



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura



Unidad Ticomán

## Desarrollo de software para la determinación de perfiles de temperatura en 2D del subsuelo aplicado en pozos.

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**Ingeniero Geofísico**

P R E S E N T A

Uriel Hazel Segura González

Asesor Interno:

MTRO. MARCO ANTONIO CRUZ CARRASCO

Asesor Externo:

DR. ORLANDO MIGUEL ESPINOZA OJEDA

Autorización de uso de obra

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Presente

Bajo protesta de decir verdad el que suscribe **Uriel Hazel Segura Gonzalez**, estudiante del programa de **Ingeniería Geofísica**, con número de boleta **2018390631**, manifiesto ser auto y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "**Desarrollo de software para la determinación de perfiles de temperatura en 2D del subsuelo aplicado en pozos**", en adelante "La Tesis" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales "La Tesis" por un periodo de un año contando a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovara automáticamente en caso de no dar aviso expreso a el IPN de su determinación.

En virtud de lo anterior, "El IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "La Tesis".

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de "La Tesis", manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene a ninguna otra otorgada por el suscrito respecto de "La Tesis", por lo que deslindo de toda responsabilidad a "El IPN" en caso de que el contenido de "La Tesis" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México, a 07 de Julio de 2023

Atentamente



Uriel Hazel Segura Gonzalez

Folio  
DIE/068/2023

Asunto  
Trámite de titulación

2023. Año de Francisco Villa  
30 Aniversario de la Declaración sobre  
la Eliminación de la Violencia contra la Mujer (ONU)  
60 Aniversario del CECyT 7 "Cuaultémoc" y del CENAC  
90 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil  
40 Aniversario del CIDIR, Unidad Oaxaca

Ciudad de México, 27 de febrero de 2023

**ING. FERNANDO RODRÍGUEZ CHÁVEZ**  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO  
Presente

Me permito solicitar a usted, gire sus amables instrucciones para que se continúen los trámites de titulación de la **C. URIEL HAZEL SEGURA GONZÁLEZ**, con número de boleta **2018390631**, pasante de la carrera de Ingeniería Geofísica, quien se titulará por la opción de **Tesis individual**.

Con el título "**Desarrollo de software para la determinación de perfiles de temperatura en 2D del subsuelo aplicado en pozos**".

Se incluye además la lista de sinodales para la revisión del trabajo escrito y evaluación de la presentación oral.

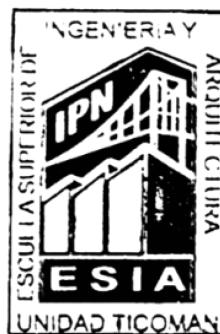
Presidente	M en C. Julio Cesar Guarneros López	13042526	
Secretario	M. en C. Jonathan Belmares Servín	11493369	
Vocal 1	Dr. Ambrosio Aquino López	2686212	
Vocal 2	Dr. Enrique Coconi Morales	11288124	
Vocal 3	Ing. Marco Antonio Cruz Carrasco	10942792	Asesor interno
Dr. Orlando Miguel Espinoza Ojeda. CONACyT - Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán			Asesor externo

Sin más por el momento le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE  
"La Técnica Al Servicio de la Patria"



**M en C. JULIO CÉSAR GUARNEROS LÓPEZ**  
Jefe del Depto. de Innovación Educativa



DEPARTAMENTO DE  
INNOVACIÓN  
EDUCATIVA

2023. Año de Francisco Villa  
30 Aniversario de la Declaración sobre  
la Eliminación de la Violencia contra la Mujer (ONU)  
60 Aniversario del CECyT 7 "Cuahtémoc" y del CENAC  
90 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil  
40 Aniversario del CIIDIR, Unidad Oaxaca

Folio  
DGE y T/035/2023.

**Asunto**  
ASESORIA DE TESIS

CDMX, 01 de marzo de 2023.

INC. MARCO ANTONIO CRUZ CARRASCO

P R E S E N T E

En atención a la solicitud del **C. URIEL HAZEL SEGURA GONZÁLEZ**, pasante del Programa Académico de Ingeniería Geofísica, con base en el Reglamento de Titulación Profesional del I.P.N., Capítulo II, Artículo 5, Fracción II y el Artículo 7 Inciso I, se le informa que ha sido asignado para asesorar la tesis del pasante mencionado. Por lo que solicito a usted se sirva proponer dentro de un plazo de 30 días calendario, el tema de tesis y contenido a desarrollar por el interesado.

Seguro de contar con su participación, lo saludo cordialmente.

**ATENTAMENTE**

"La Técnica al Servicio de la Patria"

Ing. Fernando Rodríguez Chávez  
Subdirector Académico



**UNIDAD TICOMÁN**  
**SURDIRECCIÓN ACADÉMICA**

c.c.p. M. en C. JULIO CESAR GUARNEROS LÓPEZ- Jefe del Departamento de Innovación Educativa - Interesado

FRCH/SBM/mpc

**Folio**  
DGE y T/036/2023.

2023 Año de Francisco Villa  
30 Aniversario de la Declaración sobre  
la Eliminación de la Violencia contra la Mujer (ONU)  
60 Aniversario del CECyT 7 "Cuauhémoc" y del CENAC  
90 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil  
40 Aniversario del CIIDIR, Unidad Oaxaca

**Asunto**  
ASESORIA DE TESIS

CDMX, 01 de marzo de 2023.

**DR. ORLANDO MIGUEL ESPINOZA OJEDA**

CONACyT - Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra,  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán

**P R E S E N T E**

En atención a la Solicitud del C. URIEL HAZEL SEGURA GONZÁLEZ, pasante del Programa Académico de Ingeniería Geofísica y tomando en consideración sus altos méritos profesionales, me es grato invitarlo a dirigir el trabajo de tesis con fines de titulación profesional que, por la opción de **Tesis Individual**, deberá desarrollar la interesada, por lo que solicito a usted, se sirva proponer a esta Subdirección el Tema y Contenido.

En la confianza de que contaremos con su colaboración, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

"La Técnica al Servicio de la Patria"

Ing. Fernando Rodríguez Chávez  
Subdirector Académico



**UNIDAD TICOMÁN**  
**SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA**

c.c.p. M. en C. JULIO CESAR GUARNEROS LOPEZ- Jefe del Departamento de Innovación Educativa - Interesado

FRCH/SBM/mpc



**FOLIO**  
DGE-T/048/2023.

2023. Año de Francisco Villa  
30 Aniversario de la Declaración sobre  
la Eliminación de la Violencia contra la Mujer (ONU)  
60 Aniversario del CECyT 7 "Cuauhtémoc" y del CENAC  
90 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil  
40 Aniversario del CIIDIR, Unidad Oaxaca

**Asunto**  
Registro de Tema

CDMX, a 16 de marzo de 2023.

**C. URIEL HAZEL SEGURA GONZÁLEZ**  
PASANTE DEL PROGRAMA ACADÉMICO  
DE INGENIERÍA GEOFÍSICA  
**PRESENTE**

A continuación, comunico a usted, el tema y contenido que deberá desarrollar en su Tesis Individual, indicándole que tiene un año a partir de esta fecha, para elaborarla.

**"DESARROLLO DE SOFTWARE PARA LA DETERMINACIÓN DE PERFILES DE TEMPERATURA EN 2D DEL SUBSUELO APlicado EN POZOS"**

**LISTA DE ACRÓNIMOS/SICLAS**

**ABSTRACT**

**RESUMEN**

**INTRODUCCIÓN**

**JUSTIFICACIÓN**

**OBJETIVO GENERAL**

**HIPÓTESIS**

**CAPÍTULO 1 MARCO TEORICO**

**CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE**

**CAPÍTULO 3 ANTECEDENTES Y METODOLOGIA**

**CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

**REFERENCIAS CITADAS**

**ATENTAMENTE**

"La Técnica al Servicio de la Patria"

  
**Ing. ROBERTO LOO GUZMAN**  
Subdirector Académico.

RLG/SBM/mpc



**UNIDAD TICOMÁN**

**SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA**

Av. Ticomán No. 600, Colonia San José Ticomán, C.P. 11340, Ciudad de México, D.F., México.  
Tel: (55) 5729 6000 Ext. 56001, [www.esiatic.ipn.mx](http://www.esiatic.ipn.mx)





**Folio**  
DGE Y T/131/ 2023

2023. Año de Francisco Villa  
30 Aniversario de la Declaración sobre  
la Eliminación de la Violencia contra la Mujer (ONU)  
60 Aniversario del CECyT 7 "Cuauhtémoc" y del CENAC  
90 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil  
40 Aniversario del CIIDIR, Unidad Oaxaca

**Asunto**  
Aprobación de Tesis

Ciudad de México, 01 de junio de 2023

**ING. ROBERTO LOO GUZMÁN**  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO  
P R E S E N T E

Por este conducto, hacemos constar que el Tema y contenido, por la opción de **TESIS INDIVIDUAL**, con el tema **"DESARROLLO DE SOFTWARE PARA LA DETERMINACIÓN DE PERFILES DE TEMPERATURA EN 2D DEL SUBSUELO APlicADO EN POZOS"**, del C. URIEL HAZEL SEGURA GONZÁLEZ fue revisado y aprobado por los suscritos considerando que está ampliamente desarrollado y puede proceder a su impresión, por lo tanto, la Subdirección a su cargo, puede señalar fecha para realizar el Examen Oral.

TITULARES



M. en C. JULIO CESAR GUARNEROS LÓPEZ



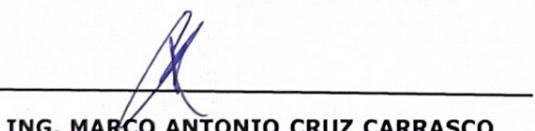
M. en C. JONATHAN BELMARES SERVIN



DR. AMBROSIO AQUINO LÓPEZ



DR. ENRIQUE COCONI MORALES



ING. MARCO ANTONIO CRUZ CARRASCO

## **Agradecimientos**

Agradezco a mi alma mater al IPN por ser la institución que me acogió y formó, que me dio tanto que lo resumiría con su hermoso lema “Técnica al servicio de la patria” el cual deseó hacer honor, agradezco a la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Ticomán por ser el medio de aprendizaje, superación y motivación para lograr este gran proyecto, mi hermosa escuela a la cual le debo más que solo conocimiento, fue donde me forme y crecí como persona. Agradezco a todos mis profesores a lo largo de mi educación y en especial a aquellos que me dieron su confianza y motivación.

Agradezco enormemente a mi asesor Orlando Miguel Espinoza Ojeda por permitirme guiarlo en sus trabajos previos y en especial por apoyarme, motivarme y aconsejarme a lo largo del proceso. Agradezco a mi asesor Marco Antonio Cruz Carrasco por ser un gran docente y en especial una gran persona, que supo encaminarme cuando más lo necesitaba.

Agradezco todas las amistades que tengo y tuve por que me permitieron llegar a este momento, pero en especial a Angelica Gonzalez Estrada por ser más que un pilar para mí, no existen palabras suficientes, y aun sin ser suficiente decidí dedicarte el presente trabajo.

De igual manera agradecer y dedicarles a mis hermanos Aaron Raziel y Omar Hamet (Segura gonzalez) mi trabajo, porque me enseñaron tanto y han sido incondicionales a lo largo de mi vida, espero encuentre satisfacción en que agradezco todo lo que me han dado, todo el apoyo proporcionado y sin importar los malos momentos, los amo y como pequeña prueba de ellos les dedico mi trabajo.

Agradecerle a mi papá Ricardo Segura Gómez por apoyarme y enseñarme a ver la vida a su manera, y prepararme para la misma, enseñarme el perdón y la superación. Por ello y muchos motivos más te dedico mi trabajo.

Agradecerle a tu mamá, Cecilia Gonzalez Hernández, por que has sido mi todo; mi guía, mi consuelo y mi motivación, no ahí suficiente texto para describir todo lo que me has dado, más que señalar que fuiste, eres y serás la mejor madre. Por eso te dedico mi trabajo.

Finalmente, agradecerme a mi mismo, por el éxito alcanzado y los venideros.

**“Si a las estrellas apuntas, al menos alto llegas”**

# INDICE

<i>Lista de acrónimos / siglas .....</i>	<b>3</b>
<i>Abstract.....</i>	<b>4</b>
<i>Resumen.....</i>	<b>5</b>
<i>Introducción .....</i>	<b>6</b>
<i>Justificación .....</i>	<b>7</b>
<i>Objetivos.....</i>	<b>7</b>
<i>Objetivo general.....</i>	<b>7</b>
<i>Objetivos específicos.....</i>	<b>7</b>
<i>Hipótesis .....</i>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO 1 MARCO TEORICO .....</b>	<b>8</b>
<i>Generalidades de la geotermia .....</i>	<b>8</b>
<i>Sistemas Geotérmicos .....</i>	<b>8</b>
Sistemas geotérmicos de conducción .....	10
Sistemas geotérmicos Convectivos.....	11
Clasificación de sistemas Geotérmicos.....	11
<i>Energía en México .....</i>	<b>12</b>
Energía geotérmica en México .....	12
Campos de producción de energía geotérmica .....	12
<i>Método Numérico.....</i>	<b>14</b>
CFD aplicado a flujo de calor y trasferencia de calor.....	14
Método TDMA.....	16
<b>CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 3 ANTECEDENTES Y METODOLOGIA .....</b>	<b>21</b>
<i>Antecedentes .....</i>	<b>21</b>
<i>Metodología .....</i>	<b>22</b>
4.2.1 Seccionamiento modular y migración de código .....	22
Optimización de código.....	24

Validación de optimización .....	26
Interfaz amigable con el usuario .....	28
Gráficos de salida.....	29
Aplicación del software .....	29
Acoculco, Puebla .....	30
Norte de Chihuahua, México .....	37
Norte del Durango, México .....	46
Limitantes y posibilidades de software.....	48
<b>CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES .....</b>	<b>50</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>50</b>
<b>Referencias citadas.....</b>	<b>51</b>

## Lista de acrónimos / siglas

Abreviatura	Definición
MW	MegaWatts
hipabisales	Cuerpos hipabisales o subvolcanicas son intrusiones de relativamente pequeñas dimensiones, ubicados en profundidades bajas - algo entre el batolito y de la superficie
GWh	GigaWatt-hora
MWe	Para una planta de energía, este producto es la electricidad, así que se mide en MegaWatts eléctricos
plio-pleistocena	hace referencia al conjunto de épocas geológicas definidas formalmente como Plioceno y Pleistoceno
Ka	kilo año que equivale a 1000 años
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional del término en inglés Computational Fluid Dynamics
TDMA	Tri-Diagonal Matrix Algorithm también nombrada como Thomas Algorithm nombrada de esta segunda forma en honor a su creador Llewellyn Thomas
HDR	Rocas Secas Calientes del término en inglés Hot Dry Rock
°C	Grado Celsius
CVTM	Cinturón Volcánico Trans-Mexicano
Temp	Temperatura
SENER	Secretaría de Energía
CFE	Comisión Federal de Electricidad
MSNM	Metros Sobre el Nivel del Mar
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
PEMEX	Petróleos Mexicanos

## **Abstract**

To be able to estimate the geothermal potential of any interesting area, it is imperative to model the subsurface temperature, which, a numerical tool was developed for the calculation of temperature profiles based on the equations of heat transfer, and "translated" into the Fortran programming language. In the current work, this tool was migrated to software Python, optimized, and modified with the following objectives: reduction of processing time; creation of visual output data file; adaptation to user-friendly interface. These did not affect the accuracy calculation data in comparison to its predecessor.

Only the code migration would have a 100 processing times in Python, for this reason, a optimization was required, which allowed to reduce processing times by 10000%; considering that this varies as function of the profile characteristics. As reference example, a mesh with length and depth of 3500 and 600 meters, respectively, was used; which takes 6 hours of computing in FORTRAN, compared with the 30 minutes of the optimization, performed under the same computational conditions. Then, to promote the understanding of the calculated profile, a 2D temperature plot is available as an output file; also, the calculated data is saved in a "txt" file. Subsequently, the numerical code was adapted for users with low or no programming experience, providing a relevant scope for advances to the scientific community. For that reason, the tool was developed in Jupyter Notebook online allowing its access only by internet without any installation requirement; a user guide is provided.

The numerical tool validation was performed by comparison of both results, Fortran and Python languages, the calculations difference is interpreted as the error; this remains below 10 units, that is a percentage error of only 7%. Finally, the numerical tool was applied in different geothermal and oil wellbores of Los Azufres (Michoacán), Acoculco (Puebla), northern Chihuahua and Durango.

## Resumen

Para poder estimar el potencial geotérmico de cualquier zona de interés, es imperativo modelar la temperatura del subsuelo, por lo que, se desarrolló una herramienta numérica para el cálculo de perfiles de temperatura basada en las ecuaciones de trasferencia de calor y “traducidas” en el lenguaje de programación FORTRAN. En el presente trabajo, se migró esta herramienta al software Python, optimizada y modificada con los siguientes objetivos; reducción de tiempo de procesado, creación de un archivo de salida visual, adaptación a interfaz amigable con el usuario. Estos no afectaron la exactitud de cálculo en comparación con su predecesora.

Únicamente la migración del código tendría un tiempo de procesado 100 veces en Python, por tal motivo, se comenzó con la optimización, la cual logró reducir los tiempos de procesado en un 10000%; teniendo en cuenta que al tratarse de tiempo de procesado este variara dependiendo de las características del perfil. Como referencia se usó un mallado de longitud y profundidad de 3500 y 600 metros, respectivamente; el cual demora 6 horas en FORTRAN comparado con los 30 minutos de la optimización realizada, en mismas condiciones computacionales. Posteriormente se buscó favorecer el entendimiento del perfil calculado, en consecuencia, se dispone de un gráfico como archivo de salida, asimismo los datos calculados fueron guardados en un archivo “txt” para posibilitar su utilización. Subsiguentemente se adaptó el código para usuarios con poca o nula experiencia en programación, proporcionando un mayor alcance de los avances científicos a la comunidad. Por esa razón, la herramienta se desarrolló en Jupyter Notebook online facilitando su acceso únicamente por internet sin ningún tipo de instalación, sumado a una guía de usuario para facilitar el uso de esta.

