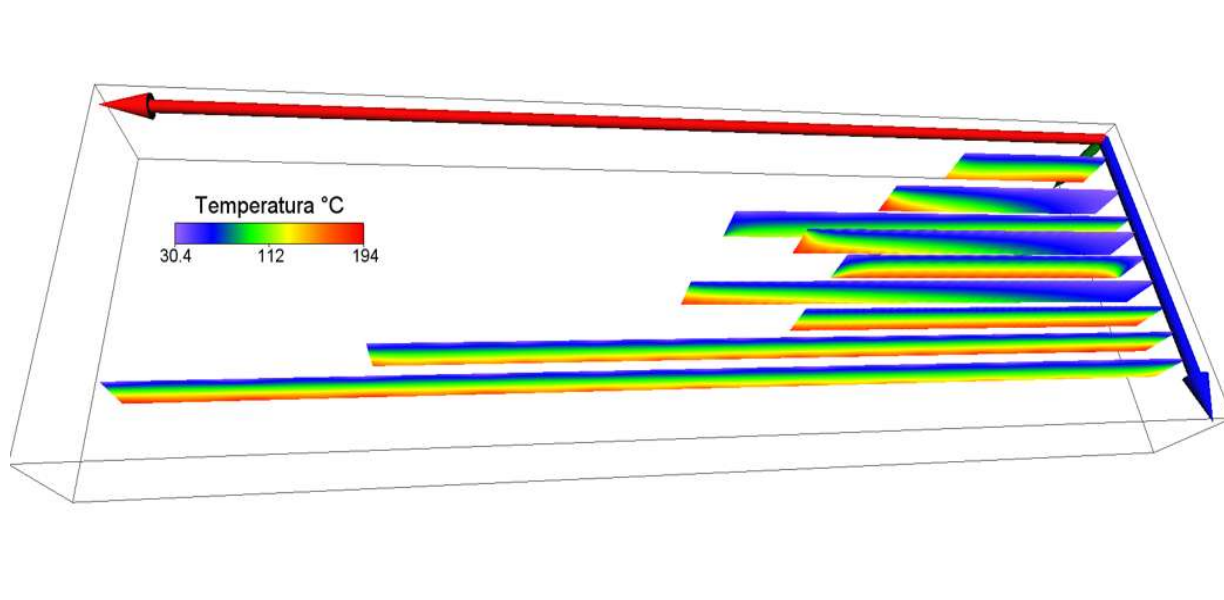


Fig. 56. Perfiles de temperatura de la Región I con orientación Norte-Sur, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

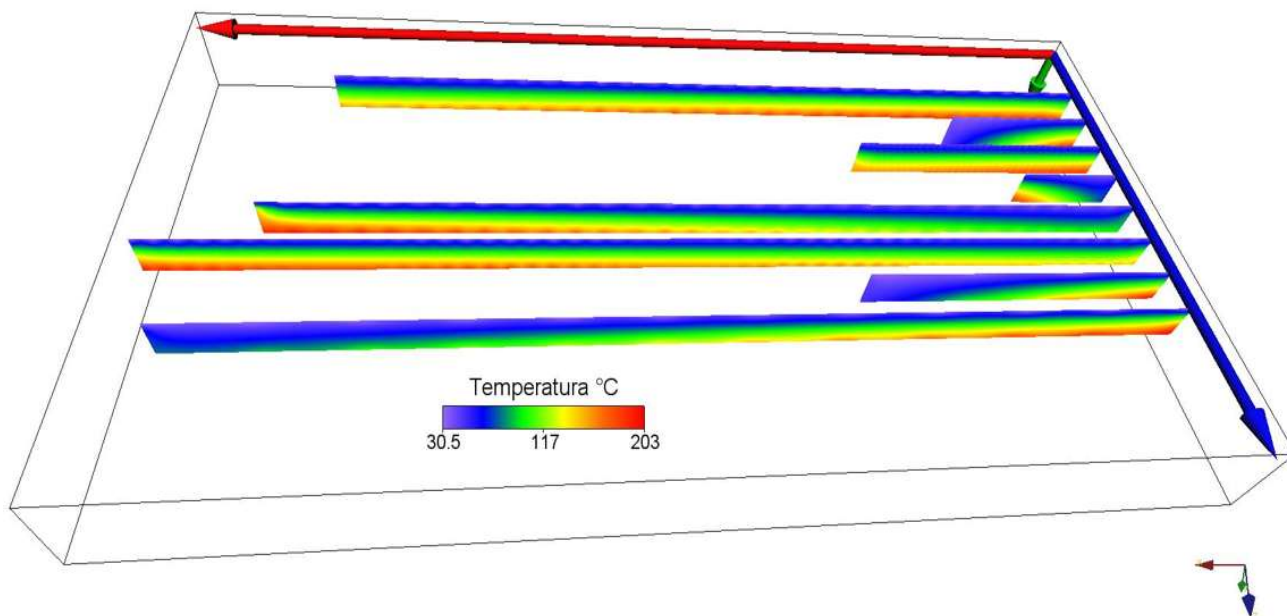


Fig. 57. Perfiles de temperatura de la Región I con orientación W-E, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

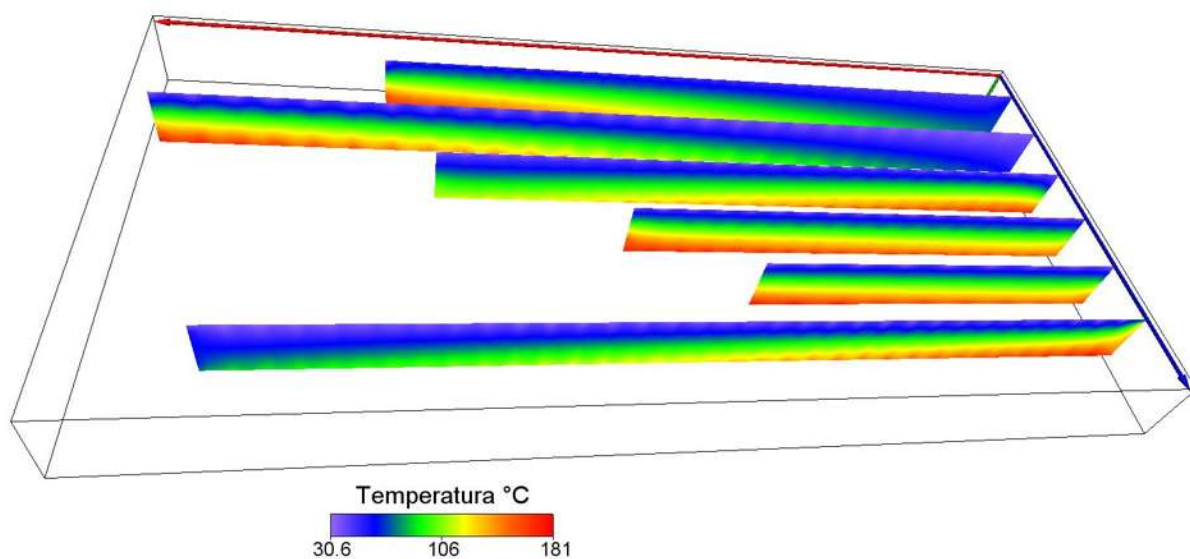


Fig. 58. Perfil de temperatura de la Región II con orientación N-S, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

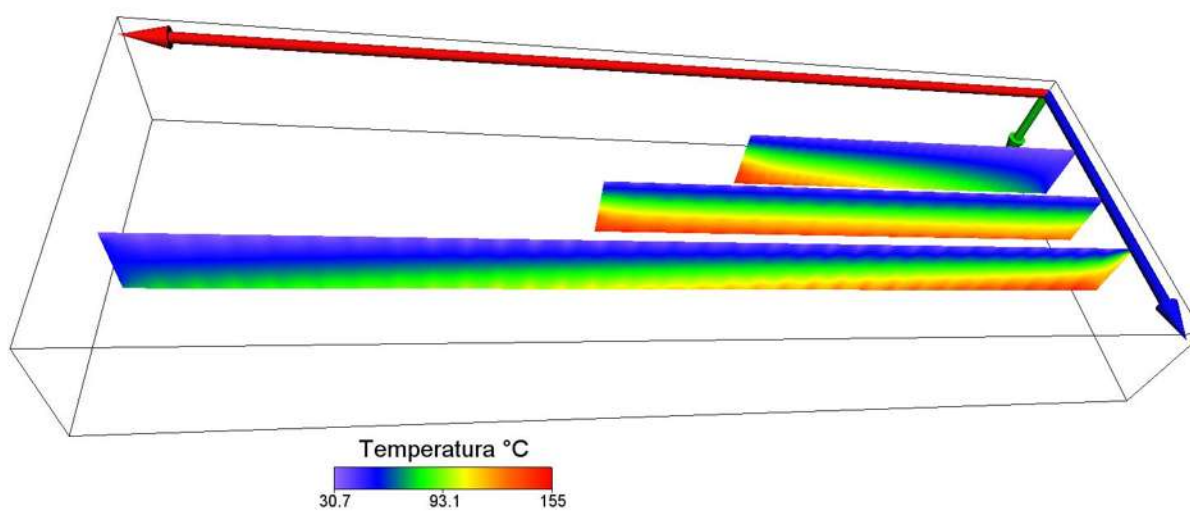


Fig. 59. Perfil de temperatura de la Región II con orientación W-E, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

Capítulo VI

Conclusiones

6.1 Acoculco, Puebla.

- Con los datos procesados de los dos pozos exploratorios se obtuvieron resultados de temperaturas que oscilan en un rango de 360 a 396°C, a una profundidad de 3 km. Con esto se puede hacer una clasificación de la zona como un yacimiento de alta entalpía.
- Las actividades geofísicas de exploración se deben centrar en la identificación de las anomalías del terreno y ser consideradas para la planificación de perforación de los pozos. Con la información que se proporcione por estos medios, se puede integrar en un modelo de simulación numérica que describa de manera detallada las características del sistema. Sin embargo, los resultados de este trabajo son una perspectiva previa del comportamiento del estado natural conductivo del reservorio.
- Al considerar una conductividad térmica anisotrópica del medio y una geometría en dos dimensiones, se apoya la teoría de que la conductividad se encuentra directamente relacionada o determina la eficiencia con la cual el calor se propaga a través del medio. En este caso se refleja el cambio de las propiedades de la roca conforme cambian los estratos en la profundidad. Condicionar que el modelo integre dichas propiedades, hace que los cálculos de las temperaturas sean más aproximados al comportamiento real del sistema.

- Los estudios de caracterización colocan a la zona de Acoculco, Puebla, como una Caldera Volcánica en la que existe un yacimiento tipo Roca Seca Caliente. Por las temperaturas registradas en los pozos de exploración lo clasificaron como un yacimiento de alta entalpía, con altas probabilidades de explotación como un Sistema EGS. Los resultados obtenidos en este trabajo apoyaran los criterios de evaluación para dar mejor certeza del proyecto.

6.2 Caldera La Primavera, Jalisco.

- La temperatura máxima calculada a los 3 km de profundidad oscila para los perfiles de N-S de los 450 a 506°C y los tomados con orientación W-E tienen un rango de los 400 °C y 480°C. Por las temperaturas evaluadas en este modelo podemos considerar el yacimiento como de alta entalpía.
- De acuerdo con las secciones térmicas, las altas temperaturas calculadas se concentran en la región central de localización de los pozos y coinciden con los datos del mapa de flujo de calor superficial.
- Los resultados obtenidos de la modelación térmica se ajustan con los calculados en los trabajos realizados por Verma *et al.*, (1997) (2012).
- Para el caso de La Caldera de LP, Jalisco, las secciones geológicas integran los datos estructurales del área de estudio, por lo que fue necesario consultar el mapa geológico de la zona, para establecer una relación de las estructuras de falla que afectan la superficie y mediante la interpretación de los registros de pozos, verificar la existencia de fallas a profundidad de acuerdo con los estratos desplazados.
- Como ya se había mencionado en este trabajo, no se considera la corrección topográfica del sistema, lo que puede causar un problema con la distribución de las temperaturas a profundidad (Liang-Ping *et al.*, 1985). Las isothermas calculadas podrían presentar un ligero desplazamiento con respecto a la superficie real de la Tierra (Verma y Gómez-Arias, 2016). Sin embargo, los resultados de las temperaturas calculadas en este modelo fueron comparadas con las obtenidas en la modelación numérica realizada en los de Verma y Rodríguez-González (1997), Verma *et al.* (2012), Verma y Gómez-Arias (2016), y la distribución a profundidad coincide con los calculadas en dichos trabajos.
- La Región de la Caldera LP se encuentra dentro de una Reserva Natural protegida, una de las razones que ha impedido la explotación del recurso geotérmico. Los trabajos actuales deberán incluir un plan ambiental para aprovechar el recurso geotérmico.

6.3 Cuenca Sedimentaria de Chihuahua.

- Las temperaturas calculadas se encuentran en el rango promedio de ~ 60 °C y ~ 211 °C a los 5 km de profundidad, de acuerdo con esto podemos clasificar el yacimiento de baja a mediana entalpía.
- El área con posible mayor contenido térmico se concentra en la Región I, hacia el norte del área de estudio donde los valores de flujo de calor son de 168 mw/m^2 . Así como las secciones térmicas con temperaturas más altas (120 a 211 °C) corresponden a estos pozos.
- La conducción termal se asume que puede ser el principal mecanismo de transporte de calor que domine de manera general en la cuenca sedimentaria. Sin embargo, por la escala considerada en este trabajo, la presencia de convección o anomalías en la zona podrían ser posibles y que pueden modificar los resultados obtenidos. Por lo que los resultados de este trabajo son una aproximación al comportamiento real del sistema.
- Los cálculos de temperaturas para la cuenca sedimentaria tienen como objetivo principal realizar un diagnóstico preliminar de las zonas con anomalías térmicas.

Conclusión general

Aplicar este Modelo 2D Térmico estacionario en tres tipos de yacimientos geotérmicos: El primero, yacimiento tipo Roca Seca Caliente (HDR) de la Caldera de Acoculco, Puebla; el segundo se trata de un yacimiento Geotérmico Convencional de la Caldera de La Primavera, Jalisco; y, por último, las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua. Ha permitido comprobar su eficiencia al obtener resultados favorables para cada una de las áreas, por lo que se concluye que es un modelo competente que puede ser utilizado para conocer el perfil térmico natural, en estado conductivo estacionario de cualquier tipo de yacimiento geotérmico.

Apéndice A

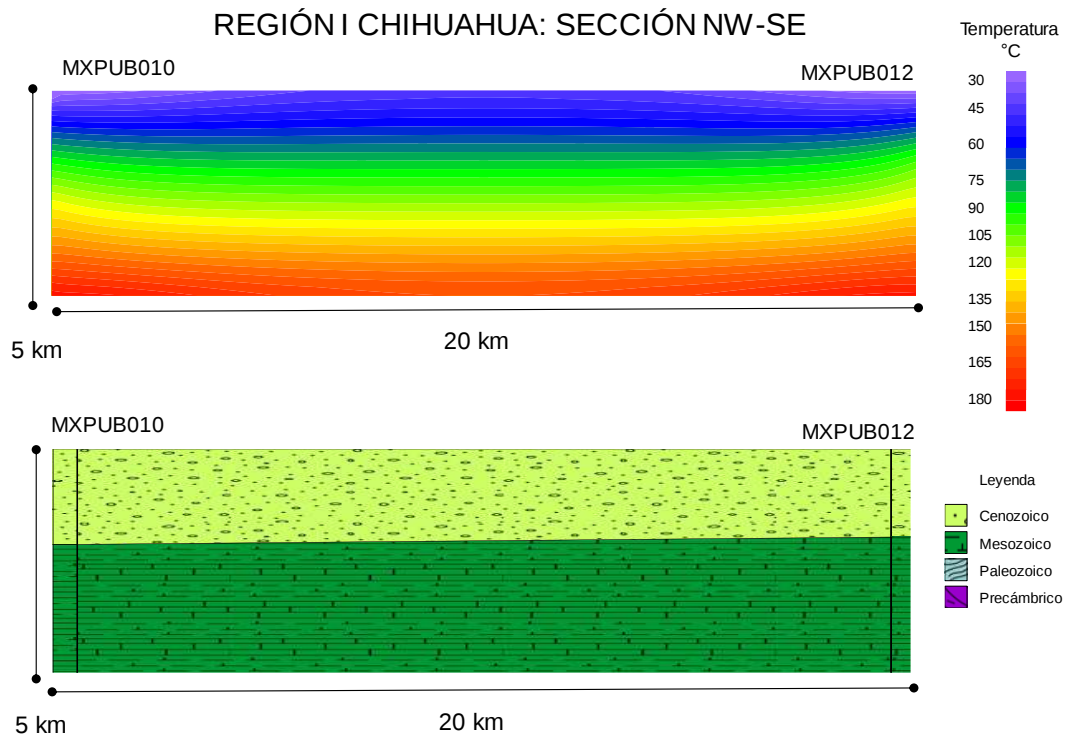


Fig. 60. Perfil de temperaturas y correlación estratigráfica de los pozos MXPUB010-MXPUB012 de la Región I con orientación N-S, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