La validación de la herramienta se realizó al comparar los resultados de ambos lenguajes de un mallado idéntico, nombrando a la diferencia como el error; concluyendo que se mantiene por debajo de 4 unidades significando esto un error porcentual de tan solo el 4%. Finalmente, se aplicó en distintos pozos geotérmicos y petroleros en las zonas de Los Azufres en Michoacán, Acoculco en Puebla, norte de Chihuahua y de Durango.

## Introducción

Hoy en día la generación de energía es principalmente por medio de los hidrocarburos siendo claramente esta opción dañina a nuestro medio ambiente, razón por la cual se han hecho avances en distintos métodos de generación de energía limpia, dentro de ellas se encuentra la generación geotermeléctrica la cual se convertirá en una pieza clave dentro del abanico mundial al tener claras ventajas como el bajo impacto medio ambiental, ser un recurso renovable, sustentable y seguro teniendo también un factor de capacidad (Horas anuales de operación) mayor que otras energías renovables (Rybach, L., 2022). México se caracteriza por ser pionero en el área de la Geotermia ya que fue el primer país en el continente americano en tener una planta geotérmica incluso antes que Estados Unidos (Canet et al., 2021), actualmente se tienen 5 campos geotérmicos con los que se producen poco más de 950 (MW) anuales de energía con un potencial de hasta 10 mil MW (Frías, 2022). En 2021 según datos presentados por SENER en 2022 la generación de energías limpias fue del 28.6% del consumo nacional destacando que la energía geotérmica aporta el 1.3% esto se debe principalmente a los altos costos que se requieren para su exploración y explotación, por tal motivo la comunidad científica ha perseguido los objetivos de posibilitar el uso de las herramientas numéricas existentes por más usuarios y desarrollar avances en modelado de propiedades de las rocas por medio de herramientas numéricas.

Respecto al primer objetivo se destacan avances en el desarrollo de herramientas en un ambiente amigable o softwares de uso libre como el trabajo publicado en 2015 por Wong et al. donde se presentó una herramienta ejecutable en cualquier dispositivo con acceso a internet la cual tiene como fin la estimación de la temperatura estática de formación; en 2017 por Wong et al. presentaron una herramienta numérica llamada WELLTHER-SIM con el propósito de la determinación de las difusividades térmicas de las rocas; en 2018 se presentó por Jansen et al. un modelado numérico del sistema de fracturas presentes en el subsuelo con el objetivo de determinar el flujo de calor en campos geotérmicos, el cual fue desarrollado en el Software Matlab. En relación con el segundo objetivo se destacan de manera específica los avances en el modelado 2D de perfiles de temperatura dado que es fundamental en un campo geotérmico el análisis del flujo de calor en el subsuelo para así determinar puntos de alto gradiente térmico, trabajos como el publicado en 2020 por Guerrero et al. donde se aplicó en el complejo de la caldera de Acoculco, México un modelado 3D en el régimen de temperaturas del campo mediante el uso del software Fortran 90; con el mismo objetivo se presentó por Espinoza et al. en 2021 una herramienta numérica desarrollada en el lenguaje de programación FORTRAN la cual se aplicó en zonas como La Primavera Caldera, Acoculco Caldera y la Cuenca Sedimentaria del Norte de Chihuahua teniendo como resultados destacados el modelado 2D de perfiles térmicos entre pozos, la cual se tomó como base para el desarrollo de trabajo.

## **Justificación**

El presente trabajo pretende aumentar el alcance de una herramienta numérica que generar perfiles 2D de temperaturas de subsuelo, al desarrollar una versión mejorada y de uso práctico. Este software se desarrolló en el lenguaje Python dado que permite incluir interfaces amigables con el usuario, de esta manera se consiguió que no sea necesario el conocimiento de programación para su correcta utilización. Esto se realizó a través de la adaptación del código incluyendo interfaces que faciliten y/o expliquen su uso. Sumado a esto, se anexaron procesos de tipo visual, favoreciendo así el entendimiento de los perfiles. Teniendo como resultado un mayor alcance de la herramienta numérica para su aplicación en toda la industria geotérmica.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Desarrollar un software que favorezca el entendimiento y facilite el uso de la herramienta numérica para el cálculo de perfiles de temperatura 2D en el subsuelo con el objetivo de maximizar su alcance, por medio de adaptación al lenguaje de programación Python.

### **Objetivos específicos**

Favorecer el entendimiento de los perfiles de temperatura calculados por medio de la incorporación de salidas de tipo visual.

Facilitar el uso del software por medio de la adaptación a un entorno amigable con el usuario y una manual de uso integrado. Sumado a la adaptación a una plataforma online que facilite el acceso a la misma.

Optimizar el código original al lenguaje de programación Python.

## **Hipótesis**

Al integrar en un software una herramienta numérica para el cálculo de perfiles de temperatura 2D en el subsuelo y su manual de uso, desarrollado en una interfase amigable con el usuario que priorice su entendimiento y practicidad de uso, permitirá aumentar el alcance de la herramienta numérica.

Al desarrollar un software que priorice su entendimiento y practicidad de uso, integrando una herramienta numérica para el cálculo de perfiles de temperatura 2D en el subsuelo y su manual de uso, tendrá como resultado aumentar el alcance de la herramienta numérica.

## CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO

### Generalidades de la geotermia

La palabra “geotermia” proviene de los vocablos griegos *geo* y *termos*, la cual se define como la energía o calor natural que proviene del interior de la Tierra (Santoyo y Barragán, 2012). Aun cuando esta energía se dispersa, existen regiones bien delimitadas de ella donde los flujos de energía se concentran en ciertos puntos y se presentan como zonas con valores anómalos, el aprovechamiento económico de este tipo de energía se basa en la detección y evaluación de las zonas anómalas a través del estudio científico del subsuelo.

La fuente principal del calor en el interior de la Tierra se origina en dos fuentes primarias: la energía calorífica atrapada desde la formación misma del planeta y la generada por el decaimiento de sustancias radiactivas presentes en su interior. La interacción de estas dos fuentes fundamentales da lugar al gradiente geotérmico, que se manifiesta claramente en el aumento gradual de la temperatura a medida que se profundiza.

La transferencia de energía entre las distintas capas que conforman la Tierra (litosfera, manto y núcleo) ocurre a través de tres mecanismos conocidos hasta el momento: radiación, conducción y convección. La diferencia fundamental entre cada uno de estos mecanismos radica en la forma en que se transporta la energía. En el caso de la transferencia radiactiva, el calor se propaga directamente por radiación. En la transferencia conductiva, la energía se transfiere de un sólido a otro debido a un gradiente térmico. Por último, la transferencia convectiva se produce a través de la participación de un fluido en movimiento, el cual transporta el calor desde una región de mayor temperatura a otra de menor temperatura. (Torres Rodríguez et al., 1993).

### Sistemas Geotérmicos

Por lo general, los sistemas geotérmicos se componen de una fuente de calor, fluidos de trabajo (como un acuífero termal y acuíferos de recarga) y una capa de roca sellante que permite la presurización del sistema y evita fugas excesivas de energía. En la mayoría de los campos geotérmicos, las altas temperaturas son causadas por la presencia de cuerpos intrusivos y estructuras relacionadas con actividad volcánica reciente, que son las fuentes de calor más comunes. Por lo tanto, en áreas geotérmicas es común encontrar altas temperaturas a poca profundidad. Estas condiciones son resultado de:

- La intrusión de roca fundida o magma desde grandes profundidades hacia niveles altos de la corteza terrestre. Aunque no se puede observar directamente un intrusivo, su presencia se puede inferir a partir de manifestaciones superficiales relacionadas, como alineamientos circulares de volcanes, presencia de diques hipabisales, sistemas de fracturamiento atribuibles a efectos de empuje, abombamientos superficiales, entre otros.

- El flujo de calor superficial que es más alto que el promedio, con una tendencia a aumentar el gradiente de temperatura con la profundidad, lo que se conoce como gradientes geotérmicos anómalos. Estos gradientes se manifiestan en la superficie a través de zonas con anomalías térmicas (como suelos calientes y fuentes termales) y alteraciones hidrotermales (por ejemplo, zonas de silificación, propilitización, precipitación de carbonatos, entre otros). También se pueden observar cambios en la vegetación, como la pérdida de vegetación, modificaciones en su crecimiento y la presencia de especies resistentes.
- El ascenso de agua subterránea que ha estado circulando a profundidades de dos a cinco kilómetros, como ocurre en el caso de los géiseres.
- El calentamiento anómalo de rocas poco profundas debido al decaimiento de elementos radiactivos.
- La transferencia de calor mediante el movimiento de placas tectónicas, como ocurre en las fallas de transformación.

Para que los recursos geotérmicos tengan un desarrollo económico eficiente, es necesario que proporcionen grandes cantidades de calor a la superficie de la Tierra. El agua desempeña esta función de manera óptima, ya que presenta una alta capacidad calorífica y un alto calor latente de vaporización, lo que la convierte en un fluido ideal para la transferencia de calor. El agua se difunde a través de fracturas, poros y otros espacios dentro de la roca.

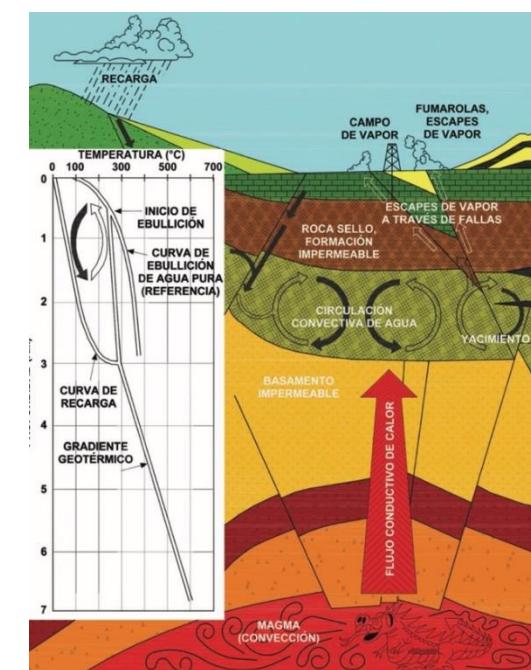


Ilustración 1: Sistema geotérmico (Santoyo y Barragán, 2012)

A medida que aumenta la temperatura, la densidad y viscosidad del agua disminuyen. Esto hace que el agua calentada en profundidad sea más ligera que el agua fría presente en las rocas circundantes, lo que resulta en fuerzas de empuje. Si el calentamiento es lo suficientemente intenso como para superar la resistencia del flujo de la roca, el agua caliente se elevará hacia la superficie terrestre, siendo reemplazada por agua más fría. En este proceso, se establece la convección natural alrededor del agua subterránea y cerca de la fuente de calor. La convección proporciona grandes cantidades de calor en el área de los pozos y es responsable de una categoría económicamente importante de recursos geotérmicos. En algunas fuentes hidrotermales, la temperatura nunca alcanza el punto de ebullición debido al flujo rápido de agua, y el sistema no genera vapor. Sin embargo, en otros sistemas, se produce una liberación de presión que hace que se alcancen puntos de ebullición locales, lo que resulta en la generación de vapor. Este vapor asciende y encuentra rocas más frías, donde parte de él se condensa, calentando la roca y disminuyendo la presión, lo que a su vez favorece la vaporización. (Santoyo y Barragán, 2012).

La clasificación de los sistemas geotérmicos se basa en la predominancia de un tipo de transferencia de calor, que es la transmisión de energía en forma de calor entre diferentes cuerpos o partes de un mismo cuerpo que se encuentran en niveles energéticos distintos (Rueda, 2009). El calor se transfiere a través de los procesos de convección, radiación y conducción, aunque estos tres mecanismos pueden ocurrir simultáneamente, uno de ellos suele ser predominante sobre los demás. La transferencia de calor por conducción requiere el contacto físico entre los cuerpos que intercambian calor. En la radiación, no es necesario que los cuerpos estén en contacto ni que haya materia entre ellos. Por otro lado, la convección se produce mediante el movimiento de un líquido o gas que está en contacto con un cuerpo de temperatura diferente. En el subsuelo más superficial, la conducción ocurre a través de minerales o fluidos presentes en los espacios de porosidad, mientras que la convección se lleva a cabo mediante aguas subterráneas. Estos dos mecanismos, la conducción y la convección, son los más importantes en el flujo de calor geotérmico.

### Sistemas geotérmicos de conducción

La conducción es el proceso por el cual el calor se difunde a través de un sólido, líquido o gas por procesos de interacción molecular, entre los sólidos la conducción es la única forma de transferencia de calor (Garcia, 2017).

Dentro de esta categoría de sistemas destacan:

- a) Los sistemas de roca seca caliente
- b) Los sistemas geo presurizados
- c) Los sistemas radiotécnicos.

## Sistemas geotérmicos Convectivos

Al existir una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o gas causa que se producirá un movimiento del fluido el cual transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección, dicho movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si el líquido o gas se encuentra en un campo gravitatorio el fluido más caliente y menos denso asciende mientras que el fluido más frío y denso desciende, a este tipo de movimiento se denomina convección natural. Básicamente este tipo de sistemas hidrotermales está asociado con ambientes de alta porosidad y permeabilidad.

La fuente de calor es representada por intrusiones magmáticas, dichas intrusiones se presentan principalmente en ambientes geológicos específicos tales como; crestas oceánicas (zonas de expansión), márgenes convergentes (zonas de subducción), "continental rift" y anomalías térmicas dentro de las placas. Asimismo, estos sistemas están caracterizados por la circulación natural de un fluido de trabajo donde el calor es transportado por el mismo fluido (Garcia, 2017).

Dentro de esta categoría de sistemas existen dos subdivisiones generalmente reconocidas:

- a) Sistemas de vapor-dominante
- b) Sistemas de líquido-dominante

## Clasificación de sistemas Geotérmicos

Se establecen las cuatro categorías siguientes para la energía geotérmica (Seisdedos S. 2012)

- Alta temperatura: Mas de 150°C: Una temperatura superior a 150°C permite transformar directamente el vapor de agua en energía eléctrica.
- Media temperatura: entre 90 y 150°C: permite producir energía eléctrica utilizando un flujo de intercambio, que es el que alimenta a las centrales.
- Baja temperatura: entre 30 y 90°C: Su contenido en calor es insuficiente para producir energía eléctrica, pero es adecuado para calefacción de edificios y en determinados procesos industriales y agrícolas.
- Muy baja temperatura: Menos de 30°C: Puede ser utilizada para calefacción y climatización, necesitando emplear bombas de calor.

## Energía en México

El sistema energético mexicano se basa fundamentalmente en los hidrocarburos como podemos ver en los datos donde representaron el 85.41% de toda la generación nacional para el año 2020, por su parte el porcentaje de participación de las energías limpias alcanzó 29.50% para el mismo año (SENER, 2021).

El crecimiento de la generación y capacidad de las energías limpias es una de las prioridades establecidas por México en la Ley de Transición Energética, como podemos ver el incremento de la generación de energías limpias respecto con el año previo el cual fue del 25.64% (SENER, 2021).

## Energía geotérmica en México

Para 2021 (SENER, 2022) la generación de energías limpias fue del 28.6% del consumo nacional, destacando que la energía geotérmica aporta el 1.3% a través de la explotación de cuatro campos geotérmicos:

- a) Cerro Prieto, Baja California
- b) Los Azufres, Michoacán
- c) Los Humeros, Puebla
- d) Las Tres Vírgenes, Baja California
- e) Domo San Pedro, Nayarit

### Campos de producción de energía geotérmica

En México se cuenta con experiencia en la formación de recursos humanos y tecnología para el desarrollo y aprovechamiento de bienes geotérmicos que permiten generar energía eléctrica, donde hace falta mayor avance y aplicaciones es en los usos directos.



Ilustración 2: Campos geotérmicos en México (CFE, 2022).

Actualmente se encuentran bajo explotación comercial cinco campos geotérmicos que generó en 2018 aproximadamente 5,375.00 GWh, cuatro centrales están a cargo de la CFE y la quinta con nombre Domo de San Pedro en el municipio de San Pedro Lagunillas, Nayarit, corresponde al Grupo Dragón de origen privado.

Datos proporcionados por CFE, detallan que Cerro Prieto es el campo más grande y antiguo dado que su operación inició en 1973, el cual está dividido en cuatro zonas de explotación y se ubica en el estado de Baja California (Ilustración 2). Tiene 443 pozos de los cuales 152 son productores y 22 inyectores, su capacidad instalada mediante nueve unidades es de 570 MW con las cuales en 2018 generó 3251.21 GWh/yr, generación que representa cerca del 40 por ciento de la demanda del sistema eléctrico de Baja California. El sistema geotérmico de Cerro Prieto es un campo líquido dominante, donde los pozos producen una mezcla de fluidos en condiciones superficiales con aproximadamente 60% de agua y 40% de vapor.

El segundo campo geotérmico más grande se localiza en la parte central del país y se llama Los Azufres el cual se encuentra dentro de la provincia del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (Ilustración 2) a una altura promedio de 2,850 msnm y cuenta con 15 unidades de generación con una capacidad instalada en diciembre de 2019 de 270.5 MWe. El campo se encuentra en una compleja sucesión plio-pleistocena de basaltos, andesitas, dacitas y riolitas que representan tres ciclos volcánicos probables, la fuente de calor parece ser la cámara de magma que alimenta el volcán San Andrés el cual es el pico más alto de la zona.