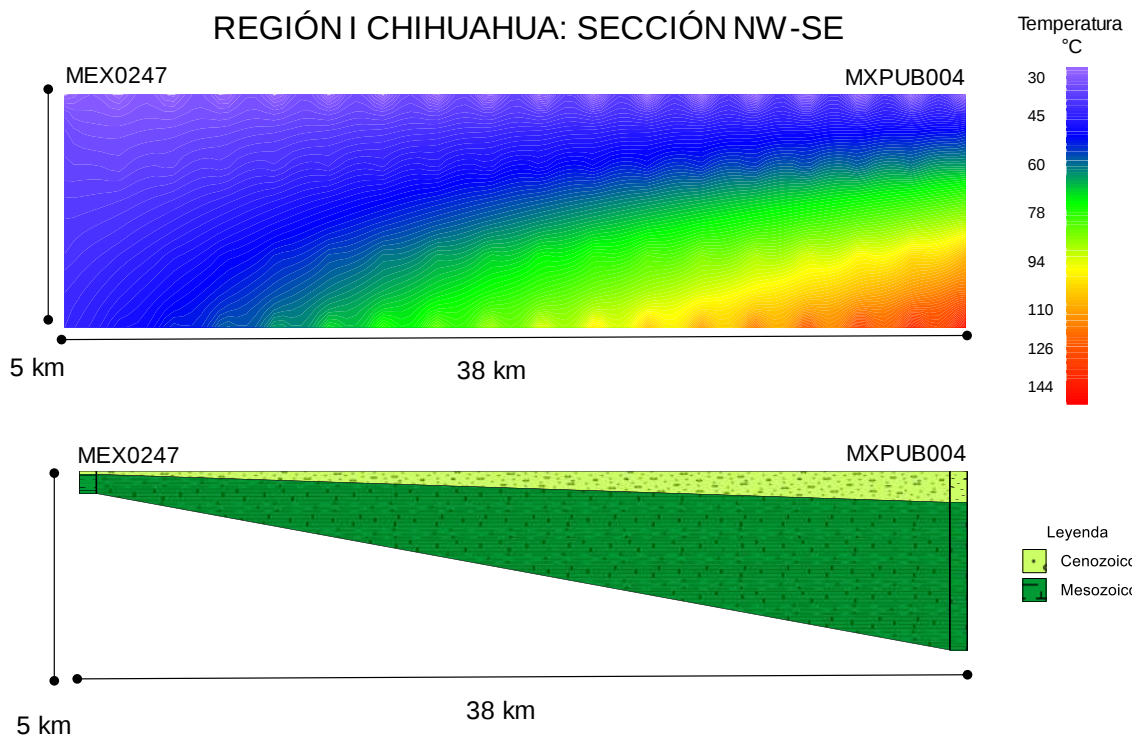


Fig. 61. Perfil de temperatura de los pozos MEX0247-MXPUB004 con orientación N-S, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

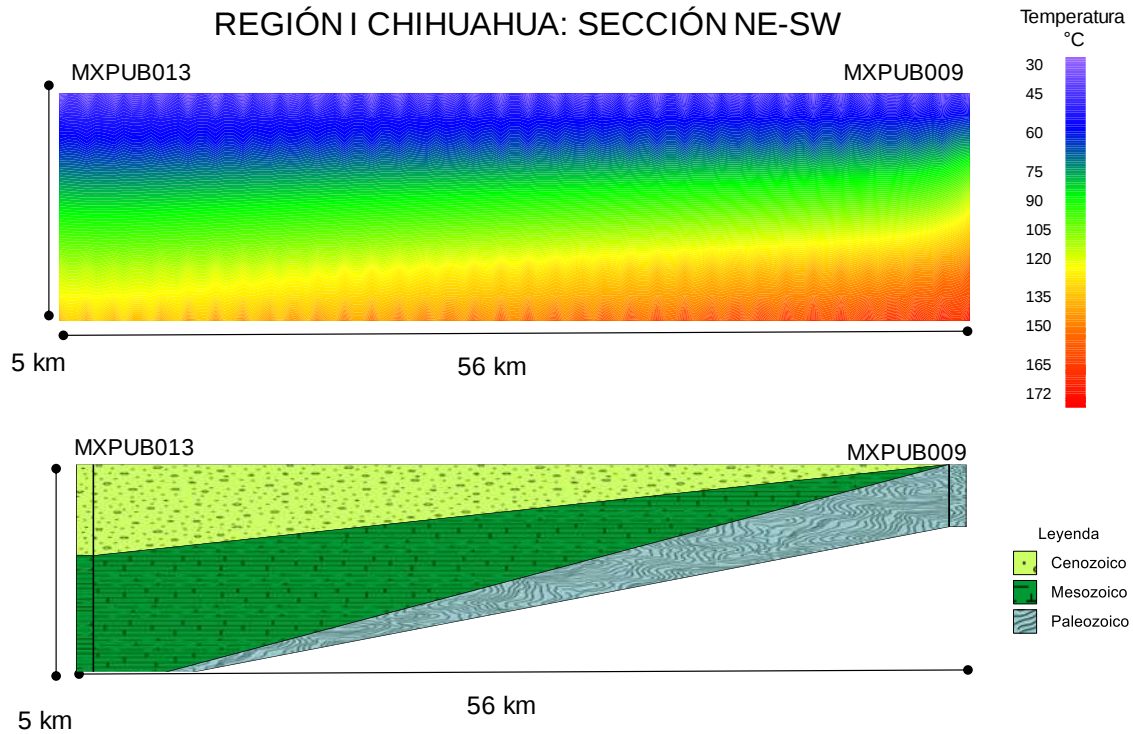


Fig. 62. Perfil de temperatura de los pozos MXPUB013-MXPUB009 con orientación N-S, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

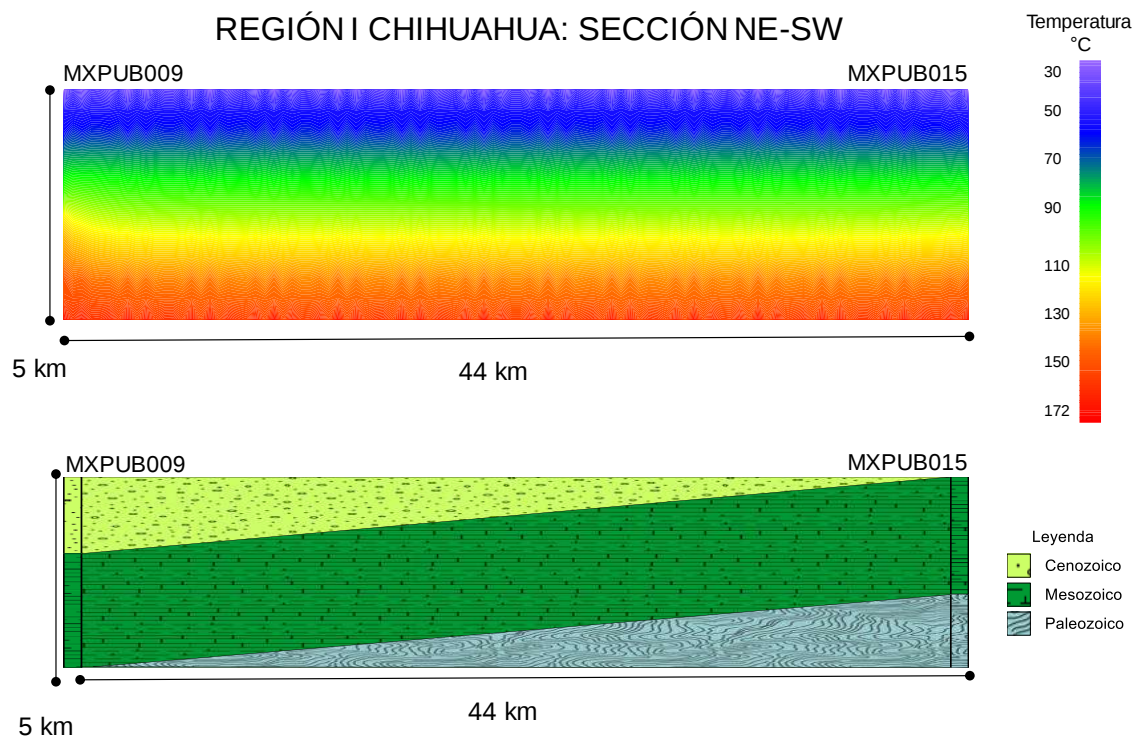


Fig. 63. Perfil de temperatura de los pozos MXPUB009-MXPUB015 con orientación N-S, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

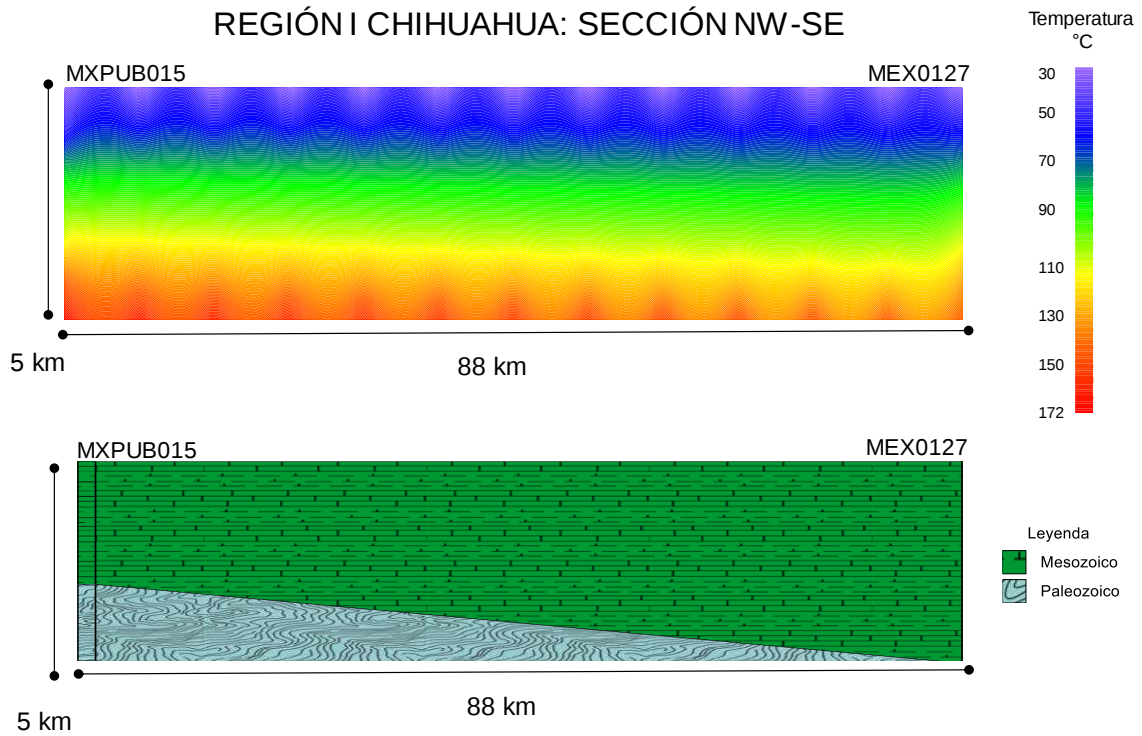


Fig. 64. Perfil de temperatura entre los pozos MXPUB015-MEX0127 con orientación N-S, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