Los Humeros es el tercer campo geotérmico más importante de México el cual se sitúa en la porción oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano en Puebla de Zaragoza (Ilustración 2), a una altitud media de 2,800 msnm; los trabajos de exploración de la CFE comenzaron en 1978 pero fue en 1990 cuando se puso en marcha la primera unidad generadora de 5 MWe, cuenta con una capacidad instalada de 119.8 MWe compuesta por las 11 unidades de potencia las cuales en 2018 generaron 501.46 GWh/yr. El campo de Los Humeros se ha desarrollado dentro de la caldera volcánica de Los Potreros la cual tiene de 5 a 8 km de diámetro que a su vez está anidada dentro de la caldera más antigua y grande de Los Humeros la cual es una estructura de caldera aproximadamente circular de 18 a 20 km de diámetro formada hace aproximadamente 165 ka cuando una erupción volcánica extruyó alrededor de 155 km<sup>3</sup> de magma dando lugar a la ignimbrita xaltipánica. De acuerdo con algunos modelos termo-barométricos la corriente y la fuente de calor podría ser una cámara de magma diferenciada la cual estaría estratificada en varias cámaras más pequeñas ubicadas a diferentes profundidades que probablemente comparten la misma fuente de alimentación ubicada en la corteza inferior.

El campo geotérmico de Las Tres Vírgenes es el más pequeño ubicado en el centro de la península de Baja California en el estado de Baja California Sur (Ilustración 2); el cual cuenta con solo dos unidades de potencia de 5 MWe de condensación y flash único que comenzaron a funcionar en 2002, en 2018 estas plantas generaron 47.55 GWh. El campo se encuentra dentro de un complejo volcánico cuaternario compuesto por tres volcanes alineados N-S, desarrollados en el límite occidental de una zona de deformación

relacionada con la apertura del Golfo de California, la fuente de calor del sistema está relacionada con la cámara magmática del volcán La Virgen el cual es el más joven y el más meridional del complejo volcánico.

Finalmente, el campo Domo de San Pedro siendo este el más reciente en operación en el país, el cual está ubicado en el centro de México en la porción occidental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (Ilustración 2), se caracteriza por ser hasta el momento el único campo operado privadamente en México. Su funcionamiento data del primer trimestre de 2015 cuando se instalaron y pusieron en funcionamiento dos plantas de contrapresión de 5 MWe por el operador Grupo Dragón para probar el comportamiento del campo y comenzar rápidamente la generación de energía comercial (IGA, 2015); en el último trimestre de 2016 se puso en marcha una nueva planta de condensación de 25 MWe y las unidades de contrapresión se mantuvieron como respaldo, la producción eléctrica total en 2018 en este campo se estimó en 126.6 GWh (Gutiérrez N., et al., 2020).

## Método Numérico

En esta sección se describirá a detalle el método numérico utilizado en la herramienta que reproduce la herramienta numérica presentada en 2021 por Espinoza-Ojeda et al., la cual se basa en el método TDMA.

### CFD aplicado a flujo de calor y trasferencia de calor.

La dinámica de fluidos computacionales o CFD (del inglés “*Computational Fluid Dynamics*”) es la simulación computacional de sistemas como flujo de calor, trasferencia de calor, flujo de fluidos y fenómenos asociados como reacciones químicas; esta técnica es muy útil dado las posibilidades en áreas industriales y no industriales dado que en el pasado casi la totalidad de los experimentos se realizaban en los laboratorios con equipos especializados según el área de estudio, conforme el poder computacional ha avanzado nos brinda la posibilidad de realizar los mismos experimentos en computadoras sin perder precisión ni exactitud. Sumado a los increíbles avances tecnológicos en la rama de la computación cada vez es mucho más económico realizar simulaciones computacionales.

Las pruebas de CFD hoy en día sustituyen muchos procesos que con anterioridad se realizaban en laboratorios, no obstante la complejidad de éstas recae en el entendimiento físico o químico del sistema a simular dado que los resultados obtenidos serán tan complejos y precisos como el sistema planteado, considerando siempre los límites al conservar las leyes de movimiento de fluido y trasferencia de calor como principios básicos de conservación de la masa, momento y energía, teniendo entonces los siguientes principios matemáticos:

- La masa de un fluido se conserva;
- La tasa de cambio del momento es igual a la suma de las fuerzas en la partícula en movimiento (Segunda ley de Newton), y
- La tasa de cambio de la energía es igual a la suma de la tasa de adición de calor y la tasa de trabajo realizado en una particular en movimiento.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se desarrollan las ecuaciones para los sistemas que se deseen simular, como resultado tenemos sistemas de ecuaciones algebraicos lineales que necesitan ser resueltos, la complejidad y tamaño de estos sistemas de ecuaciones varía para cada caso, no obstante, estos sistemas pueden ser resueltos por cualquier método numérico siempre considerando que existirán limitaciones con relación al poder computacional que necesitará cada método numérico. Estos sistemas de ecuaciones algebraicos lineales pueden ser resueltos comúnmente por métodos directos e indirectos. Eliminación Gaussiana es un ejemplo de método directo.

Los métodos indirectos se basan en la repetición de algoritmos relativamente sencillos para eventualmente encontrar la solución al sistema, estas repeticiones suelen ser de una cantidad muy grande de iteraciones, pero al ser algoritmos sencillos puede hacer una iteración sin tardar demasiado, aun cuando se trate de un número muy grande de iteraciones suelen ser muy eficientes en cuestión de tiempo. Algunos ejemplos son los métodos iterativos de Jacobi y Gauss-Siedel punto por punto, ambos son fáciles de implementar en lenguajes de programación, pero son lentos cuando se trata de sistema de ecuaciones largos. Por tal motivo, en 1949 se desarrolló la técnica TDMA nombrada de esta manera dado que al aplicarse el método de Volumen Finito para sistema estacionario de una dimensión tenemos como resultado un sistema Tri-diagonal con solo tres coeficientes no-cero por ecuación. Véase a continuación un ejemplo basado en la solución presentada en libro Versteeg y Malalasekera en 1995, donde se encuentra el desarrollo de un ejemplo para un sistema estacionario utilizando el método de volumen finito en una dimensión involucrando la transferencia de calor conductiva teniendo como ecuación de partida:

$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) + S = 0 \quad (1)$$

Donde  $k$  es la conductividad térmica,  $T$  es la temperatura (variable dependiente) y  $S$  la fuente de calor. Teniendo como resultado de dicho ejemplo la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} 300 & -100 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ -100 & 200 & -100 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & -100 & 200 & -100 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & -100 & 200 & -100 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & -100 & 300 \end{bmatrix}$$

Matriz 1: Resultado del ejemplo presentado en el capítulo 4.3.1 (Versteeg y Malalasekera, 1995).

Como se puede observar en el resultado de la matriz 1 se ejemplifica el comportamiento que le da nombre a este método al verse la matriz con 3 diagonales no-cero, la diagonal central y las 2 aledañas a esta. Este ejemplo es en una dimensión aplicando el método de volumen finito, tratándose de un método directo en 1D. Aunque este método se puede aplicar iterativamente, línea por línea, para resolver sistemas multidimensionales. Lo mismo se aplica para un caso de dos dimensiones para un sistema estacionario partiendo de la siguiente ecuación:

$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left( k \frac{dT}{dy} \right) + S = 0 \quad (2)$$

Con este segundo ejemplo se sientan las bases para la aplicación del método TDMA en sistemas de trasferencia de calor en dos dimensiones, señalando que este método tiene la ventaja de que es barato y utiliza poco almacenamiento, por lo cual es ampliamente utilizado en simulaciones de CFD.

### Método TDMA

El nombre de TDMA se refiere al efecto de escribir los coeficientes de las ecuaciones en una matriz tridiagonal ejemplificados en las Matrices 1 y 2.

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

Matriz 2: Matriz de sustitución correspondiente a la ecuación general del TDMA (Calderon, 2018).

Donde:

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

De esta matriz se puede obtener su forma general teniendo como resultado:

$$a_i x_{i-1} + b_i x_i + c_i x_{i+1} = d_i \quad (3)$$

Donde, la temperatura  $x_i$  es relacionada con las temperaturas vecinas  $x_{i+1}$  y  $x_{i-1}$ , lo mismo sucederá con la variable  $i$ , para calcular los valores en el eje de las ordenadas, entonces en este caso sustituimos  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  y de igual manera los resultados de temperatura se relacionan con los puntos vecinos, como sucede en el eje de las abscisas (Calderon, 2018). En la Ilustración 3 se puede observar un ejemplo de interacción de cada celda con sus celdas vecinas, donde la celda destacada de color amarillo representa la celda  $(i, j)$ , y en la Ilustración 4 podemos observar un desglose más detallado de cómo se forma el volumen de control.

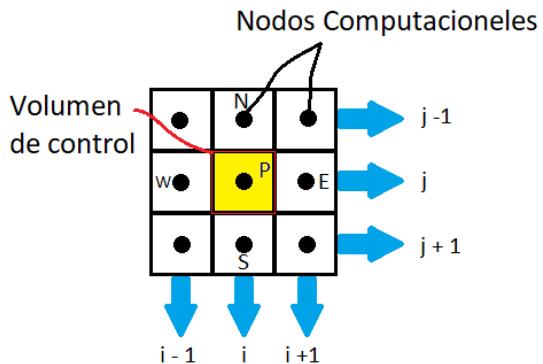


Ilustración 3: Ejemplo de interacción de cada celda con sus celdas vecinas.

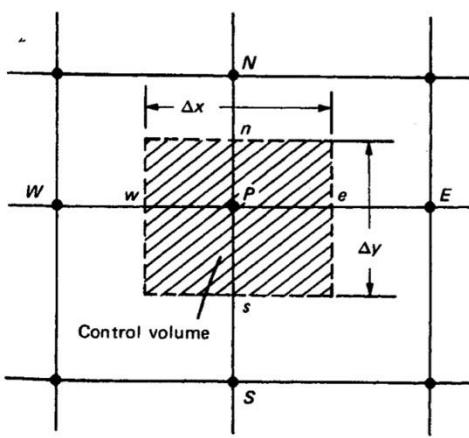


Ilustración 4: Ejemplo de Volumen de control en un sistema 2D (Suhas V., 1980).

Discretizando la ecuación 1 de flujo de calor obtenemos la ecuación para una dimensión:

$$a_p \varphi_p = a_w \varphi_w + a_e \varphi_e + d \quad (4)$$

En el trabajo de Versteeg y Malalasekera (1995) se aplica este método 2D, donde tenemos la discretización de la ecuación 3 en un sistema 2D:

$$a_p \varphi_p = a_w \varphi_w + a_e \varphi_e + a_s \varphi_s + n \varphi_n + b \quad (5)$$

Donde:

$$a_e = \frac{k_e \Delta y}{(\delta x)_e} \quad (5.a)$$

$$a_w = \frac{k_w \Delta y}{(\delta x)_w} \quad (5.b)$$

$$a_n = \frac{k_n \Delta x}{(\delta y)_n} \quad (5.c)$$

$$a_s = \frac{k_s \Delta x}{(\delta y)_s} \quad (5.d)$$

$$a_p = a_e + a_w + a_n + a_s \quad (5.e)$$

Donde  $\delta x$  que se exemplifica en la Ilustración 5 refiere a la distancia entre los centros del volumen de control o nodos computacionales.

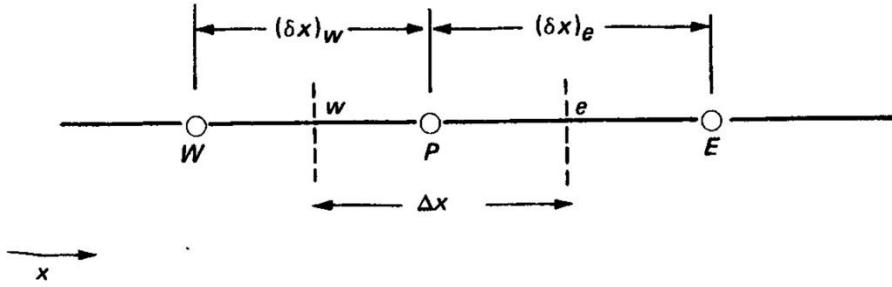


Ilustración 5: Ejemplo de volumen de control en un sistema 1D (Suhas, 1980).

Al tratarse de un modelo idealizado los volúmenes de control son un malla perfecto donde cada volumen de control tiene un volumen unitario, por lo tanto  $\Delta y$  y  $\Delta x$  son iguales que  $\delta x$  y  $\delta y$ , teniendo que en las ecuaciones 5.a-d quedan directamente relacionadas con la conductividad térmica  $k$ , siendo entonces  $a_e = k_e$ ,  $a_w = k_w$ ,  $a_n = k_n$  y  $a_s = k_s$ .

Para resolver el sistema de ecuaciones por el método TDMA se debe de escoger una dirección ya sea vertical u horizontal para hacer la iteración línea por línea, por ejemplo, Sur-Norte (S-N), se discretiza de la siguiente manera:

$$-a_s \phi_s - a_n \phi_n + a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_e \phi_e + b \quad (6)$$

La parte derecha de la ecuación temporalmente se asume como conocida siendo  $a_w \phi_w + a_e \phi_e + b = D_j$  teniendo entonces la ecuación con la forma de la ecuación 3 donde  $x = \phi$  y los coeficientes  $a_s$ ,  $a_p$  y  $a_n$  fueron detallados con anterioridad y son interpretados como  $a$ ,  $b$ ,  $c$  respectivamente, teniendo como resultado:

$$-a\phi_{j-1} + b\phi_j - c\phi_{j+1} = D_j \quad (7)$$

El método TDMA está basado sobre la eliminación Gaussiana y consiste en dos partes, seguidas de una fase de eliminación y regresando a la fase de sustitución, partiendo de un despeje de la ecuación 7 a la variable a calcular, en este caso la temperatura de la celda en cuestión  $\phi_j$  teniendo como resultado la siguiente ecuación:

$$\phi_2 = \frac{c_2}{b_2} \phi_3 + \frac{a_2}{b_2} \phi_1 + \frac{D_2}{b_2} \quad (8.a)$$

$$\phi_3 = \frac{c_3}{b_3} \phi_4 + \frac{a_3}{b_3} \phi_2 + \frac{D_3}{b_3} \quad (8.b)$$

$$\phi_4 = \frac{c_4}{b_4} \phi_5 + \frac{a_4}{b_4} \phi_3 + \frac{D_4}{b_4} \quad (8.c)$$

⋮

$$\emptyset_n = \frac{c_n}{b_n} \emptyset_{n+1} + \frac{a_n}{b_n} \emptyset_{n-1} + \frac{D_n}{b_n}$$

En la ecuación 8.b sustituimos  $\emptyset_2$  con la ecuación 8.a teniendo como resultado:

$$\emptyset_3 = \left( \frac{c_3}{b_3 - a_3 \frac{c_2}{b_2}} \right) \emptyset_4 + \left( \frac{\frac{a_3}{b_2} \emptyset_1 + \frac{D_2}{b_2} + D_3}{b_3 - a_3 \frac{c_2}{b_2}} \right) \quad (9)$$

Si consideramos la notación siguiente:

$$A_2 = \frac{c_2}{b_2} \quad \text{y} \quad C'_2 = \frac{a_2}{b_2} \emptyset_1 + \frac{D_2}{b_2}$$

Sustituyendo en la ecuación 9

$$\emptyset_3 = \left( \frac{c_3}{b_3 - a_3 A_2} \right) \emptyset_4 + \left( \frac{\frac{a_3}{b_2} C'_2 + D_3}{b_3 - a_3 A_2} \right) \quad (10)$$

Decimos que:

$$A_3 = \left( \frac{c_3}{b_3 - a_3 A_2} \right) \quad \text{y} \quad C'_3 = \left( \frac{\frac{a_3}{b_2} C'_2 + D_3}{b_3 - a_3 A_2} \right)$$

La ecuación 9 puede ser reescrita como:

$$\emptyset_3 = A_3 \emptyset_4 + C'_3 \quad (10)$$

Regresando a la fase de sustitución se deduce que:

$$\emptyset_j = A_j \emptyset_{j+1} + C'_j$$

Donde:

$$A_j = \left( \frac{c_j}{b_j - a_j A_{j-1}} \right) \quad \text{y} \quad C'_j = \left( \frac{\frac{a_j}{b_{j-1}} C'_{j-1} + D_j}{b_j - a_j A_{j-1}} \right)$$

Como se puede ver 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 resuelta por el algoritmo TDMA en el orden de  $j = 1, 2, 3, \dots, m$  que consiste en una simplificación de la forma de eliminación Gaussiana y después resolviendo por sistema de tres ecuaciones con tres diagonales, posteriormente se puede pasar a la siguiente línea S-N. Con fines ilustrativos sigamos este ejemplo, se aplicó el método y se decidió que el computo sea S-N por lo tanto el dato S o  $j - 1$  respecto del punto "P" es el dato conocido del cálculo de la línea anterior (Ilustración 7). Por el contrario, el dato Norte o  $j + 1$  permanecerá como el dato desconocido, por lo tanto, para poder encontrar la solución el proceso deberá de ser iterativo. En cada ciclo de iteración los valores desconocidos, en este caso los datos Norte respecto de P, serán los obtenidos en el ciclo pasado de iteración o un valor inicial dado para la primera iteración, teniendo de esta manera que iterar hasta que se obtenga la solución.

## CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se describirán las herramientas numéricas más representativas desarrolladas para la industria geotérmica a nivel mundial.

La evaluación de modelados numéricos 3D se investiga desde hace muchos años. Una de estas investigaciones se presentó en 2009 por Gibson et al., trabajo donde desarrollan una revisión del modelado de flujo de calor en un software llamado GeoModeller incluidas las simplificaciones, suposiciones y condiciones de contorno empleadas. Logrando obtener resultados destacables en el modelado térmico 3D, flujo de calor y gradiente térmico con geología sintética. En el mismo año, Beardmore publicó su trabajo donde trata sobre el modelado en la exploración geotérmica llegando a la conclusión que el modelado es una herramienta vital y valiosa para darle sentido a los datos inherentes a un estudio geotérmico. Señalando que el modelado térmico permite establecer temperaturas probables para la perforación e incluso puede ayudar estimar producción de las zonas exploradas.