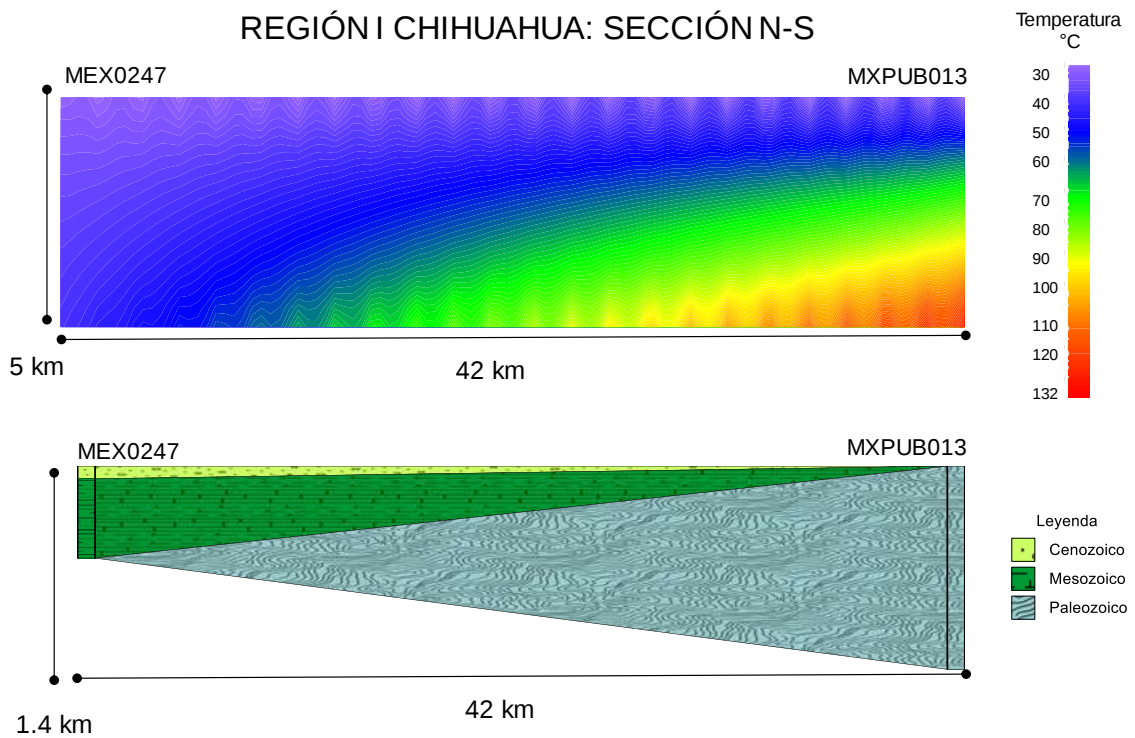


Fig. 65. Perfil de temperatura de los pozos MEX0247-MXPUB013 con orientación N-S, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

Apéndice B

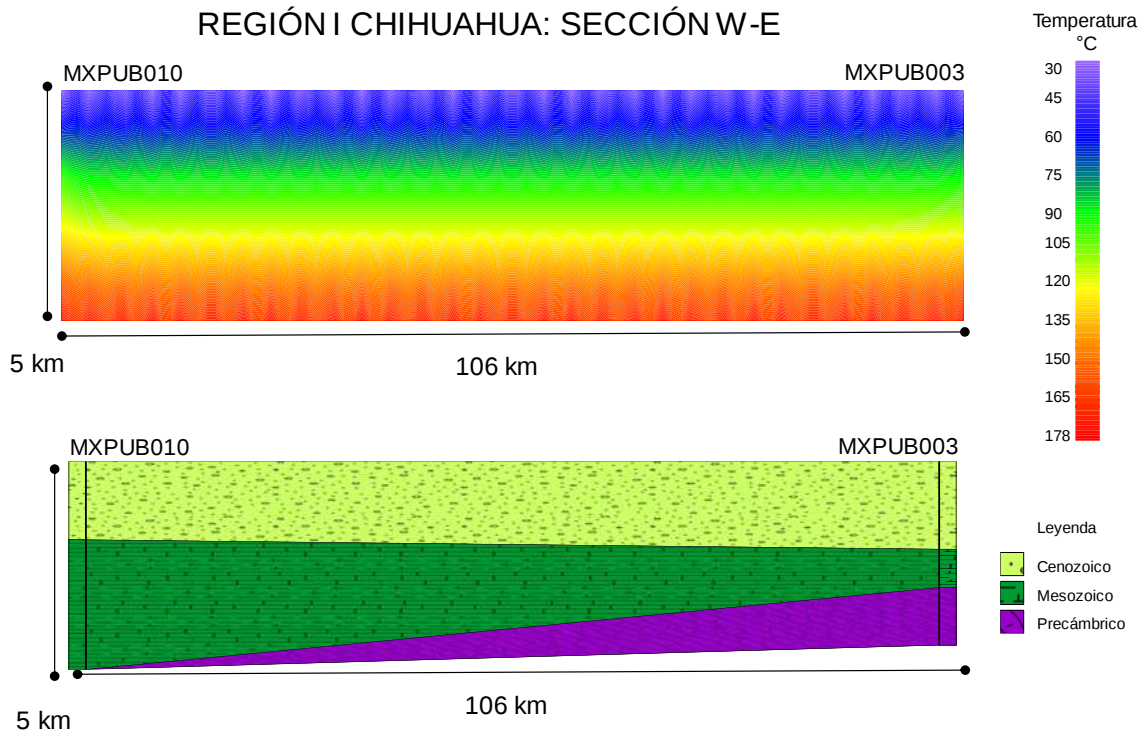


Fig. 66. Perfil de temperatura MXPUB010-MXPUB003 de la Región I con orientación W-E, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

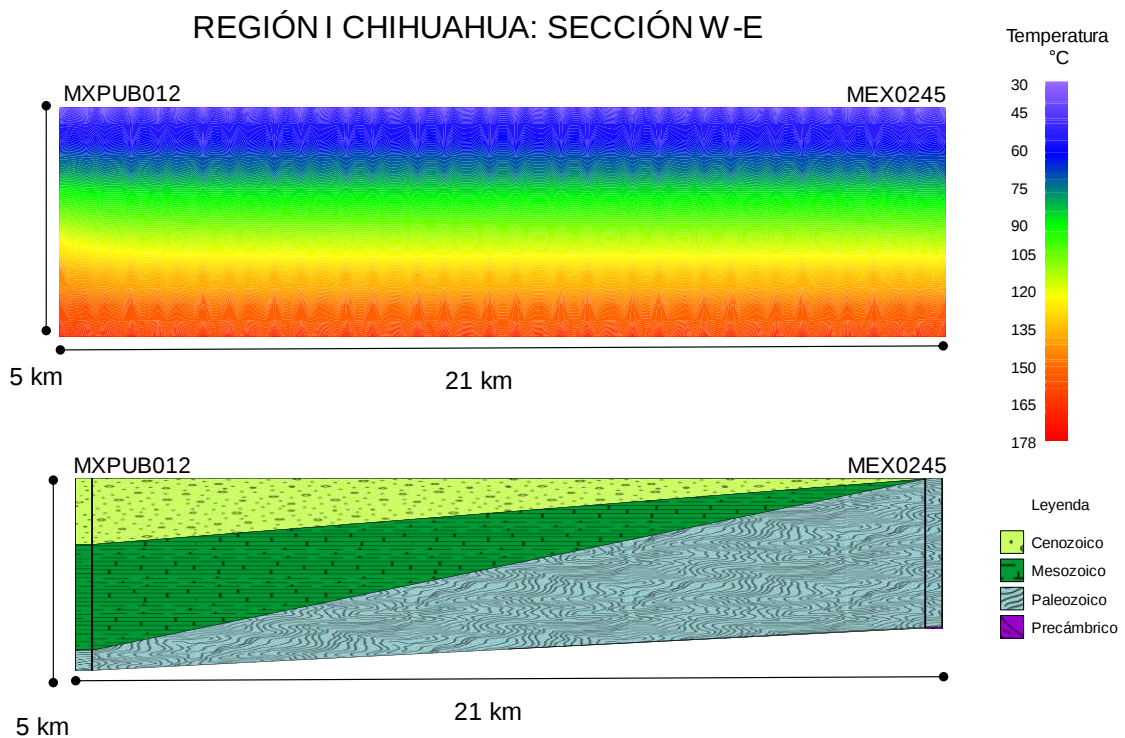


Fig. 67. Perfil de temperatura de los pozos MXPUB012-MEX0245 de la Región I con orientación W-E, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