En 2015, Wong et al. publicaron una herramienta ejecutable en cualquier dispositivo con acceso a internet, aplicado a sistemas geotérmicos, el cual tenía como objetivo estimar la temperatura estática de formación por medio de la aplicación del Método Poligonal Racional (RPM); los resultados se compararon con las mediciones de temperatura de fondo de pozo. En 2017, Wong et al. presentaron una herramienta numérica aplicada en sistemas geotérmicos llamado WELLTHER-SIM la cual tenía como objetivo el modelado de la circulación del fluido de perforación para la determinación de las difusividades térmicas de las rocas, la cual se logró aplicando la técnica de volumen finito para resolver las ecuaciones de conducción de calor usando como datos iniciales la temperatura inicial del fluido de perforación y la temperatura estática de la formación, los avances más relevantes de este trabajo son que esta herramienta fue aplicada con éxito en pozos geotérmicos en Japón y México.

En 2018 se presentó un modelado numérico por Jansen et al., aplicado en sistemas geotérmicos hidrotermales, el cual tenía como objetivo hacer más eficiente el modelado de sistema de fracturas presentes en el subsuelo y determinar de manera más representativa el flujo de calor en campos geotérmicos; lográndolo a través de la implementación y validación de una paquetería en el software comercial MATLAB. Los alcances más representativos de este trabajo fueron que obtuvieron nuevos conocimientos sobre los complejos procesos de la interacción fluido-roca acoplados en dominios fracturados en el subsuelo.

En 2020, Carrillo et al. publicaron un trabajo en el cual exponen una alternativa de estimación de temperatura en profundidad utilizando el Punto de Curie en caso de que las mediciones de temperatura de pozo no estén disponibles; dicho objetivo se desarrolló en una interfaz amigable con el usuario a través del software comercial MATLAB, el cual se desarrolló usando el método de magnetización fractal para posteriormente validarse con datos Aero magnéticos de Texas, comparación que nos muestra que no existe una diferencia significativa con los datos medidos.

## CAPÍTULO 3 ANTECEDENTES Y METODOLOGIA

### Antecedentes

#### Elaboración de perfiles de temperatura 2D

La evaluación de las propiedades físicas de las rocas en un campo geotérmico es fundamental para la posible explotación, en específico poder elaborar un perfil de temperatura de un campo geotérmico nos permitiría identificar los puntos calientes de la zona más somera para su explotación, por lo cual la precisión y eficiencia que tengan estas herramientas es de vital importancia. Trabajos como el publicado en 2014 por Majorowicz et al., donde desarrollaron un modelado de la temperatura en el Norte de Alberta, Canada, con la cual se estimaron temperaturas entre un rango de 3-6 km de profundidad, destacando que se encontró el punto caliente mas grande a estas profundidades. En 2020 Guerrero et al., aplicó un modelo 3D en el régimen de temperatura del campo en el complejo de la Caldera de Acoculco, Puebla. A su vez se estudió la relación entre las mediciones del flujo de calor y las estimaciones de la isoterma de Curie, esto se logró por medio de las conductividades térmicas de la litología presentes, y fue desarrollado por medio del esquema numérico de volúmenes finitos, el cual se desarrolló en el lenguaje de programación Fortran 90; para posteriormente calibrarse con mediciones de temperatura de campo. Trabajo con el cual se logró tener representaciones más precisas del régimen térmico de la Caldera de Acoculco, sumado a que el modelo numérico puede ser un instrumento para la evaluación del flujo de calor a través de la estimación de la isoterma de Curie en otras áreas de estudio.

#### Modelo térmico 2D

En el año 2021 se presentó un artículo por Espinoza-Ojeda et al., en el cual exponen una herramienta numérica para el cálculo de perfiles de temperatura 2D cuyo objetivo fue describir el perfil de temperatura del subsuelo. Esto permitió establecer las áreas con altas temperaturas o flujo de calor en el subsuelo en el campo geotérmico la Primavera Caldera, Jalisco, México. Esta herramienta numérica fue desarrollado en el lenguaje de programación Fortran 90, basado en las ecuaciones de transferencia de calor y aplicando el método TDMA para resolver éstas, teniendo como resultado de este trabajo un modelo térmico 2D para reconstruir perfiles de temperatura entre dos pozos. Desde el punto de vista estadístico, los perfiles de temperatura muestran una buena correlación entre los valores simulados y medidos. Modelo que puede servir para estimar la evolución de temperatura y el proceso de enfriamiento.

En 2022, Espinoza-Ojeda et al. aplicaron el mismo modelo en pozos de Acoculco Caldera, localizada al este del CVTM, caracterizada por la presencia de Rocas Secas Calientes (HDR); así como también se aplicó el modelo numérico en la Cuenca Sedimentaria del Norte de Chihuahua, en donde existen pozos petroleros, teniendo como resultados destacados de éste trabajo la aplicación del modelado térmico 2D para perfiles de temperatura en zonas con posible potencial geotérmico, obteniendo una buena correlación entre los valores medidos y los simulados a pesar de ser aplicada en zonas con características diferentes.

## Metodología

Para el desarrollo de este proyecto, se propuso un flujo de trabajo que facilitara el uso del software para el usuario, comenzando por la migración misma del código hasta la adaptación del software a un ambiente práctico para usuario y archivos de salida de tipo visual. En la siguiente Diagrama se establece el flujo de trabajo empleado.

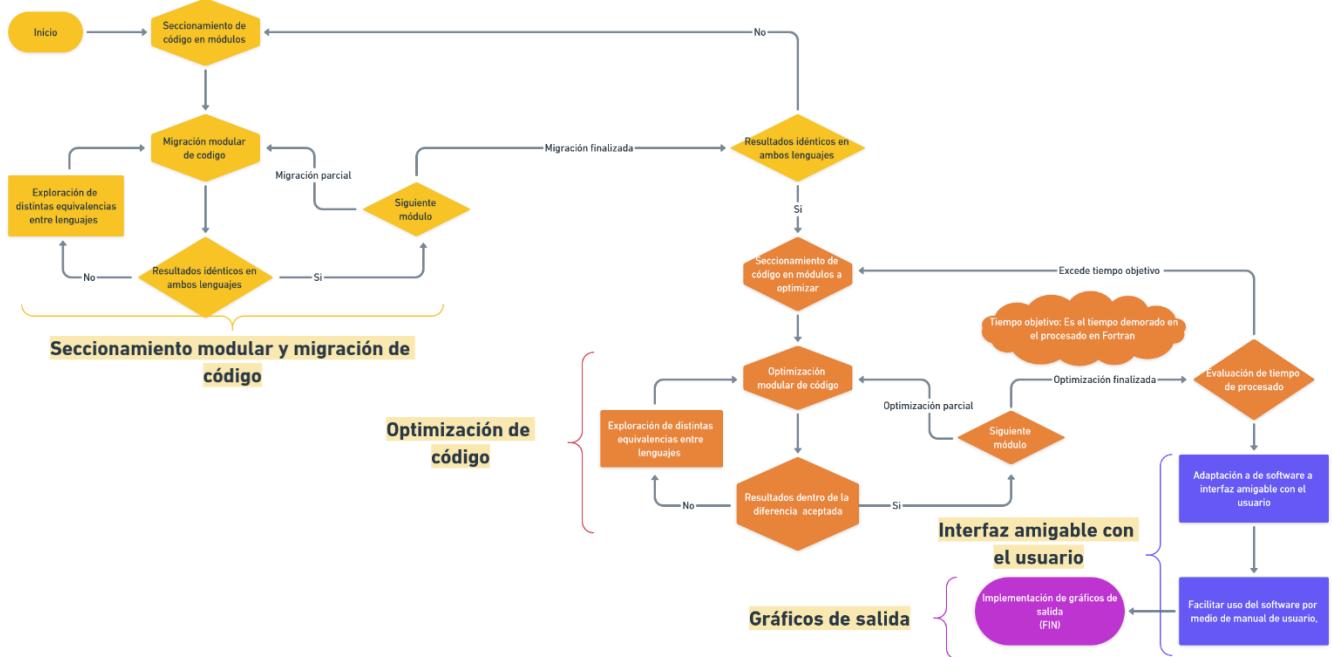


Diagrama 1: Flujo de trabajo utilizado.

### 4.2.1 Seccionamiento modular y migración de código

Como se mencionó con anterioridad, la herramienta numérica base fue desarrollada en el lenguaje de programación Fortran. Por tal motivo, se realizó la migración a Python para la cual se comenzó con el seccionamiento en módulos del código original, permitiendo de esta manera la migración paulatina del código, realizando la equivalencia, modulo por modulo, buscando resultados similares en ambos lenguajes, proceso que se repitió hasta concluir con la migración total y nuevamente ser evaluada en la totalidad del código (Diagrama 2)

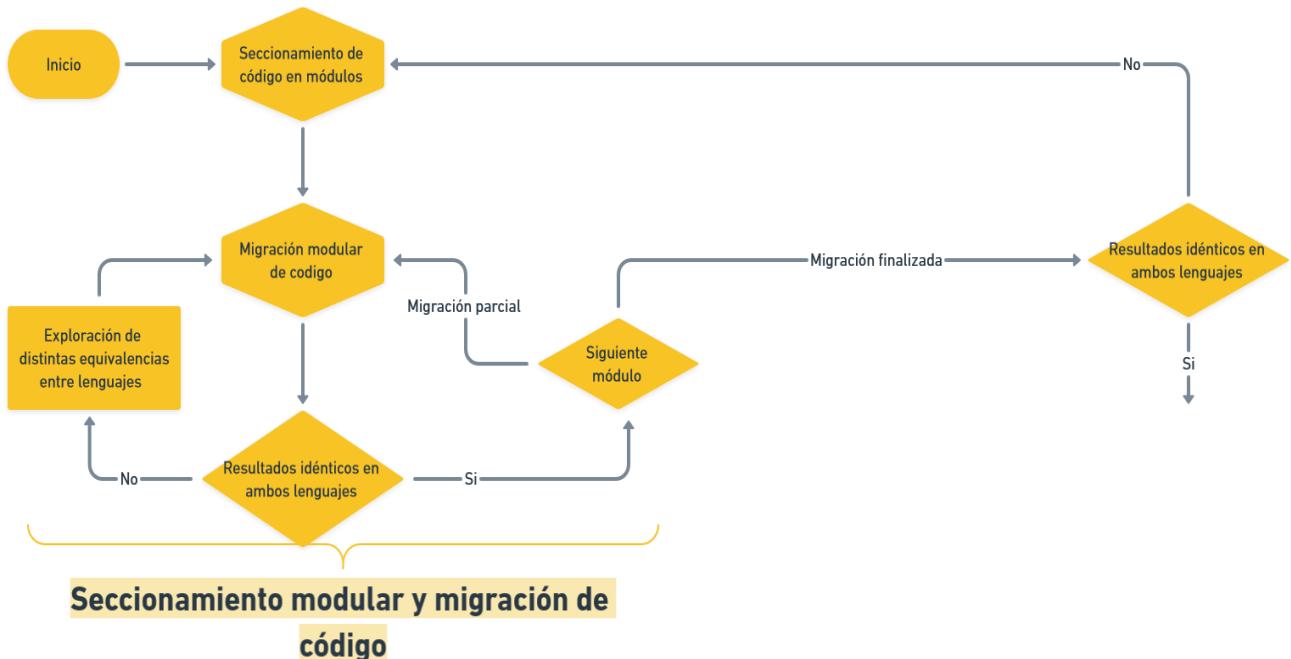


Diagrama 2: Flujo de trabajo de seccionamiento modular y migración de código.

### Comparativa de procesos Python Vs Fortran:

The image shows two side-by-side code snippets. The left snippet is in Python, showing nested loops to initialize a 2D array 'k'. The right snippet is in Fortran, showing nested loops to calculate conductivities for a well boundary.

```

Python (Left):
343
344
345
346
347 import numpy as np
348 k=np.ones((xlong,ylong))
349
350 for i in range(0,1750):
351     for j in range(0,210):
352         k[i,j]= ka
353
354 for i in range(0,1750):
355     for j in range(210,270):
356         k[i,j]=kb

Fortran (Right):
171 ! CONDUCTIVIDADES PARA POZO DE LA FRONTERA
172
173
174 do i = 1,1750
175     do j= 1,210
176         k(i,j)=ka
177     end do
178 enddo
179
180
181 do i = 1,1750
182     do j= 211,270
183         k(i,j)=kb
184     end do
185 enddo
186

```

Ilustración 6: Comparativa de ciclo “for” entre Python (Derecha) y Fortran (Izquierda).

The image shows two side-by-side code snippets. The left snippet is in Python, showing nested loops with an 'if' condition to update values in 'tnew' and 'tc'. The right snippet is in Fortran, showing nested loops with an 'if' condition to update values in 'deltatem' and 'xmaxdeltate'.

```

Python (Left):
1639
1640
1641 # **** Criterio de convergencia
1642
1643 for j in range(opimi+0,m):
1644     for i in range(0,n):
1645         deltatem[i,j] = abs(Tnew[i,j] - Tc[i,j])
1646
1647 xmaxdeltate = xmaxdeltate_
1648
1649 for j in range(opimi+0,m):
1650     for i in range(0,n):
1651         if deltatem[i,j] > xmaxdeltate:
1652             tc[i,j] = Tnew[i,j]
1653
1654 # ! write(*,*) 'xmaxdeltate', xMAXDELTATE
1655
1656
1657
1658
1659
1660
1661
1662
1663
1664
1665

Fortran (Right):
1404 ****
1405 ! Criterio de convergencia
1406
1407 do j=1,m
1408     do i=1, n
1409         deltatem(i,j) = abs(tnew(i,j) - Tc(i,j))
1410         write(*,*) 'deltatem',i,j,deltatem(i,j)
1411     enddo
1412 enddo
1413
1414 xmaxdeltate = 0.001
1415
1416 DO j=1,m
1417     do i=1, n
1418         if(deltatem(i,j) .gt. xmaxdeltate) then
1419             xmaxdeltate = DELTATEM(i,j)
1420         endif
1421     enddo
1422 ENDDO
1423
1424 ! write(*,*) 'xmaxdeltate', xMAXDELTATE
1425
1426
1427 IF(xMAXDELTATE .GT. 0.001) THEN
1428     do i=1,n
1429         do j=1,m
1430

```

Ilustración 7: Comparativa de ciclo “for” y “if” entre Python (Derecha) y Fortran (Izquierda).

```

1772 ### COMO VECTOR
1773
1774     vector_tnew=np.zeros((np.size(Tnew),3))
1775     columnas=0
1776     for i in range(0,600):
1777         for j in range(0,3500):
1778             vector_tnew[columna,0]=j+1
1779             vector_tnew[columna,1]=i+1
1780             vector_tnew[columna,2]=Tnew[j,i]
1781             columna+=1
1782
1783
1784
1785 np.savetxt(r'TNEW.txt', vector_tnew, fmt='%.7g')
1786
1787
1788
1789

```

```

1458
1459     DO j=1,m
1460        do i=1,n
1461           print *,i, j, tnew(i,j):',i,j,tnew(i,j)
1462           write (3,105) x(i), y(j), p(i,j)
1463        enddo
1464     ENDDO
1465
1466
1467     write(*,*)
1468
1469 !      105 format (i6,1x,i6,1x,f10.5,1x,f10.5)
1470
1471
1472
1473
1474
1475
1476
1477
1478
1479
1480
1481
1482
1483

```

Ilustración 8: Comparativa de guardado de variables en tipo “txt” entre Python (Derecha) y Fortran (Izquierda).

Una vez finalizada la migración se determinó que el tiempo de procesado en Python sería de aproximadamente 40 días, siendo este un tiempo muy alto al compararlo con las 6 horas que demora en Fortran (en idénticas condiciones computacionales). Esta diferencia se atribuye al lenguaje mismo, dado que Fortran es más eficiente en tiempos de procesado, motivo por el cual se comenzó con una optimización en Python, buscando reducir los tiempos de procesado, determinando como diferencia porcentual absoluta aceptada entre ambos lenguajes menor al 10%.

### Optimización de código.

La diferencia en el tiempo de procesado entre ambos lenguajes habitualmente es imperceptible, no obstante, esta diferencia es notoriamente mayor por la cantidad de operaciones que se realizan por iteración en el software. A continuación, se presenta un caso hipotético como ejemplo, con un mallado de 3,500 metros de separación entre pozos y 600 metros de profundidad, en el cual en cada iteración el código realizaría más de tres veces el producto de las dimensiones ( $3 * x * y$ ) siendo más de 6.3 millones de operaciones; en consecuencia, la diferencia en el tiempo de procesado entre ambos lenguajes es significativa. Una vez determinado el motivo de la demora, se desarrolló un nuevo procesado, el cual consiste en realizar un decremento de escala de 1:10 al mallado previo, significando que el procesado siguiente será idéntico al original matemáticamente hablando. Con este decremento en el tamaño de la malla, se consigue la reducción de las operaciones por iteración, resultando en un decremento exponencial del tiempo de procesado.

### Ejemplo cambio de escala

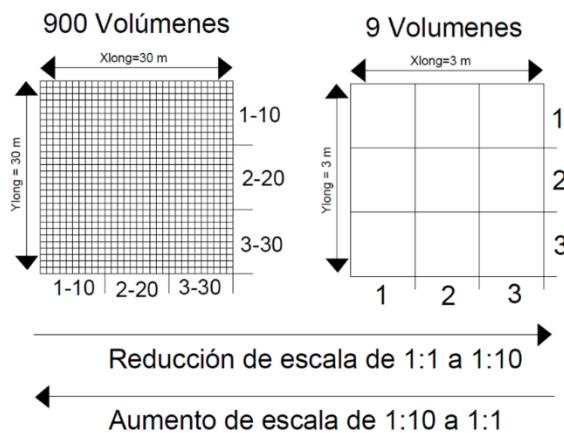


Ilustración 9: Ejemplo de cambio de escala, del lado izquierdo se muestran un cuadrante con 9 celdas a escala 1:10 que serían equivalentes a 900 a escala 1:1 representadas del lado derecho.

El objetivo de la reducción de escala en la malla es primordialmente acortar el tiempo de procesado necesario para llegar al resultado calculado en Fortran. En el ejemplo de la Ilustración 10 podemos apreciar el dato inicial (Ilustración 10.A) y el dato posterior a un procesado con 20 iteraciones a escala 1:1 (Ilustración 10.B). De estas Ilustraciones podemos determinar que la estimación a escala reducida cumple la función de aproximar las celdas a el dato objetivo; suposición que se confirma al comparar con el resultado del procesado original sin el dato de partida mencionado en la Ilustración 11.a, con un punto de partida uniforme determinado por el usuario y el dato procesado con 20 iteraciones en la Ilustración 11.b.

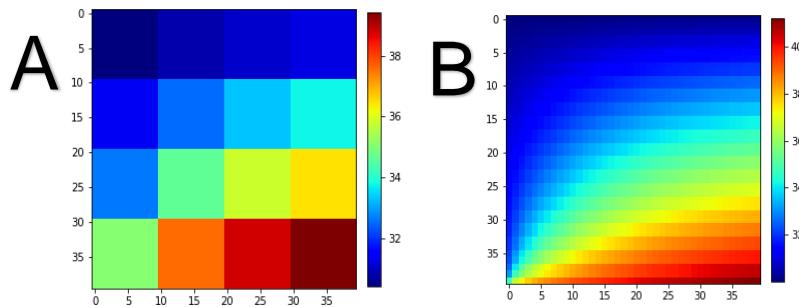


Ilustración 10: Comparativa del dato generado a escala 1:10 (A) y el dato procesado a 20 iteraciones a escala 1:1 (B).

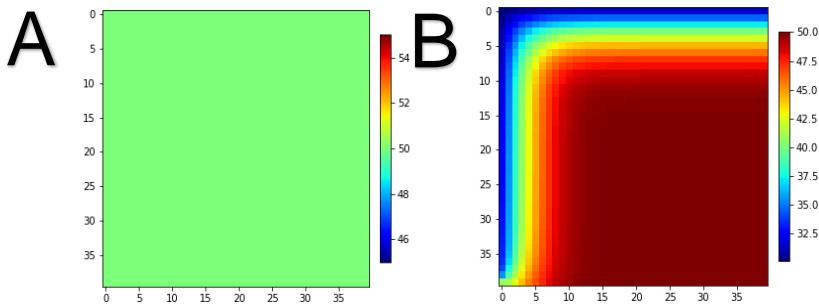


Ilustración 11: Procesado original, dato de entrada (A) y el cálculo a 20 iteraciones (B).

Una vez comprobado que el procesado a escala 1:10 reduce el tiempo de cómputo exitosamente; se analizó si este lo aproxima correctamente al dato objetivo, por tal motivo se comparó el dato procesado original a 10500 iteraciones (Ilustración 12.a) con el dato a 20 iteraciones con el procedimiento planteado (Ilustración 12.b). De esta comparativa se determinó que el dato tiene el comportamiento del dato objetivo, no obstante, es evidente la falta de resolución del dato con el nuevo procesamiento. En consecuencia, se adaptó el código a que iterara el mismo tiempo que tarda en completar el grado de convergencia en el procesado a escala 1:10, teniendo así asegurado una mayor resolución.

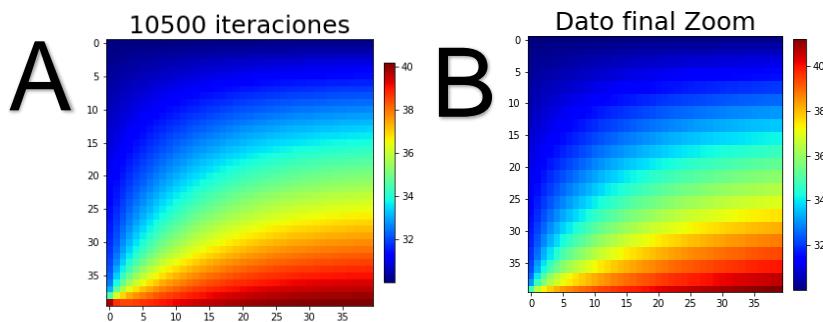


Ilustración 12: Dato procesado a 10500 iteraciones (A) y dato procesado a 20 iteraciones con procesado planteado (B).

### Validación de optimización

Posteriormente se realizó la validación del nuevo procesado en la cual se utilizaron datos de entrada idénticos en ambos lenguajes, usando los pozos MXPUB010 (Pozo W) y MXPUB011 (Pozo E), ambos en la zona norte del estado de Chihuahua. Se realizó una comparativa de la diferencia existente entre el dato procesado con Python contra el de Fortran, teniendo como resultados las Ilustraciones 13. La diferencia es representada en la Ilustración 14, donde podemos observar que se cuenta con 2 puntos máximos aledaños a ambos pozos, los cuales se analizaron a detalle en las Ilustración 15.a y 15.b, con un aumento en ambos puntos que se encuentran en las profundidades de 269 (Pozos W) y 510 (Pozo E), y una diferencia de 8.2°C y -10.2°C respectivamente, atribuyéndose estos a la reducción de escala dado que en ambos casos estas profundidades coinciden con mediciones de temperatura.

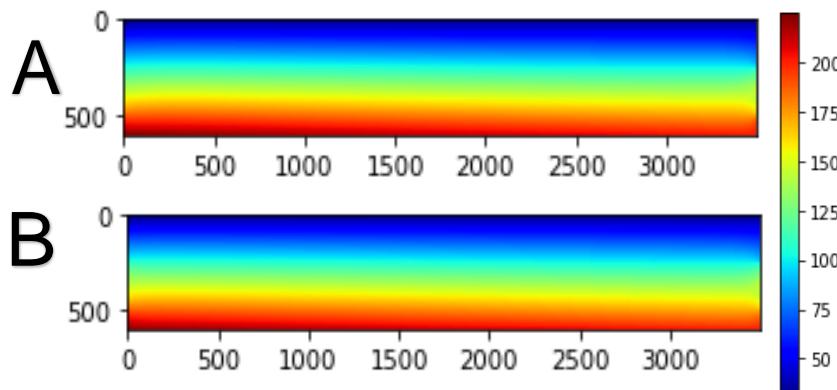


Ilustración 13: Resultado de ambos lenguajes; Fortran (A) y Python (B).

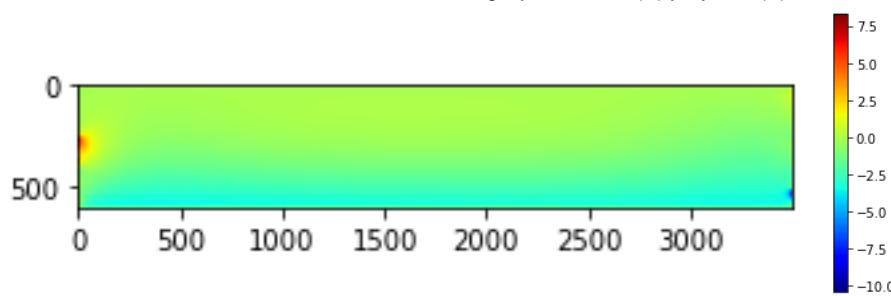


Ilustración 14: Diferencia entre ambos resultados.

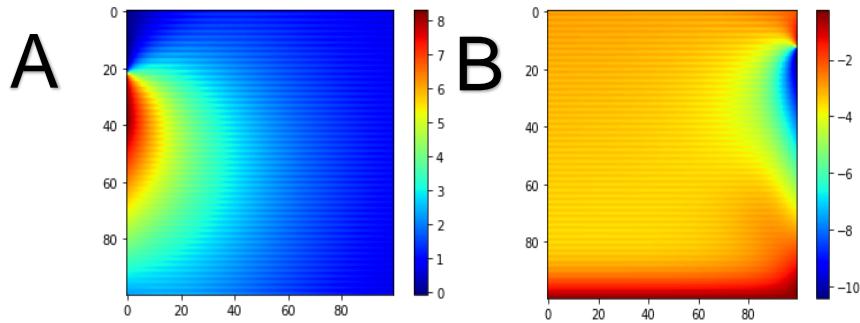


Ilustración 15: Comportamiento de diferencias máximas; A) Pozo W B) Pozo E.

Con lo analizado hasta el momento, se presenta en la Tabla 1, representando el comportamiento de la diferencia.

Tabla 1:  
Análisis de diferencia del software

	<i>Mallado completo</i>	
	Pozo W	Pozo E
<i>Profundidad de máxima diferencia</i>	269	516
<i>Diferencia máxima en °C</i>	8.3 °C	-10.349 °C
<i>Diferencia porcentual absoluta:</i>	6.86 %	5.77 %

De la Tabla 1 se observa que el software tiene una diferencia menor al 7%. Adicionalmente se decidió analizar el mallado sin considerar el rango de influencia de los puntos de diferencia máxima (se puede apreciar este rango de influencia en las Ilustraciones 15.a-b) causada por la reducción de escala; análisis que se representa en la Ilustración 16, donde se omitieron las 100 unidades aledañas a cada pozo, obteniendo una reducción drástica de la diferencia (ver Tabla 2).

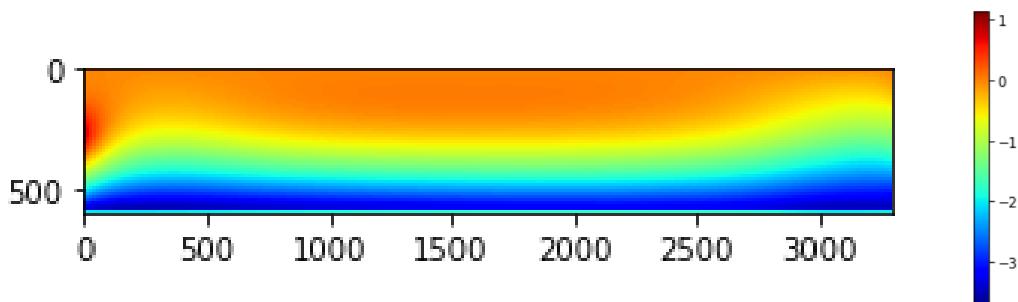


Ilustración 16: Comportamiento de la diferencia omitiendo 100 unidades aledañas a ambos pozos.

**Tabla 2:**  
**Análisis de la diferencia del software omitiendo 100 unidades aledañas a los pozos.**  
*Omitiendo 100 unidades aledañas a los pozos*

	Pozo W	Pozo E
<i>Profundidad de diferencia máxima</i>	580	576
<i>Diferencia máxima en °C:</i>	-3.59 °C	-3.654 °C
<i>Diferencia porcentual absoluta:</i>	1.64 %	1.89 %

### Interfaz amigable con el usuario

Entonces, para usuarios con poca o nula experiencia en programación, el software se adaptó a Jupyter Notebook online, posibilitando su acceso únicamente por internet sin ningún tipo de instalación, en la página de internet <https://jupyter.org/try-jupyter/lab/>. También se integró una guía de usuario para maximizar el entendimiento y uso de este (Ilustración 17).

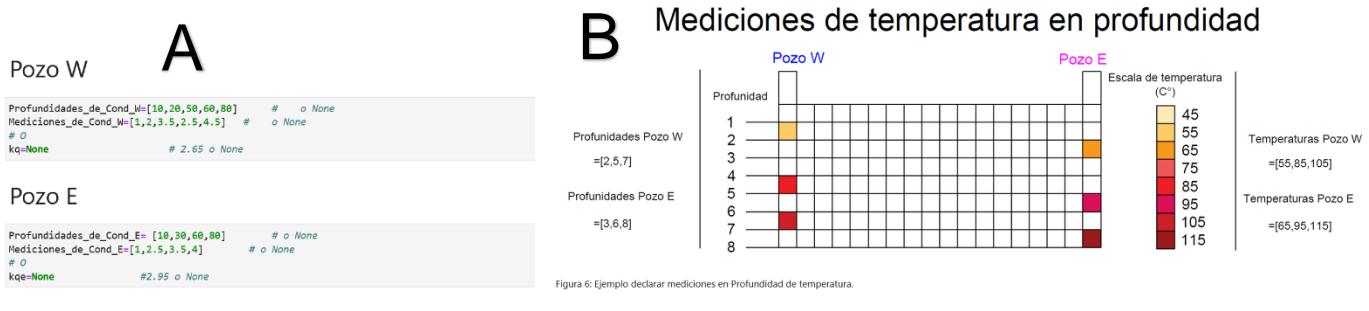


Ilustración17: Software (A) y guía de usuario (B) integradas en Jupyter Notebook Online.

Con el fin de facilitar y posibilitar al usuario el uso del software en la mayor cantidad de casos posibles, este se adaptó para brindar distintas posibilidades al declarar las variables necesarias para la ejecución:

- Mediciones de temperatura en profundidad
- Flujo de calor
- Gradiente geotérmico

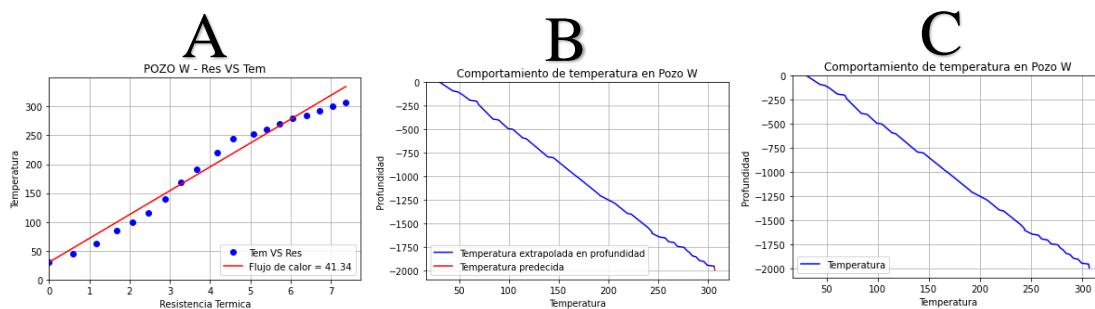
Permitiendo al usuario el uso de la herramienta con una menor cantidad de datos, ya sea en ambos pozos o solo en uno, dado que esta posibilidad se presenta de manera individual para cada pozo. En su contraparte, la conductividad térmica de ambos pozos se permite declarar al menos uno de los siguientes:

- Mediciones conductividades térmicas en profundidad
- Conductividad térmica promedio

Finalmente, es importante mencionar que el uso de Jupyter Notebook Online presenta la limitante de memoria, sin embargo, se adaptó el software para que evaluará el tamaño del mallado y reduzca la escala  $n$  cantidad de veces que sea necesaria para obtener un resultado en un tiempo lo mínimo posible, y finalizar en perfil de temperatura a la mayor escala que le sea posible. Teniendo mensajes de aviso para el usuario que permiten saber en qué escala fue arrojado el perfil de temperatura, siendo este proceso de manera automática.

## Gráficos de salida

Se buscó favorecer el entendimiento del perfil calculado y de las mediciones de temperatura en ambos pozos, motivo por el cual el software genera distintos gráficos durante el procesado con el objetivo de proyectar el perfil de temperatura en ambos pozos. Como ejemplo, en la Ilustración 18 se muestran los gráficos de cálculo de flujo de calor (18.A), comportamiento de temperatura en pozo extrapolada y precedida (18.B), y el comportamiento de temperatura (18.C) Siendo los 2 primeros casos circunstanciales para la predicción de temperatura en profundidad, considerando que la última medición de temperatura sea previa a la profundidad de exploración.



Una vez finalizado el procesado se generan dos archivos de salida, los cuales son guardados en la computadora del usuario; uno de ellos, el gráfico del perfil de temperatura (Ilustraciones presentadas en el siguiente capítulo como “Gráfico de salida de software”), y el segundo archivo será de tipo “txt”, en el cual se guardan los valores del perfil de temperatura calculado, distribuidos en el siguiente orden: número de fila, de columna, y valor de temperatura.

## Aplicación del software

Con el fin de evaluar el software desarrollado, se utilizaron datos de pozo de distintas zonas geotérmicas y petroleras; dentro de estas se hizo un análisis geológico y un perfil de temperatura basado en los datos de pozo. Las zonas con las que se aplicó el software fueron:

- Acoculco, Puebla, México.
- Norte de Chihuahua, México.
- Norte del Durango, México.

## *Acoculco, Puebla*

El software se aplicó en la zona geotérmica de Acoculco (Puebla), la cual se encuentra en el sector oriental del CVTM en el municipio de Chignahuapan, ubicado a 85 Km al NW de la ciudad de Puebla y a 65 km de la ciudad de Pachuca, Hidalgo.

### **Generalidades**

Las características de esta zona se presentan en el trabajo publicado en 2011 por Viggiano et al.; donde se menciona que la zona está constituida por rocas volcánicas terciarias y cuaternarias, incluyendo dos áreas de interés alteradas hidrotermalmente por fluidos de tipo ácido sulfatado. Las áreas son: Los Azufres-El Potrero Colorado y La Alcaparroza.

En el mismo trabajo realizaron una recopilación de información multidisciplinaria con fin de caracterizar el yacimiento, mismo que se atribuye a un sistema de roca seca caliente, llegando a esta conclusión basado en los siguientes puntos:

- Como fuente de calor lo señala como de tipo Vulcano-tectónico.
- Se indica un flujo de calor conductor el cual se atribuye a una roca caliente impermeable, de acuerdo a la información cuantitativa de perfiles de temperatura y mecanismos de trasferencia de calor natural principalmente del pozo EAC-1.
- Describe la presencia de fallas y fractura naturales en ambos pozos.
- Concluyeron que el basamento está conformado por rocas metamórficas como Hornfels y Skarn, basamento que se atribuye a la alteración causada en roca calcárea por un intrusivo granítico.

La aplicación del software se realizó en los pozos EAC-1 y EAC-2, Ilustración 19, los cuales se obtuvieron del informe preventivo de 2021 por CFE con nombre “Mantenimiento a los pozos existentes EAC-1 y EAC-2 localizados en el área geotérmica de Acoculco, Puebla”, donde también conocemos las coordenadas de dichos pozos (Tabla 3).