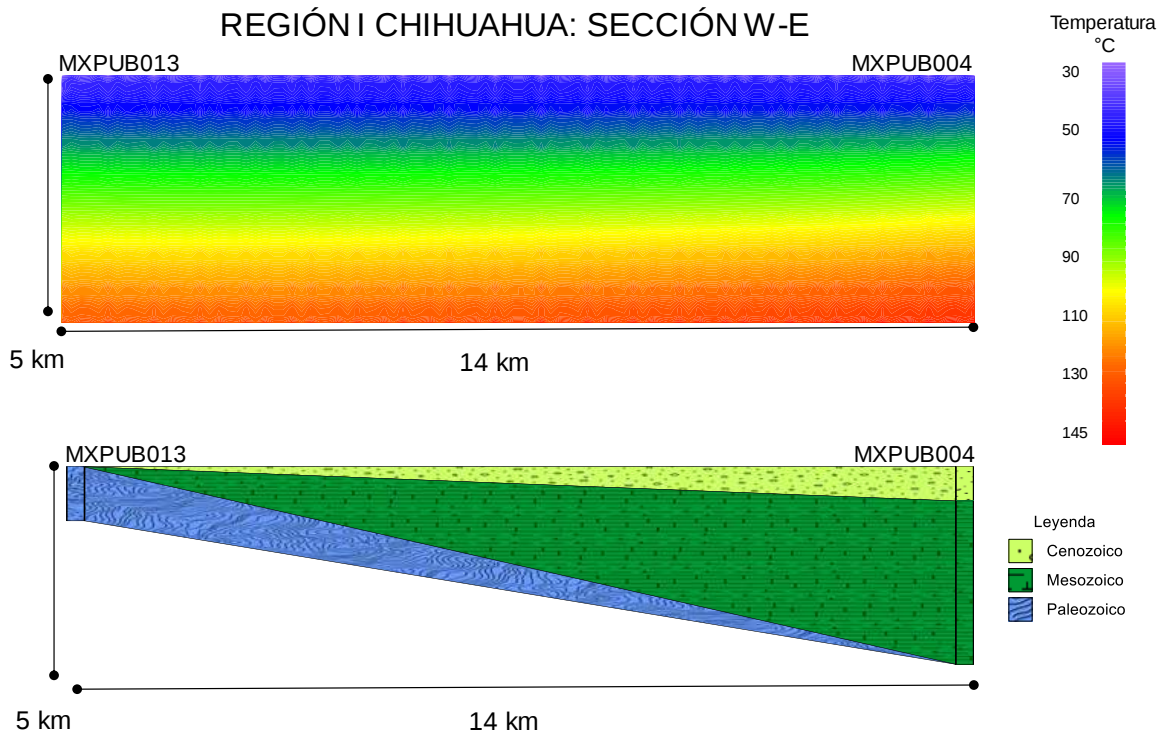


Fig. 68. Perfil de temperatura de los pozos MXPUB013-MXPUB004, de la Región I con orientación W-E, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

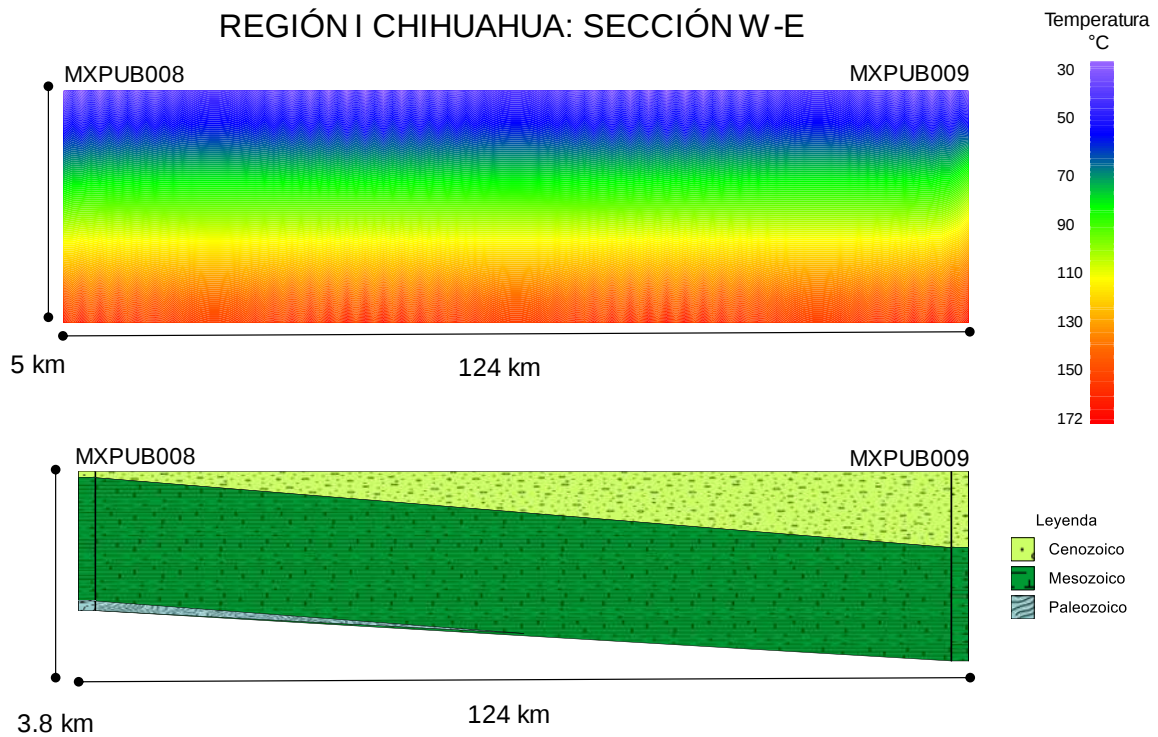


Fig. 69. Perfil de temperatura de los pozos MXPUB008-MXPUB009 de la Región I con orientación W-E, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

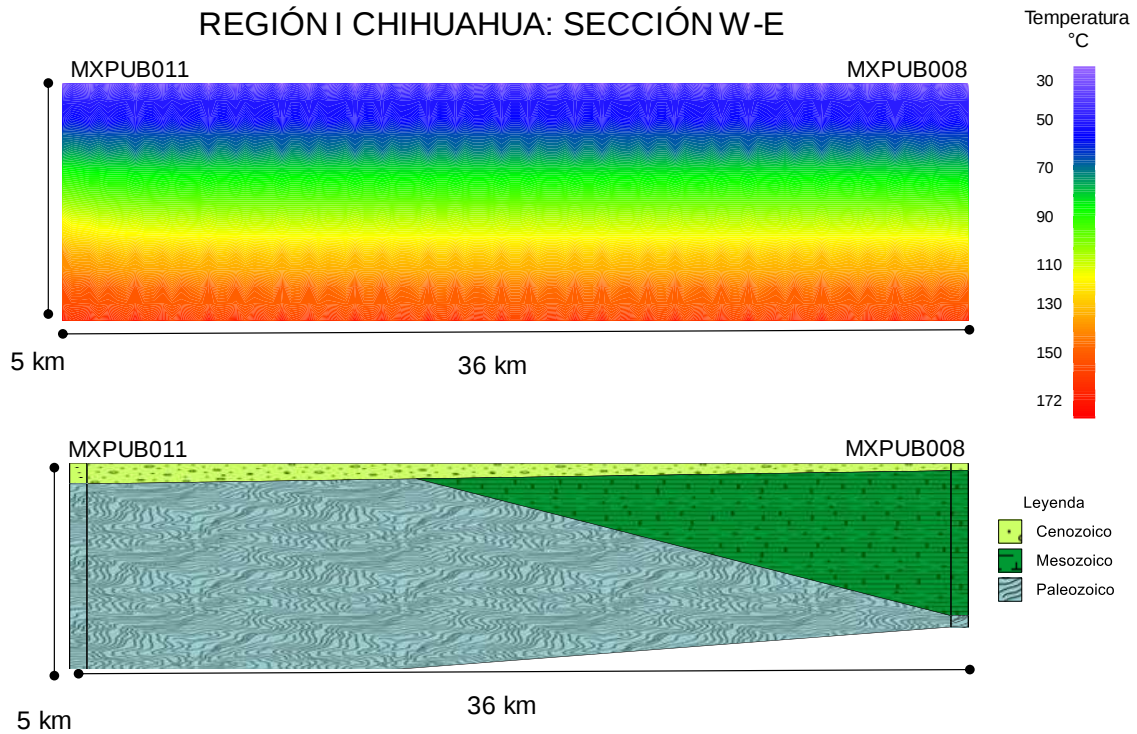


Fig. 70. Perfil de temperatura MXPUB11-MXPUB008 de la Región I con orientación W-E, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