Ilustración 19: Localización de Pozos EAC-1 y EAC-2 (CFE, 2021).

Tabla 3:  
Coordenadas UTM de pozos EAC-1 y 2 en la zona 14 (CFE, 2021).

COORDENADAS UTM	
POZO EAC - 1	
X	589 709
Y	2 202 995
POZO EAC - 2	
X	590 200
Y	2 203 240

En el área de estudio se comenzó con la perforación del pozo EAC-1 en 1995, como resultado de este primer pozo se obtuvieron mediciones de temperatura muy atractivas en el rubro geotérmico, dado que se tenían mediciones de entre 250 – 300 °C a tan solo 1500 – 2000 metros de profundidad, no obstante presenta características termales muy peculiares, ya que carece de termalismo evidente como lo discuten Gutiérrez y Gonzalez en 2016; en su trabajo mencionan que la manifestación con mayor temperatura tiene apenas 49°C y se ubica a 18 Km de Los Azufres-El Potrero y La Alcaparroza. Los autores concluyen que la presencia de una fuente de calor es cercana a la zona, dado que existen zonas muy alteradas alrededor de los pozos antes mencionados, del tipo argílica, argílica avanzada, silicificación, la cual junto con el interperismo del lugar propicia las condiciones necesarias para dar lugar a las alteraciones expuestas en dicho trabajo. En 2009 López H. considero que la caldera de Acoculco aun esta activa, la casi nula descarga de fluidos calientes en superficie se atribuye a la existencia de una capa sello casi perfecta, suposición que sugirió en el trabajo desarrollado por Viggiano et al. (2011), en el cual desarrollaron el perfil litológico del pozo EAC-2.

### Litología de pozos EAC 1 y 2

La información litológica del pozo EAC-1 fue expuesta en 1995 por Torres et al., y del pozo EAC-2 en 2011 expuesta por Viggiano et al. (Ilustración 21); además de desarrollar la columna litológica del pozo EAC-2, el trabajo presenta una revisión de estudios previos de la zona donde abarca la investigación presentada en 2006 por Rocha et al., y se expone la petrografía del Pozo EAC-1. Basado en este trabajo y estudios geoquímicos, el autor intenta trazar una evolución del sistema geotérmico de la zona, lo cual concluye entre otras que:

*“Las condiciones térmicas y litológicas de los dos pozos perforados en el área (EAC-1 y EAC-2) son muy similares, salvo la enorme discrepancia litológica (por ejemplo, obsérvese la profundidad de la roca metamórfica: skarn en el EAC-1 y hornfels en el EAC-2) muy a pesar de su cercanía y de la inexistencia de desplazamiento vertical entre ambos. Para tal situación, convendría revisar las secciones delgadas del pozo EAC-1” – (Viggiano et al., 2011)*

En la recopilación e integración de datos de campo a detalle en la zona geotérmica de Acoculco en 2006 por Rocha et al., establecieron la presencia de cuatro sistemas estructurales en la zona de Los Azufres-Potrero Colorado y Alcaparrosa (Ilustración 22):

- Sistema NW-SE. Buzamientos tanto al NE (Falla Chignahuapan o Falla Acoculco) como al NW (Falla Alcaparrosa), constituyendo una estructura de tipo graben local, en cuyas fronteras conductoras emanan las manifestaciones termales de interés geotérmico con la presencia de manifestaciones termales ácidas alineadas.
- Sistema E-W. Se manifiesta como pares conjugados de fallas.
- Sistema N-S. De acuerdo con los datos de campo y con un análisis cuantitativo de densidad de estructuras con este rumbo, este sistema juega un papel importante en la conexión del termalismo de la zona de Los Azufres con la de Alcaparrosa. Presenta elementos cinemáticos de reactivación.
- Sistema NE-SW. Este sistema es consecuencia de la dirección de esfuerzos compresivos de la secuencia sedimentaria calcárea (calizas), pero afecta a los productos del CVTM.

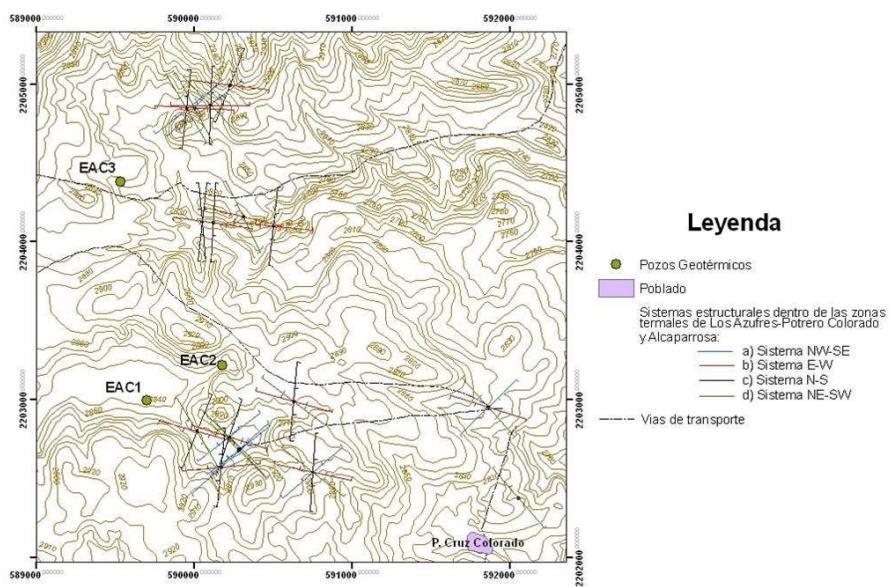


Ilustración 20: Estructuras locales en la zona geotérmica Acoculco, Puebla (Lorenzo et al., 2011).

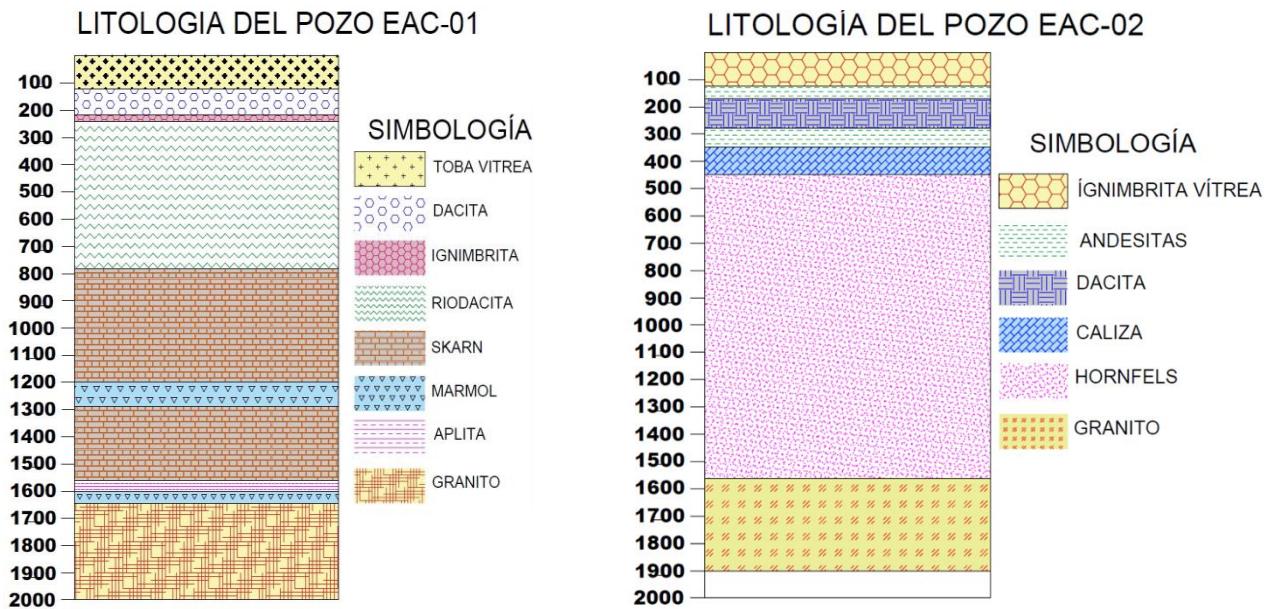


Ilustración 21: Columna estratigráfica pozo EAC 1 (Modificado de: Torres et al., 1995) y EAC-2 (Modificado de: Viggiano et al., 2011).

Con base a la información obtenida por los pozos EAC-1 y EAC-2, puede concluirse que el basamento del área está constituido por calizas que han sufrido un metamorfismo de contacto debido al emplazamiento de un intrusivo (granito de hornblenda) dando origen a rocas metamórficas calcáreas como lo son skarn y hornfels (Lorenzo et al., 2011).

### Temperatura de pozos exploratorios

Las temperaturas en profundidad son los datos de interés para el presente trabajo, para realizar el perfil de temperatura 2D, motivo por el cual desglosaremos la información con la cual se trabajó para ambos pozos, la cual fue recuperada del trabajo presentado en 2011 por Lorenzo et al..

#### EAC-1

Es un pozo vertical con una profundidad total final de 2,000 m y agujero descubierto 6" (pulgadas) de diámetro hasta 1512 m y de 5 $\frac{1}{8}$ " hasta 2,000 m. Después de terminado el pozo, se tomó una serie de registros de temperatura hasta 1,970 m de profundidad. En estos registros se observan zonas convectivas a 1,250 y 1,650 m (Ilustración 22). Así mismo, al dejar al pozo en calentamiento (registros T-14 y T-15) se observó un incremento en la línea de temperatura indicando flujo de calor conductivo, correspondiendo a una roca caliente impermeable.

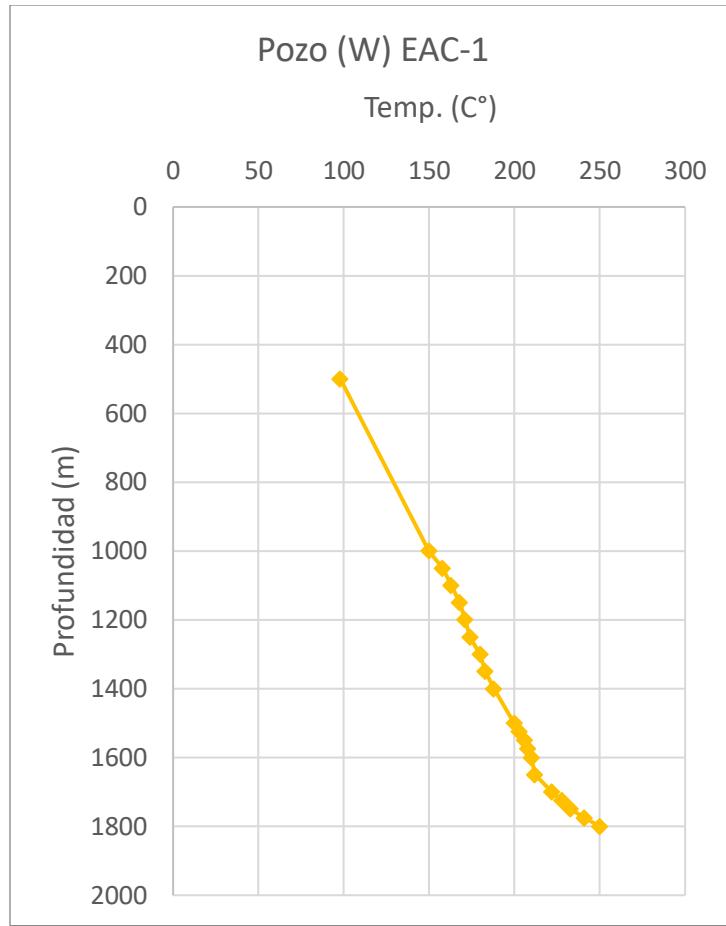


Ilustración 22: Registros de temperatura y zonas convectivas en el Pozo EAC-1 (Modificado de: Lorenzo et al., 2011).

Para este trabajo se utilizaron los datos de registros T-15 como aplicación 1, teniendo para este caso un último registro de temperatura mayor a 300°C. Y como aplicación 2, los registros de temperatura después de terminado el pozo (Registros de cable) teniendo el ultimo registro de temperatura mayor 240°C

Se realizaron estos ambos casos para tener un comparativo en las condiciones más similares de ambos pozos, siendo la aplicación 2, dado que ambos pozos cuentan con registros de temperatura de cable.

## EAC-2

El pozo exploratorio EAC-2 fue perforado en 2008 al N-E de las manifestaciones hidrotermales de la localidad de Los Azufres en la misma zona geotérmica. Es también un pozo vertical, con una profundidad total final de 1,900 m. Tiene tubería de revestimiento de 7" hasta 803 m y continua en agujero descubierto de 5 7/8" hasta 1,900 m. Después de su perforación, se tomó una serie de registros de temperatura hasta la profundidad de 1,900 m. En estos registros se observan zonas con cambio de pendiente a 1,550 y 1,850 m (Ilustración 23). Hasta la fecha no se han realizado registros de temperatura en fase de calentamiento, los cuales permitirían observar si el comportamiento de la temperatura es semejante al del pozo EAC-1 para la aplicación 1.

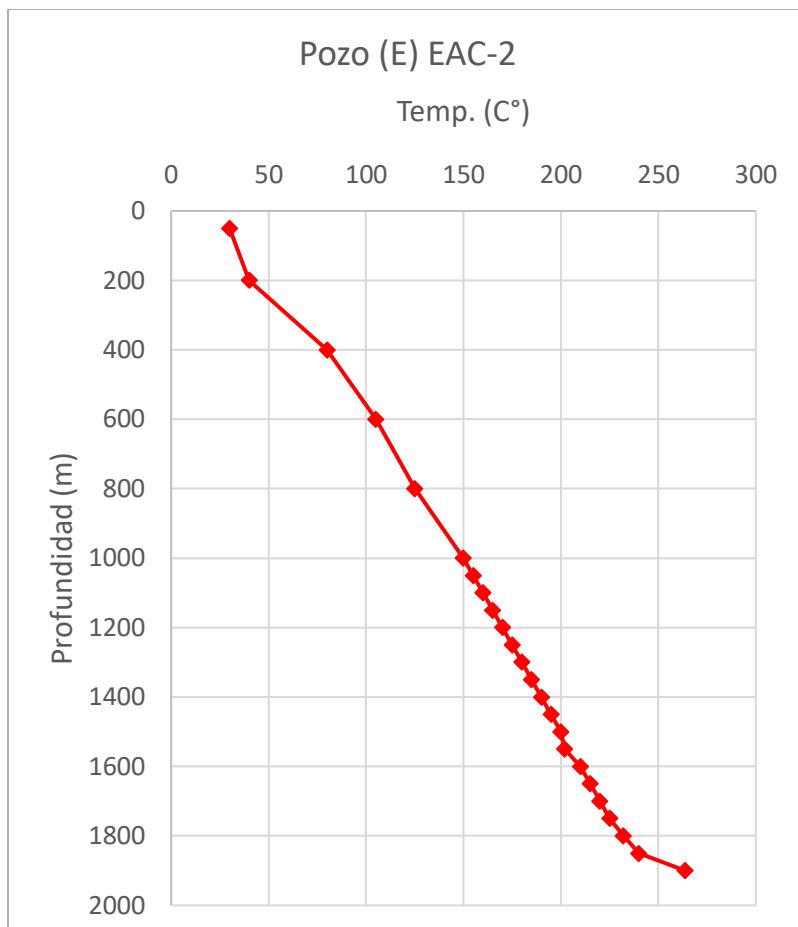


Ilustración 23: Registros de temperatura en el Pozo EAC-2 (Modificado de: Lorenzo et al., 2011).

#### Aplicación en la zona geotérmica de Acoculco, Puebla.

Se consideró la distribución geográfica presentada en la Ilustración 24 con la cual se determinó que los pozos EAC-1 y EAC-2 serían los pozos W y E respectivamente, considerando que la separación de estos pozos es de 550 metros. Se realizó una distribución de conductividades basado en la litología presente en el pozo, como puede apreciarse dicha distribución en las Tablas 4 y 5 para cada pozo.

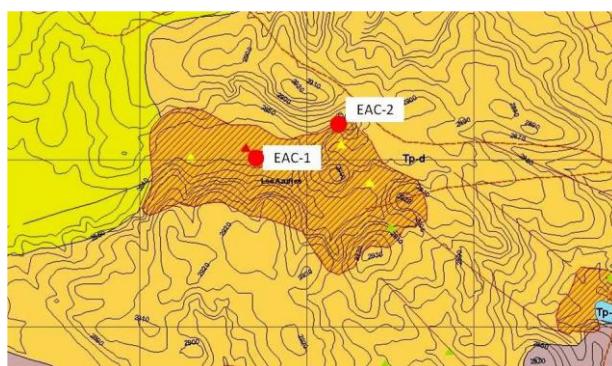


Ilustración 24: Ubicación de pozos EAC-1 y 2 (Viggiano et al., 2011).

Tabla 4:  
Conductividades térmicas para Pozo EAC-1

EAC-1 POZO W		
INTERVALO DE PROF.	Litología	Conductividad Térmica
0-130	Toba	1.7
130-210	Dacitas	2
210-240	Ignimbritas	3.6
240-790	Riodacita	2.5
790-1200	Skarn	2.5
1200-1290	Mármol	2
1290-1550	Skarn	2.5
1550-1600	Aplita	3
1600-1650	Mármol	2
1650-2000	Granito	3.05

Tabla 5:  
Conductividades térmicas para Pozo EAC-2

EAC-2 Pozo E		
Intervalo de Prof.	Litología	Conductividad Térmica
0-125	Ignimbritas	3.6
125-160	Andesitas	2.26
160-290	Dacitas	2
290-350	Andesitas	2.26
350-450	Calizas	2.8
450-1560	Hornfels	2.1
1560-1900	Granito	3.05

Ejecutando el software para un mallado entre pozos separados por 550 con una profundidad de estudio de 2,000 metros tenemos el siguiente comportamiento:

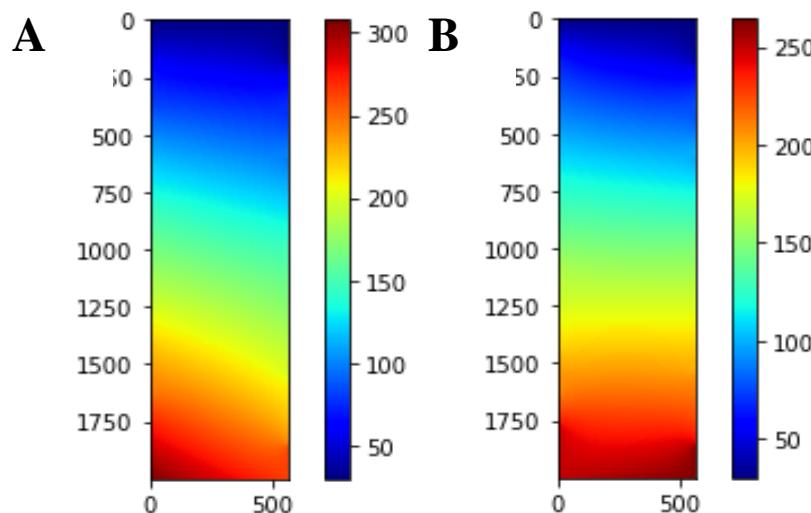


Ilustración 25: Gráfico de salida de software de la aplicación 1 (A) y aplicación 2 (B).

De la Ilustración 25 se comparó las mediciones de temperatura en ambas aplicaciones, se analizó que la aplicación 1 no representa una comparativa correcta dado que fue ejecutada con datos de entrada en diferentes condiciones, por tal motivo se determinó que la aplicación 2 funge como marco de referencia dado que ambos pozos cuentan con mediciones posteriores a la perforación.

## *Norte de Chihuahua, México*

Subsecuentemente se aplicó el software en el norte del país, en el estado de Chihuahua, en la provincia geológica del mismo nombre que al norte y noreste limita con Estados Unidos de América y al sureste con la provincia geológica de sabinas, véase en la Ilustración 26 (Patiño et al., 2013).

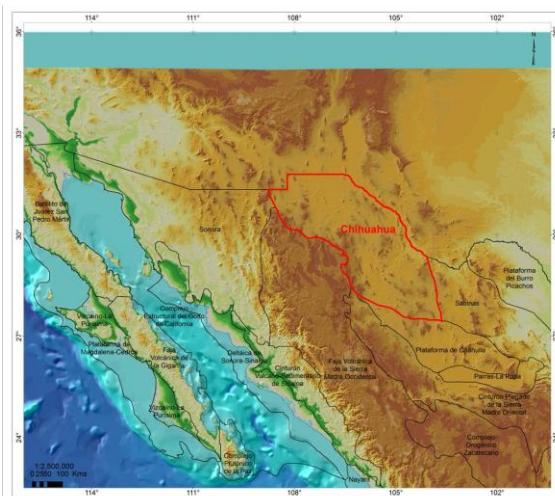


Ilustración 26: Ubicación de la provincia geológica de Chihuahua (Patiño et al., 2013).

## Generalidades

En 2013 se presentó un informe de PEMEX sobre la Provincia Geológica de Chihuahua por Patiño et al. trabajo del cual sabemos que la provincia se caracteriza por la presencia de montañas plegadas afectadas por fallas inversas y sobre corrimientos, las cuales contienen secuencias marinas del Mesozoico. Durante este período, la deposición de sedimentos se produjo en una cuenca sedimentaria que estaba limitada por la Península del Diablo al noroeste, la Península de Aldama al suroeste y la Plataforma de Coahuila al sureste. Estas dos primeras son elementos paleozoicos que emergieron parcialmente durante el Mesozoico, mientras que la Plataforma de Coahuila se desarrolló sobre rocas ígneas del Permo-triásico y sedimentarias del Pensilvánico y Pérmico. Las cadenas montañosas de la región están separadas por llanuras que se formaron al llenar las depresiones resultantes de la actividad tectónica con sedimentos continentales y algunos flujos de lava. Estas características dieron origen a las cuencas endorreicas locales conocidas como "bolsones". Las secuencias sedimentarias plegadas desaparecen hacia el margen occidental bajo la cubierta de ignimbritas de la Provincia Geológica Faja Volcánica de la Sierra Madre Occidental.

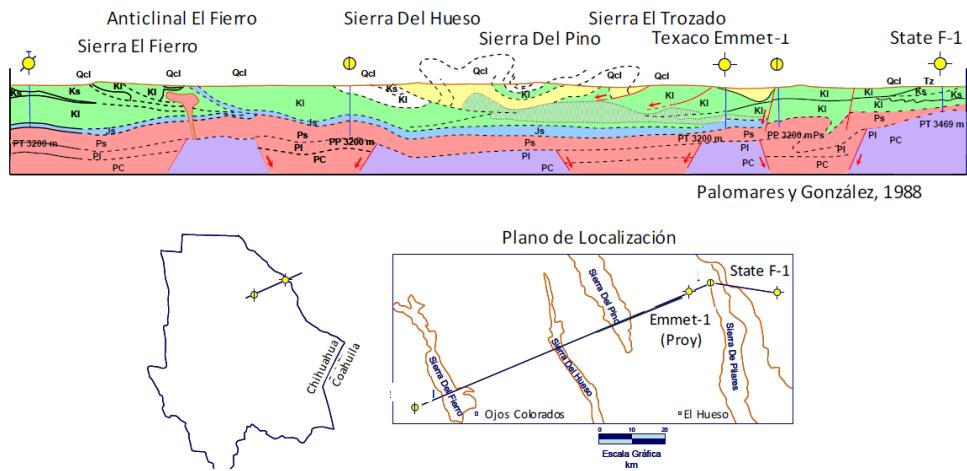


Ilustración 27: Sección estructural de la provincia petrolera de Chihuahua (Patiño et al., 2013).

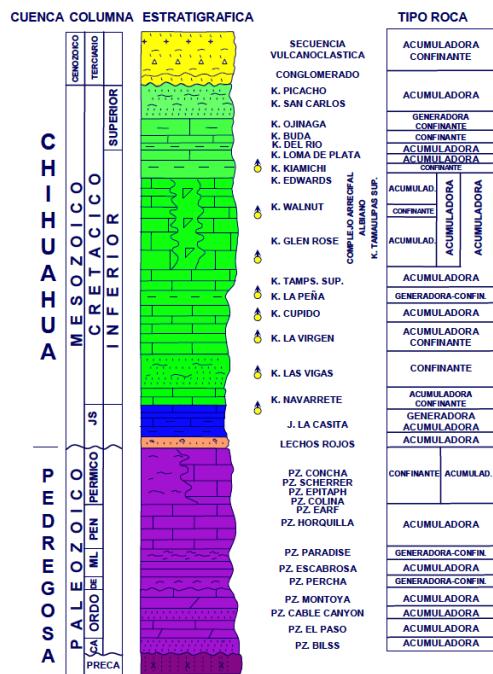


Ilustración 28: Columna estratigráfica general de la cuenca de chihuahua (Patiño et al., 2013)

En la Cuenca Mesozoica de Chihuahua, se depositaron sedimentos continentales y marinos, del Jurásico Superior, Cretácico y Terciario, sobre sedimentos y terrenos cristalinos paleozoicos. Se ha estimado que el espesor de la columna sedimentaria es de hasta 1000 metros, considerando las secuencias sedimentarias paleozoicas y mesozoicas (véase Ilustración 28).

## Litología de pozos

Se comenzó analizando los datos públicos de la provincia petrolera (Ilustración 29), donde podemos ver la distribución de algunos pozos de dicha provincia, información del trabajo publicado en 2016 por Bardales Lazcano; trabajo en el que se presenta un análisis geológico de la provincia con apoyo de datos de los pozos Chapo 1, Cuchillo Parado 1 y Cuchillo Parado 2. En la Ilustración 30 se presenta la sección esquemática de la correlación de pozos.

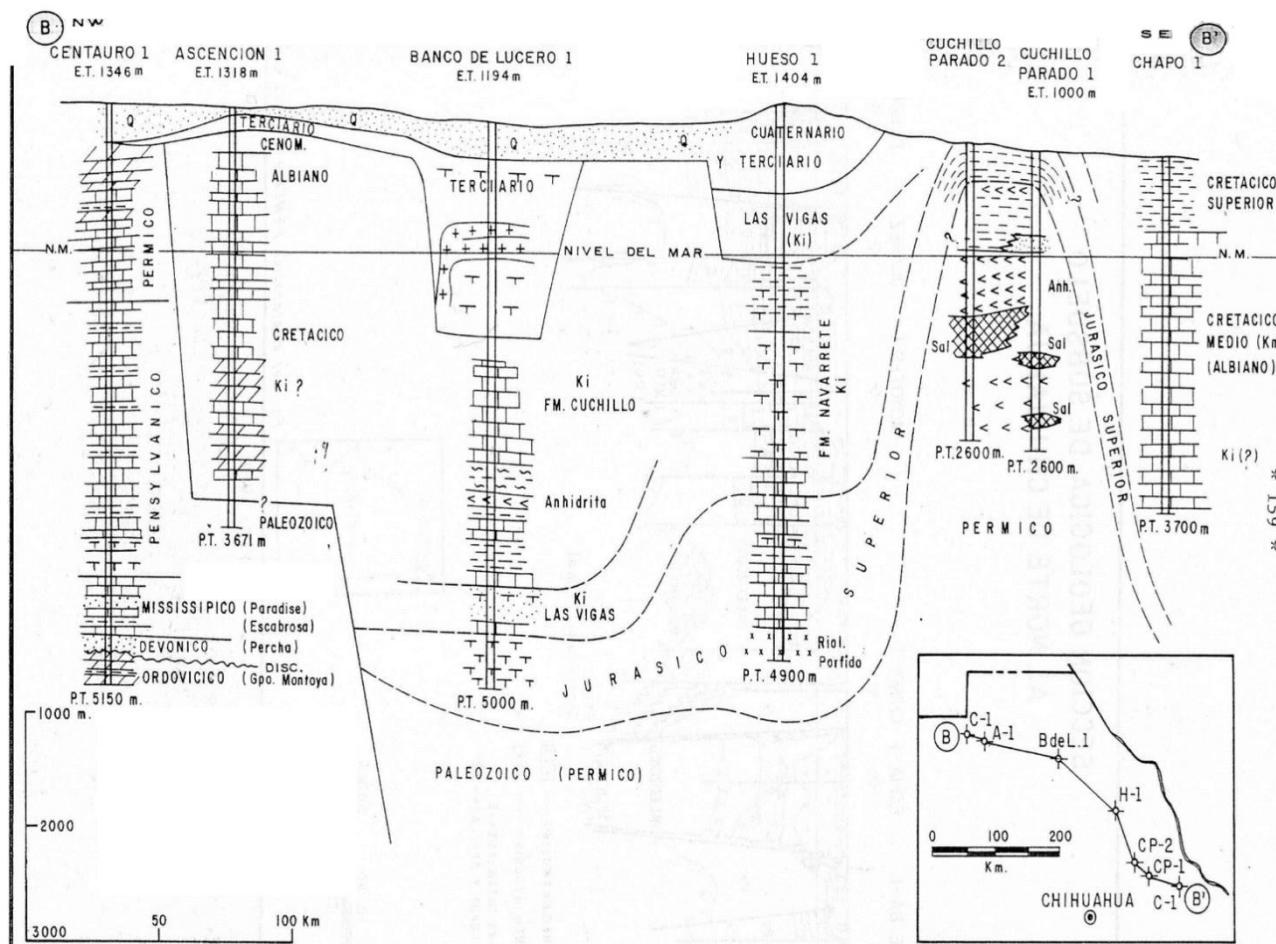
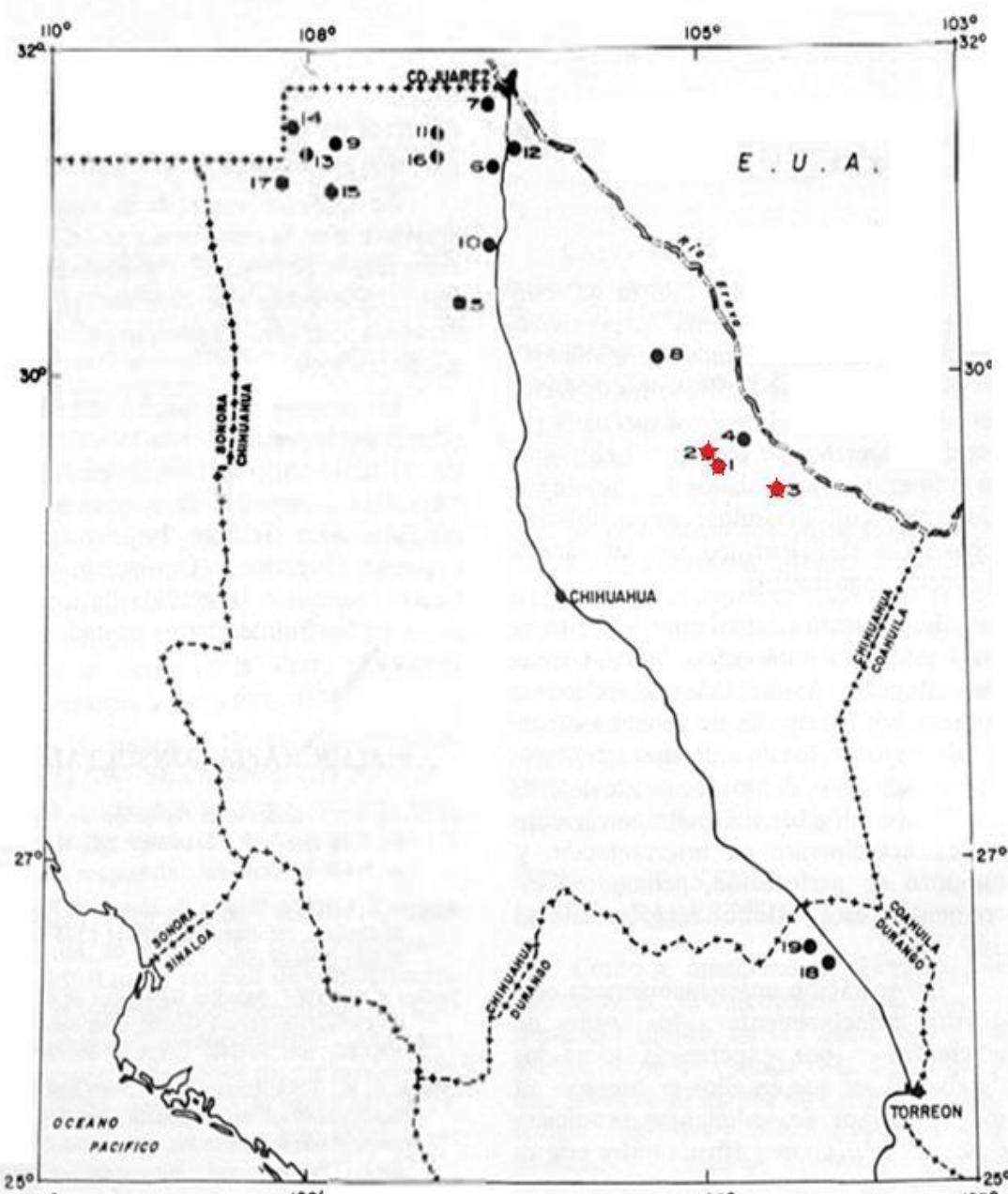


Ilustración 29: Sección esquemática de la correlación de pozos en el estado de Chihuahua (Bardales Lazcano, 2016).



#### L E Y E N D A

- ★ 1 POZO CUCHILLO PARADO N.º 1
- ★ 2 POZO CUCHILLO PARADO N.º 2
- ★ 3 POZO CHAPO N.º 1
- 4 POZO CHAPO N.º 2
- 5 POZO VILLA AHUMADA N.º 1
- 6 POZO SAMALAYUCA N.º 1
- 7 POZO JUAREZ N.º 1
- 8 POZO HUEBO N.º 1
- 9 POZO CHINOS N.º 1
- 10 POZO BANCO DE LUCERO N.º 1
- II POZO MOYOTES N.º 1
- 12 POZO PRESIDIO N.º 1
- 13 POZO ESPIA N.º 1
- 14 POZO CAMELLO N.º 1
- 15 POZO ASCENSION N.º 1
- 16 POZO SAPALLO N.º 1
- 17 POZO CENTAURO N.º 1
- 18 POZO CEBALLOS N.º 1
- 19 POZO DURANGO N.º 1

PETROLEOS MEXICANOS

#### POZOS PERFORADOS EN EL DISTRITO

50 0 50 100 200  
ESCALA 1:4 000,000

Ilustración 30: Ubicación de los pozos perforados en el estado de chihuahua (Bardales Lazcano, 2016).

Se trabajó con los datos presentados en 1982 por Reiter y Tovar, en el cual se estimó el flujo de calor en la zona, basado en datos de temperatura de fondo de pozos petroleros; asimismo, se tomó como referencia las conductividades térmicas expuestas en el trabajo (Tabla 6), del mismo modo se decidió utilizar los datos para los pozos como flujo de calor, intervalos de conductividades térmicas, entre otros (Tabla 7). Estas conductividades térmicas son de rocas encontradas en los pozos estudiados, por lo tanto, se decidió aplicar el software con estos datos, siendo esta nuestra aplicación 3. Conjuntamente se decidió realizar la aplicación 4, para la cual se contó con acceso a datos confidenciales de pozos de la zona.