Apéndice C

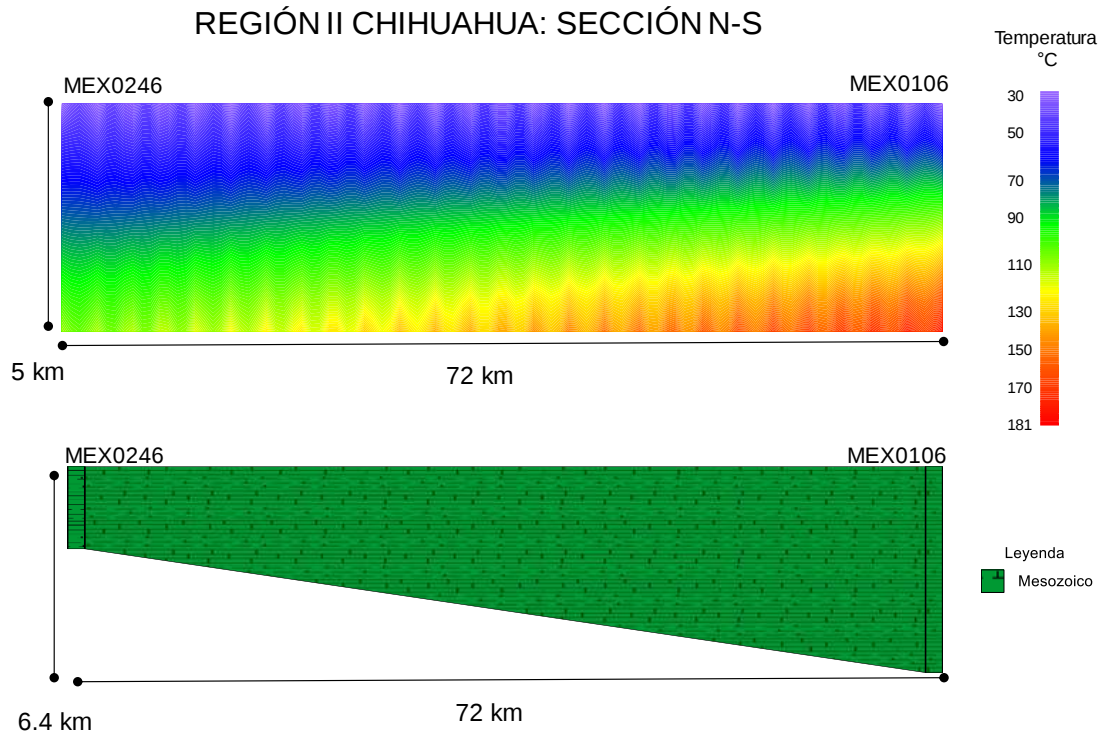


Fig. 71. Perfil de temperatura de los pozos MEX0246-MEX0106 de la Región II con orientación N-S, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

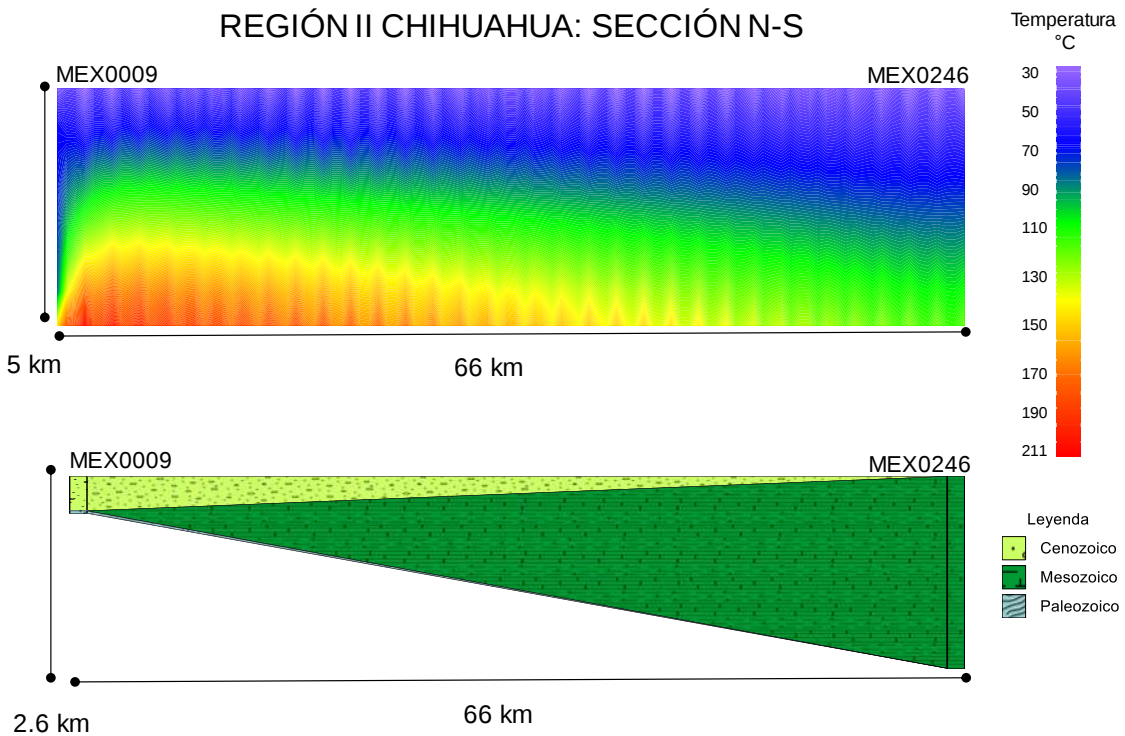


Fig. 72. Perfil de temperatura de los pozos MEX0009-MEX0246 de la Región II con orientación N-S, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

Apéndice D

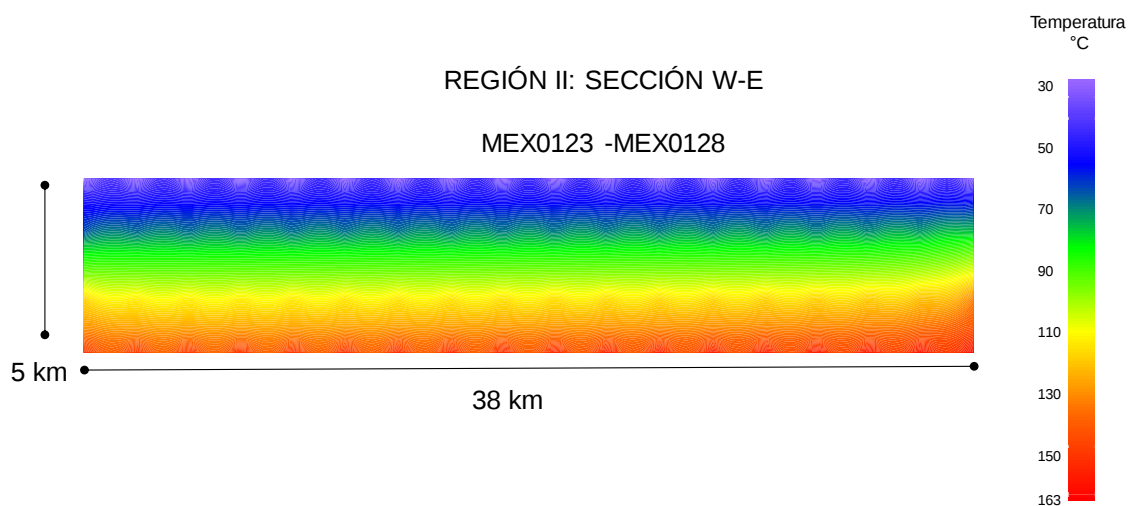


Fig. 73. Perfil de temperatura de los pozos MEX0123-MEX0128 de la Región II con orientación W-E, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

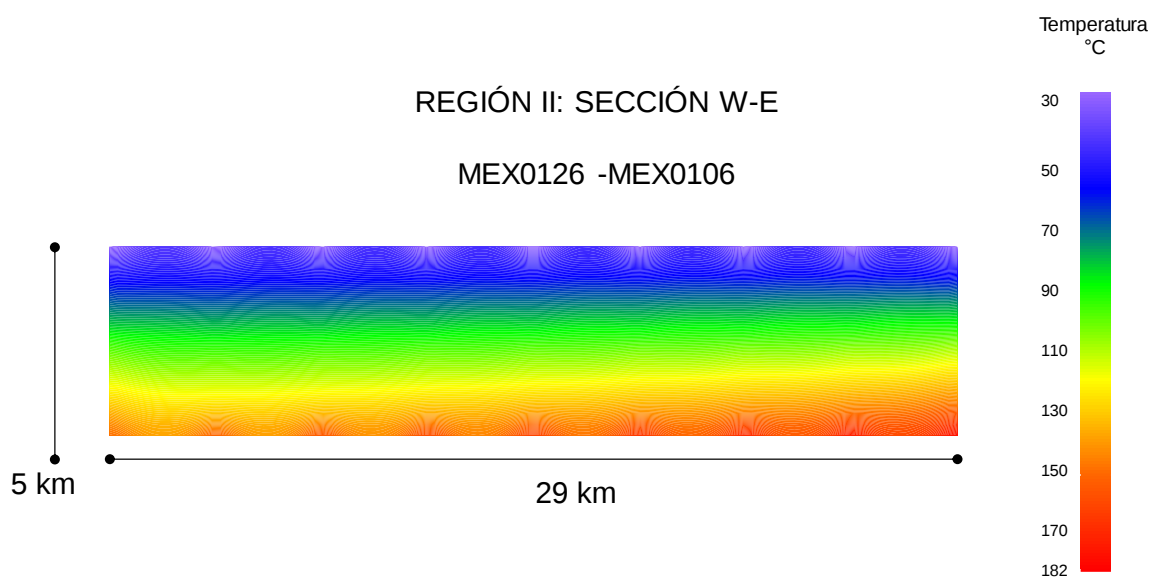


Fig. 74. Perfil de temperatura de los pozos MEX0126-MEX0106 de la Región II con orientación W-E, perteneciente a las Cuencas Sedimentarias del Norte de Chihuahua.

Referencias Bibliográficas

- Balling, N., S. E. Poulsen, S. Fuchs, A. Mathiesen, T. S. Bording, S. B. Nielsen, and L. H. Nielsen (2016). Development of a numerical 3D geothermal model for Denmark. *In: proceedings of the European Geothermal Congress*, Strasbourg, France, 19-24 September, 1-10.
- Barboza-Gudiño, J. R., J. R. Torres-Hernández, and R. Villasuso-Martínez (2016). Revisión estratigráfica y estructura de la Sierra Plomosa, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33(2), 221-238.
- Baria, R., J. Baumgaertner, H. Glass, T. Bennett, D. Teza, and A. Jupe (2017). Unconventional geothermal technology to help the climate change issue in the densely populated areas of the world with a demand for higher energy. *In: proceedings of the 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, February 13-15, 1-11.
- Baria, R., L. Mortimer, and G. Beardsmore (2013). Engineered Geothermal Systems, Development and Sustainability of. *In Renewable Energy Systems*, edited by M. Kaltschmitt, N. J. Themelis, L. Y. Bronicki, L. Söder and L. A. Vega, Springer New York. 714-727 pp. DOI: 10.1007/978-1-4614-5820-3_235.
- Beardsmore, G. R., and G. T. Cooper (2009). Geothermal systems assessment - Identification and mitigation of EGS exploration risk. *In: proceedings of the 34th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, February 9-11, 1-11. SGP-TR-187.
- Bejan, A. (1993). *Heat Transfer*. 1st. ed. John Wiley & Sons, Inc. 675 pp.
- Békési, E., L. Lenkey, J. Limberger, K. Porkoláb, A. Balázs, D. Bonté, M. Vrijlandt, F. Horváth, S. Cloetingh, and J.-D. van Wees (2017). Subsurface temperature model of the Hungarian part of the Pannonian Basin. *Global and Planetary Change*, In Press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.09.020>.
- Belousov, V., E. Erlich, and Y. Kuzmin (2017). Geotectonics and heat flows. *In: proceedings of the 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, February 13-15, 1-12.
- Bird, R. (2006). *Fenómenos de Transporte*. 2 ed. Limusa Wiley. 1062 pp.
- Blackwell, D. D., P. T. Negraru, and M. C. Richards (2007). Assessment of the Enhanced Geothermal System resource base of the United States. *Natural Resources Research*. DOI: 10.1007/s11053-007-9028-7.
- Bonneville, A., and P. Capolsini (1999). THERMIC: a 2-D finite-element tool to solve conductive and advective heat transfer problems in Earth Sciences. *Computers & Geosciences*, 25, 1137-1148.

- Böttcher, N., N. Watanabe, U. Görke, and O. Kolditz (2016). *Geoenery Modeling I: Geothermal Processes in Fractured Porous Media*. ed. Springer. 107 pp. DOI: 10.1007/978-3-319-31335-1.
- Breede, K., K. Dzebisashvili, X. Liu, and G. Falcone (2013). A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future. *Geothermal Energy*, 1(4), 1-27. DOI: 10.1186/2195-9706-1-4.
- Brown, D. W., D. V. Duchane, G. Heiken, and V. T. Hriscu (2012). *Mining the Earth's Heat: Hot Dry Rock Geothermal Energy*. ed. Springer. 657 pp. DOI: 10.1007/978-3-540-68910-2.
- Castillo-Román, J., S. P. Verma, and J. Andaverde (1991). Modelling of temperature under the Los Hornos Caldera, Puebla, Mexico, in terms of magma chamber depth. *Geofísica Internacional*, 30(3), 149-172.
- Çengel, Y. A. (2007). *Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y aplicaciones*. 4 ed. The McGraw-Hill 922 pp.
- Davey, J. E., J. C. Preston, and J. T. Keetley (2009). Understanding risks and uncertainties in geothermal modelling: Constraining thermal conductivity models. In: *proceedings of the Australian Geothermal Energy Conference*, Adelaide, Australia, 1-6.
- Diersch, H. J. G. (2013). *FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media*. ed. Springer. 996 pp. DOI: 10.1007/978-3-642-38739-5.
- Edwards, C. H., and D. E. Penney (2009). *Ecuaciones diferenciales y problemas con valores en la frontera*. 4 ed. Pearson Educación, México. 824 pp.
- Eppelbaum, L., I. Kutasov, and A. Pilchin (2014). *Applied Geothermics*. 1 ed. Springer. 751 pp. DOI: 10.1007/978-3-642-34023-9.
- Espinoza-Ojeda, O. M., R. M. Prol-Ledesma, E. R. Iglesias, and A. Figueroa-Soto (2017). Update and review of heat flow measurements in Mexico. *Energy*, **121C**, 466-479. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.045>.
- Flores, E. L., R. M. Prol-Ledesma, and J. J. Royer (2001). Boundary conditions in thermal models: An application to the KTB site, Germany. *Geofísica Internacional*, 40(2), 97-109.
- Fuchs, S., and N. Balling (2016). Improving the temperature predictions of subsurface thermal models by using high-quality input data. Part 1: Uncertainty analysis of the thermal-conductivity parameterization. *Geothermics*, 64, 42-54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.04.010>.

- Fuchs, S., and A. Förster (2014). Well-log based prediction of thermal conductivity of sedimentary successions: a case study from the North German Basin. *Geophysical Journal International*, 196, 291-311. DOI: 10.1093/gji/ggt382.
- Fuchs, S., N. Balling, and A. Förster (2015). Calculation of thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat capacity of sedimentary rocks using petrophysical well logs. *Geophysical Journal International*, 203, 1977-2000. doi: 10.1093/gji/ggv403.
- Garcia, F., C. Palacio, and U. Garcia (2009). Generación de mallas no estructuradas para la implementación de modelos numéricos. *Dyna*, 76 (157), 17-25.
- García-Estrada, G., A. López-Hernandez, and R. M. Prol-Ledesma (2002). Conductive thermal modeling to estimate the age of the heat source at the Los Azufres geothermal field, Mexico. *Geothermal Resources Council Transactions*, 26, 9-16.
- Gibson, H., R. Seikel, D. FitzGerald, M. Middleton, and A. Ghorri (2011). 3D geology, temperature, heat flow and thermal gradient modeling of the north Perth Basin, Western Australia. In: *proceedings of the 81st SEG Annual Meeting*, San Antonio, Texas, 1-5.
- Gibson, H. J., K. Stüwe, R. Seikel, and D. FitzGerald (2009). Practical aspects of 3D temperature and heat flow modeling for exploration of EGS energy plays. In: *proceedings of the Australian Geothermal Energy Conference*, Adelaide, Australia, 56-61.
- Gibson, H., K. Stüwe, R. Seikel, D. FitzGerald, P. Calcagno, A. Guillen, and P. McInerney (2008). Forward prediction of temperature distribution direct from 3D geology models. In: *proceedings of the Australian Geothermal Energy Conference*, Melbourne, Australia, 19-22 August 1-8.
- Gola, G., G. Bertini, M. Bonini, S. Botteghi, A. Brogi, R. De Franco, A. Dini, A. Donato, G. Gianelli, D. Liotta, A. Manzella, D. Montanari, G. Montegrossi, L. Petracchini, G. Ruggieri, A. Santilano, D. Scrocca, and E. Trumpy (2017). Data integration and conceptual modelling of the Larderello geothermal area, Italy. *Energy Procedia*, 125, 300-309. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.08.201.
- Gómez-Tuena, A., M. T. Orozco-Esquivel, and L. Ferrari (2007). Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geological Society of America Special Paper*, 422, 129-181.
- Guerrero-Martínez, F. J., S. P. Verma, P. L. Younger, and M. C. Paul (2015). Geothermal systems simulation: A case study. In: *proceedings of the World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 1-6.

- Holman, J. P. (1980). *Transferencia de Calor*. 8 ed. Mc Graw Hill. 485 pp.
- Iglesias, E. R., R. J. Torres, J. I. Martínez-Estrella, R. Lira-Argüello, A. Paredes-Soberanes, N. Reyes-Picasso, R. M. Prol, O. M. Espinoza-Ojeda, S. López-Blanco, and I. González-Reyes (2016). Potencial teórico SGM en los afloramientos del basamento en México. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, 29(2), 6-17.
- INEGI (1983). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. In, edited by, El 25 de enero de 1983 México. <http://www.inegi.org.mx/>
- Latimer, T., and P. Meier (2017). Use of the experience curve to understand economics for at-scale EGS projects. In: proceedings of the 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, February 13-15, 1-9.
- Liang-Ping, X., Z. Ju-Ming, and S. Hui-wen (1985). Mathematical Simulation of Geotemperature and Heat Flow Patterns. *Journal of geodynamics*, 4(1-4), 45-61.
- Lopez-Hernandez, A. (2009). *Evolución Volcánica del Complejo Tulancingo-Acoculco y su Sistema Hidrotermal, estados de Hidalgo y Puebla, México*. . Universidad Nacional Autónoma de México, México. Tesis Doctoral. 185 pp.
- Lorenzo Pulido, C., M. Flores Armenta, and G. Ramírez Silva (2011). Characterization of a hot dry rock reservoir at Acoculco geothermal zone, Pue. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, 24(1), 59-69.
- Lowry, T. S., A. Foris, J. T. Finger, S. Pye, and D. A. Blankenship (2017). Implications of drilling technology improvements on the availability of exploitable EGS resources. In: proceedings of the 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, February 13-15, 1-4.
- Lüschen, E. (2005). Relationship between recent heat flow and seismic properties: Some notes from crustal research in Germany. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148(1-2), 31-45. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.04.012>.
- Maciel-Flores, R., and J. Rosas-Elguera (1992). Modelo geológico y evaluación del campo geotérmico La Primavera, Jal., México. *Geofísica Internacional*, 31(4), 359-370.
- Mahood, G. A. (1981). A summary of the geology and petrology of the Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 86(B11), 10137-10152. DOI: 10.1029/JB086iB11p10137.

- Mather, B. R., L. Moresi, S. Cruden, and D. Taylor (2015). 3D numerical modelling of heat flow across heterogeneous geology in South-East Australia. In: proceedings of the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April, 1-4.
- Merriman, J. D., A. G. Whittington, and A. M. Hofmeister (2017). Re-evaluating thermal conductivity from the top down: Thermal transport properties of crustal rocks as a function of temperature, mineralogy and texture. In: proceedings of the 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, February 13-15, 1-12.
- Moeck, I. S. (2014). Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 867-882. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.032>.
- Naganawa, S., N. Tsuchiya, T. Okabe, T. Kajiwara, K. Shimada, and N. Yanagisawa (2017). Innovative Drilling Technology for Supercritical Geothermal Resources Development. In: proceedings of the 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, February 13-15, 1-8
- Norden, B., A. Förster, K. Behrends, K. Krause, L. Stecken, and R. Meyer (2012). Geological 3-D model of the larger Altensalzwedel area, Germany, for temperature prognosis and reservoir simulation. *Environmental Earth Sciences*, 67(2), 511-526. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1709-9>.
- Olasolo, P., M. C. Juárez, M. P. Morales, S. D'Amico, and I. A. Liarte (2016). Enhanced geothermal systems (EGS): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 133-144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.031>.
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. 1 ed. Taylor & Francis. 257 pp.
- Peiffer, L., R. Bernard-Romero, A. Mazot, Y. A. Taran, M. Guevara, and E. Santoyo (2014). Fluid geochemistry and soil gas fluxes (CO₂-CH₄-H₂S) at a promissory Hot Dry Rock Geothermal System: The Acoculco caldera, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 284, 122-137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.07.019>.
- Piskunov, N. (1983). *Cálculo Diferencial e Integral*. 3 ed. Mir. 444 pp.
- Przybycin, A. M., M. Scheck-Wenderoth, and M. Schneider (2017). The origin of deep geothermal anomalies in the German Molasse Basin: results from 3D

- numerical models of coupled fluid flow and heat transport. *Geothermal Energy*, 5(1), 1-28. DOI: 10.1186/s40517-016-0059-3.
- Reiter, M., and J. C. Tovar (1982). Estimates of terrestrial heat flow in northern Chihuahua, Mexico, based upon petroleum bottom-hole temperatures. *Geological Society of America Bulletin*, 93(7), 613-624. doi: 10.1130/0016-7606(1982)93<613: EOTHFI>2.0.CO;2.
- Rybach, L. (2015). Classification of geothermal resources by potential. *Geothermal Energy Science*, 3, 13-17. DOI: 10.5194/gtes-3-13-2015.
- Santoyo-Gutiérrez, E., and I. S. Torres-Alvarado (2010). Escenario Futuro de Explotación de la energía Geotérmica: hacia un desarrollo sustentable. *Revista Digital Universitaria*, 11(10), 1-26.
- Scheck-Wenderoth, M., and Y. P. Maystrenko (2013). Deep control on shallow heat in sedimentary basins. *Energy Procedia*, 40, 266-275. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.08.031.
- Scott, S., T. Driesner, and P. Weis (2016). The thermal structure and temporal evolution of high-enthalpy geothermal systems. *Geothermics*, 62, 33-47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.02.004>.
- Shao, H., P. Hein, A. Sachse, and O. Kolditz (2016). *Geoenergy Modeling II: Shallow Geothermal Systems*. ed. Springer. 94 pp. DOI 10.1007/978-3-319-45057-5.
- Sharma, A. (2016). *Introduction to Computational Fluid Dynamics: Development, Application and Analysis*. ed. John Wiley & Sons Ltd., London. 393 pp.
- Spiegel, M. R., and H. R. Garcia (1983). *Ecuaciones Diferenciales Aplicadas*. 3 ed. Prentice-Hall, México. 222 pp.
- Stober, I., and K. Bucher (2013). *Geothermal energy: from theoretical models to exploration and development*. ed. Springer, Berlin. 291 pp. DOI: 10.1007/978-3-642-13352-7.
- Sundberg, J., P.-E. Back, L. O. Ericsson, and J. Wrafter (2009). Estimation of thermal conductivity and its spatial variability in igneous rocks from in situ density logging. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 46, 1023-1028. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2009.01.010.
- Suxo Mamani, F. (2011). Solución de Ecuaciones Diferenciales Parciales por el Métdo de Monte Carlo. *Revista Boliviana de Física*, 19(19), 24–33.
- Tannehill, J. C., D. Anderson, and R. H. Pletcher (1997). *Computational fluid mechanics and Heat Transfer*. 2 ed. Taylor & Francis, USA. 792 pp.

- Teng, Y., and K. Koike (2007). Three-dimensional imaging of a geothermal system using temperature and geological models derived from a well-log dataset. *Geothermics*, 36, 518-538. DOI: 10.1016/j.geothermics.2007.07.006.
- Tinoco-Murillo, Z. S. (2017). Génesis y mecanismos de emplazamiento de la pómez gigante de la Caldera de La Primavera, Jalisco. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo., Morelia. Tesis de Maestría. 95 pp.
- Toth, A. N., and E. Bobok (2017). *Flow and Heat Transfer in Geothermal Systems*. ed. Elsevier, USA. 382 pp.
- Verma, S. P., and J. Andaverde (1995). Temperature field distribution from cooling of a magma chamber. In: *proceedings of the World Geothermal Congress*, Florence, Italy, 1119-1124.
- Verma, S. P., and E. Gómez-Arias (2013). Three-dimensional thermal sensitivity analysis of cooling of a magma chamber in the Los Azufres geothermal field, Michoacán, Mexico. *Geothermal Energy*, 1(1), 14.
- Verma, S. P., and E. Gómez-Arias (2013). Three-dimensional temperature field simulation of magma chamber in the Los Humeros geothermal field, Puebla, Mexico. *Applied Thermal Engineering*, 52, 512-515. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.12.018.
- Verma, S. P., and E. Gómez-Arias (2016). Flat surface versus present-day topography for cylindrical and spherical sources in temperature field simulation models: The Cerritos Colorados geothermal field, Jalisco, Mexico. *Applied Thermal Engineering*, 107, 70-78. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.06.096.
- Verma, S. P., and U. Rodríguez-González (1997). Temperature field distribution from cooling of a magma chamber in La Primavera Caldera, Jalisco, México. *Geothermics*, 26(1), 25-42.
- Verma, S. P., U. C. Arredondo-Parra, J. Andaverde, E. Gómez-Arias, and F. J. Guerrero-Martínez (2012). Three-Dimensional temperature field simulation of a cooling of a magma chamber, La Primavera caldera, Jalisco, Mexico. *International Geology Review*, 54(7), 833-843. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2011.585036>.
- Viggiano-Guerra, J. C., M. Flores Armenta, and G. R. Ramírez Silva (2011). Evolution of the geothermal system in Acoculco, Pue., Mexico: Study based on petrography of well EAC-2 and other information. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, 24(1), 14-24.
- Vosteen, H.-D., V. Rath, A. Schmidt-Mumm, and C. Clauser (2004). The thermal regime of the Northeastern-German Basin from 2-D inversion. *Tectonophysics*, 386(1-2), 81-95. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.05.004>.

- Watanabe, N., G. Blöcher, M. Cacace, S. Held, and T. Kohl (2017). *Geoenergy modeling III*. ed. Springer, Alemania. pp. DOI: 10.1007/978-3-319-46581-4.
- Welhan, J., and M. Gwynn (2014). High heat flow in the Idaho Thrust Belt: A hot sedimentary geothermal prospect. *Geothermal Resources Council Transactions*, 38, 1055-1066.
- Wen, H., J.-h. Lu, Y. Xiao, and J. Deng (2015). Temperature dependence of thermal conductivity, diffusion and specific heat capacity for coal and rocks from coalfield. *Thermochimica Acta*, 619, 41-47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2015.09.018>.
- Xaman, J. G.-R., M. (2016). *Dinamica de fluidos computacional para ingenieros*. Primera ed. Palibrio. 408 pp.
- Yost, K., A. Valentin, and H. H. Einstein (2015). Estimating cost and time of wellbore drilling for Engineered Geothermal Systems (EGS) – Considering uncertainties. *Geothermics*, 53, 85-99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.04.005>.
- Zill, D. (1997). *Ecuaciones diferenciales con aplicaciones de modelado*. 6 ed. Thomson Editores, México. 609 pp.