Tabla 6: Valores de conductividad térmica (Modificado de: Reiter y Tovar, 1982)

<b>Tipo de roca</b>	<b>Rango de Conductividad Termica W/mK</b>
Caliza	2.80 ± .35
esquisto	2.09 ± .36
Dolomita	4.68 ± .82
Roca Ingenua Intrusiva	2.72 ± .47
Arenisca	3.72 ± 1.19
Roca Volcánica	2.09
Limolita	2.68 ± .19
Iutita	2.01 ± .37
Cuarcita	5.89 ± 1.0
Anhidrita	5.43 ± .37
Arcilla	1.17

Valores de conductividad térmica para los tipos de roca encontrados en cantidad mayor al 5% en cualquier intervalo de flujo de calor en profundidad para los pozos estudiados, modificado de: Reiter y Tovar, 1982.

Tabla 7: Datos de flujo de calor de sitios en el norte de la provincia petrolera de Chihuahua, México.  
Modificada de: Reiter y Tovar, 1982.

Sitio	Longitud	Latitud	Elevación	Intervalo de profundidad (m)	Gradiente Térmico (C/Km)	Conductividad térmica (W/mK)	Flujo de calor corregido promedio (mW/m^2)
Ascensión	107°49'	31°08'	1326	187 - 2456	30	3.04	
				2456 - 3669	26.4	3.3	
				187 - 3669	28.9 ± .9	3.14	
Canco de Lucero	106°35'	30°47'	1200	403 - 2499	27.7	2.28	
				2499 - 4328	26.2	2.81	
				4328 - 4750	28.4	2.89	
				4750 - 5000	12	3.18	65.3 ± 17.6
				403 - 5000	26.6 ± .6	2.6	
				403 - 4750	28.5 ± .2	2.56	
Camello	108°07'	31°30'	1247	402 - 2520	31.6	2.34	
				2520 - 3539	27.5	2.95	
				3539 - 4347	27.2	2.97	79 ± 3.4
				402 - 4347	30.5 ± .4	2.63	
Centaurio	108°11'	31°11'	1354	2496 - 3915	33	2.78	
				3915 - 4942	29.7	2.98	
				4942 - 5146	35.3	4.68	
				2496 - 5146	31.9 ± .6	2.96	
				2496 - 4942	31.9 ± 1	2.86	110 ± 36.9
				2496 - 3915	33	3.04 ± .25	
				3915 - 4942	29.7	3.19 ± .19	
				4942 - 5146	35.3	4.14 ± .13	
				2496 - 5146	31.9 ± .6	3.25 ± .43	111.2 ± 23.6
Chinos	107° 47'	31°24'	1310	2204 - 3340	29.9	3.36	
				3340 - 3776	36.7	4.6	
				2204 - 3776	31.5 ± 1.5	3.7	128.6 ± 35.7
Espia	108°00'	31°21'	1269	402 - 2500	29.1	2.54	
				2500 - 3180	26.5	2.95	
				3180 - 4486	28.3	3.06	
				4486 - 4824	23.7	3.63	92.9 ± 26.5
				4824 - 5628	37.3	3.91	
				402 - 5628	28.9 ± .5	3.01	
				402 - 4824	28.1 ± .3	2.83	

Hueso	105° 19'	30°08'	1411	502 - 1079 1079 - 2118 2118 - 3780 3780 - 4541 502 - 4541 502 - 3780	26 24.1 24.1 37 $26 \pm 1.0$ $24.3 \pm .2$	3.11 2.88 3 2.9 2.91 2.98
Juarez	106° 37'	31° 41'	1286	0 - 505	52.5	1.94
Mayotes	107° 00'	31°33'	1240	406 - 2496 2496 - 4300 4300 - 4940 406 - 4940	24.9 29.4 25 $27 \pm .7$	2.69 3.74 3.39 3.21
Presidio	106°27'	31°22'	1286	405 - 1977 1977 - 3790 3790 - 3998 3998 - 4990 402 - 4990 3790 - 4990	24.2 13.2 19.2 28.2 $19.1 \pm 1.6$ $27.0 \pm 1.5$	2.8 3.17 3.39 2.76 2.97 2.87
Samalayuca	106°34'	31°18'	1365	956 - 1366	14.6	4.93
Sapallo	106°00'	31°22'	1222	700 - 2047 2047 - 4595 4595 - 5323 700 - 5323 2047 - 5323 700 - 2047 2047 - 4595 4595 - 5323 2047 - 4595	24.5 29.1 33 $28.4 \pm .9$ $30.0 \pm 1.2$ 3 $29.1$ 33 $30.0 \pm 1.2$	2.67 2.97 3.11 2.88 3 3.09 ± .52 2.96 ± .36 3.05 ± .45
Villa Ahumada	106° 51'	30°28'	1296	459 - 4549	26.9	2.93

## Temperatura de pozos

La aplicación 3 se corrió utilizando la corrección del flujo de calor presentado en la Tabla 7. Respecto a las mediciones de conductividades térmicas el trabajo base no presenta una columna estratigráfica, por consiguiente, en ambas aplicaciones se decidió para el pozo Presidio se utilizarán los intervalos de conductividad térmica presentados en la Tabla 6 y para el pozo Samalayuca se utilizó la conductividad térmica promedio a falta de intervalos de conductividad térmica (véase los datos utilizados para la aplicación 3 en la tabla 9).

### Aplicación en norte de Chihuahua, México.

Los pozos para este caso tienen una separación de 12 Km, siendo este caso el de mayor separación entre pozos, véase su distribución geográfica en la Ilustración 31; los pozos Samalayuca y Presidio son los pozos W y E, respectivamente.



Ilustración 31: Ubicación de Pozos Presidio y Samalayuca.

Tabla 8:  
Datos considerados para la aplicación 3 en el Norte de Chihuahua.

Sitio	Longitud	Latitud	Elevación	Intervalo de profundidad (m)	Conductividad térmica (W/mK)	Conductividad térmica promedio (W/mK)	Flujo de calor corregido promedio (mW/m^2 )
Presidio (POZO E)	106°27'	31°22'	1286	0 - 1977	2.8		
				1977 - 3790	3.17		
				3790 - 3998	3.39		
				3998 - 5000	2.76		67.1
Samalayuca (POZO W)	106°34'	31°18'	1365				
						3	77.9

Se ejecuto el software para un mallado entre pozos separados por 12,000 metros con una profundidad de estudio de 5,000 m siendo esta nuestra aplicación 3:

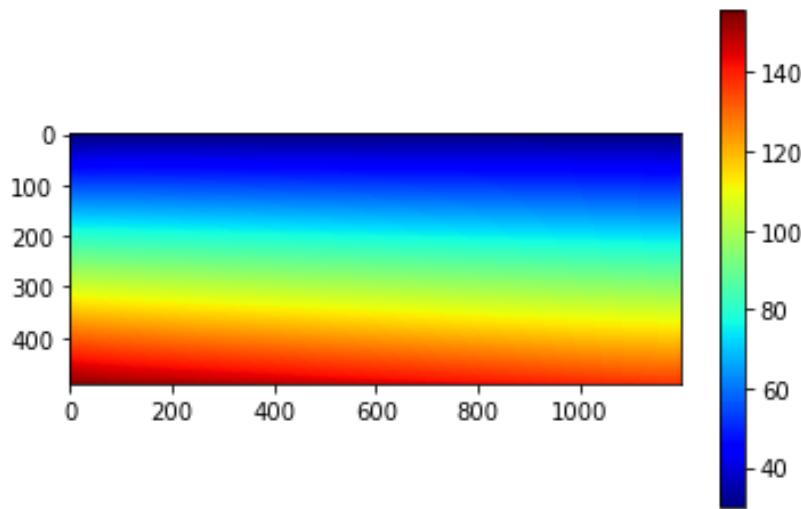


Ilustración 32: Gráfico de salida de software sin mediciones de temperatura en profundidad (aplicación 3).

Se observa en la Ilustración 32 un comportamiento lineal esto se debe al cálculo del perfil de temperatura por flujo de calor, cosa que se replica en ambos pozos, viéndose en las Ilustraciones 33.a y 33.b (Grafico de comportamiento de temperatura realizado por el software) el comportamiento de temperatura en profundidad usando el flujo de calor como dato de entrada para cada pozo.

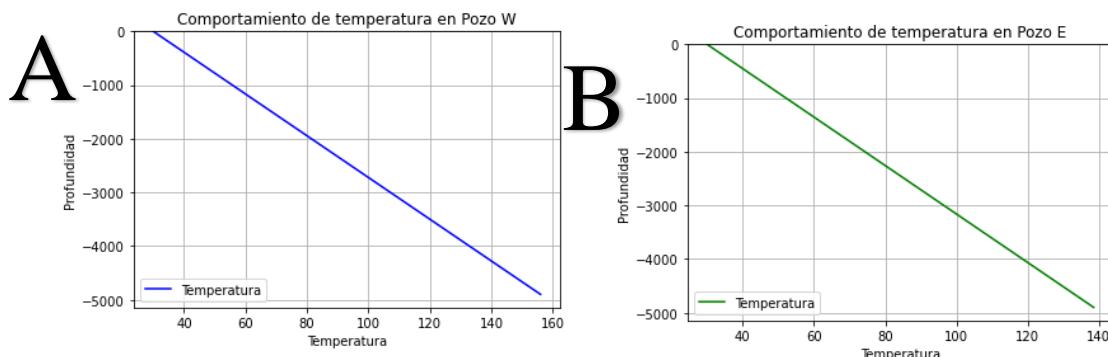


Ilustración 33: Grafico del software de comportamiento de temperatura en profundidad en el pozo W (A) y E (B)

A manera complementaria se tuvo acceso a registros de temperatura a profundidad en ambos pozos, en consecuencia, se realizó la aplicación 4, donde se utilizaron estos datos en lugar de flujo de calor como en la aplicación 3. Cabe resaltar que los datos con los que se contaron especialmente en el pozo W no superan las 4 mediciones de temperatura, teniendo como resultado la Ilustración 34.

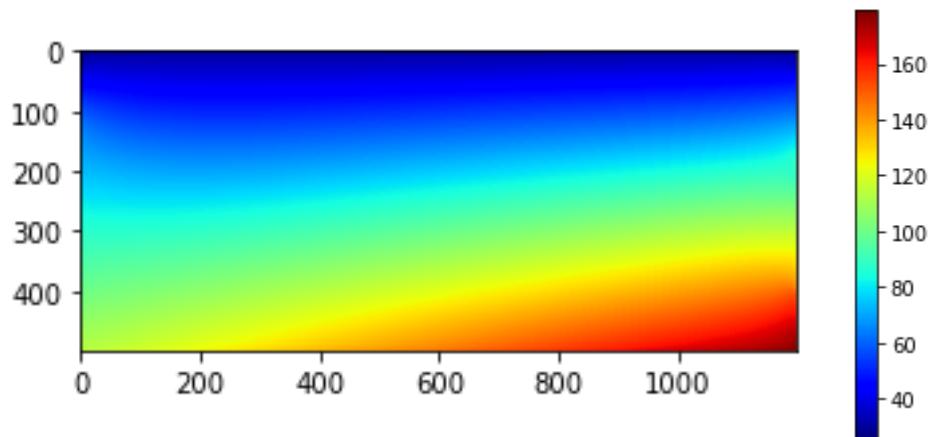


Ilustración 34: Gráfico de salida de software con mediciones de temperatura en profundidad en ambos pozos.

### *Norte del Durango, México*

La última zona donde se aplicó el software fue en el Norte de Durango, en pozos perforados que se encuentran en el municipio de Mapimi.

#### Generalidades

Su localización es al Noreste del estado de Durango; de antecedentes bibliográficos, la zona no tiene información de pozos ni petroleros ni geotérmicos, por lo tanto, no se pudo encontrar información de litología en pozos. Sin embargo, el municipio de Mapimi es parte del acuífero Ceballos, el cual abarca parcialmente a los municipios aledaños, por tal motivo se presenta la geología referente al acuífero Ceballos, véase su localización en la Ilustración 35.



Ilustración 35: Localización de acuífero Ceballos (CONAGUA, 2020)

La zona está cubierta aproximadamente por 70% por material aluvial, cuyo suelo se caracteriza por permitir muy bien el paso del agua, ya que es muy permeable. En la parte suroeste se identifican una diversidad de rocas sedimentarias entre las que sobresalen

conglomerados, calizas y calizas-lutitas que son rocas permeables. Al noreste existe una sierra conformada por calizas, y al norte, en menor grado, hay afloramientos de rocas ígneas extrusivas como basalto y andesitas, cuyas rocas son permeables (ver Ilustración 36) (CONAGUA, 2020).

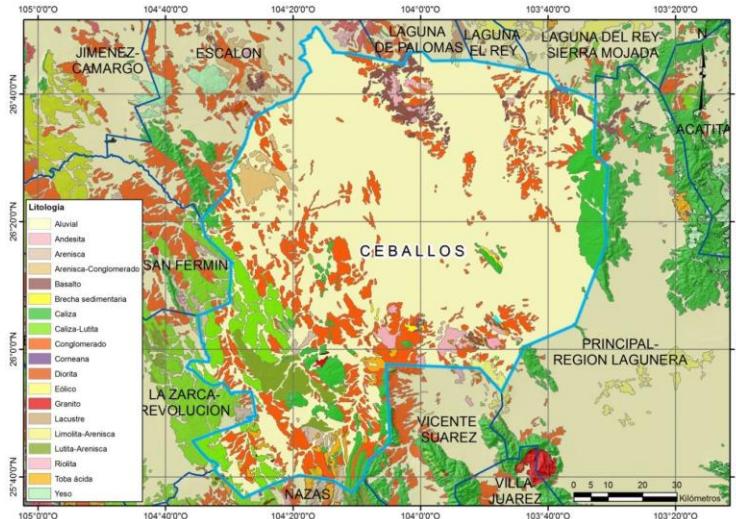


Ilustración 36: Geología general del acuífero (CONAGUA, 2020).

### Aplicación en el norte de Durango, México.

Considerando que la profundidad de exploración es 6,000 m, y la separación entre ambos pozos es de 8,000 m, con dichos parámetros tenemos la Ilustración 37:

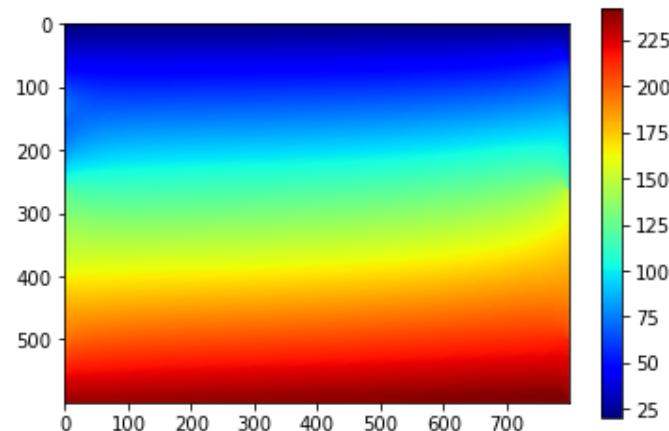


Ilustración 37: Gráfico de salida de software en zona norte de Durango, México.

## Limitantes y posibilidades de software

De las aplicaciones del software, se analizaron sus limitantes y posibilidades por medio de un método comparativo. Primero, ejecutar el software con la totalidad de registros de temperatura de entrada, para posteriormente realizar una segunda ejecución eliminando un dato de entrada de manera aleatoria, con el fin de evaluar la diferencia entre ambos resultados. De acuerdo con el método de evaluación, tenemos como resultado la Tabla 9, la cual nos presenta el análisis de la diferencia del software en las 3 zonas presentadas; de esto, 2 casos (comparativas) en las zonas con menor cantidad de datos (Norte de Chihuahua\* caso 1 y 2 y Norte de Durango\*\* caso 3 y 4), con el fin de comparar el comportamiento al eliminar un dato de entrada en ambos pozos.

\* En el caso del Norte de Chihuahua se consideró la aplicación 2 como referencia.

\*\* En el caso del Norte de Durango se consideró la aplicación 4 como referencia.

Tabla 9:  
Análisis de la diferencia de la aplicación de software.

Zona de estudio	Diferencia en °C	Diferencia %	% eliminado (Al quitar un dato)	Promedio de distancia entre mediciones (Metros)	Temp. Precedida en Profundidad (Metros)
Puebla	2.8	1.5	4.54	61	200
Chihuahua Caso 1	7	5	14.28	765	10
Chihuahua Caso 2	14	29	33.3	533	3632
Durango Caso 3	20	16.5	25	1198	900
Durango Caso 4	30	29.5	20	1114.75	100

Se determinó que la veracidad del software es sensible a tener menos de 7 mediciones de pozo como se puede comparar en los casos 1 y 2 de la zona de Chihuahua (Tabla 9), dado que al tratarse de un pozo con tan solo 3 datos la diferencia porcentual llega hasta 30 unidades (Caso 2). En su contraparte, el caso 1, en donde la cantidad de mediciones es de 7 y su diferencia porcentual se mantiene en 5 unidades, denotando la importancia de mediciones en profundidad cercanas a la profundidad de exploración. En el caso 2, una predicción de temperatura por flujo de calor de más de 3,600 m pierde mucha precisión en la estimación. Al analizarse los casos en la zona de Durango, se confirmó la importancia de contar con al menos 7 mediciones de pozo, dado que se tienen diferencias porcentuales mayores a 15 unidades en ambos casos, ya que cuentan con 4 y 5 mediciones de pozo, respectivamente. Se determinó que el caso 4 cuenta con una diferencia elevada, dado que se eliminó un dato de una zona con una conductividad mayor al promedio, por tal motivo, el software calcula un perfil erróneo, teniendo como consecuencia una diferencia notoriamente mayor.

Respecto a la aplicación en la zona de Puebla, se observó una diferencia muy baja tanto de temperatura como en la diferencia porcentual, esto dado a la cantidad de registros de temperatura de pozo dado que al eliminar un dato este representa menos del 5% de la totalidad de los datos, dando al software mayor grado de veracidad.

Finalmente, se encontró una limitante del software causado por el uso de Jupyter Notebook online, el cual imposibilita el manejo de datos en volúmenes superiores a un límite\*\*\* (memoria) teniendo como consecuencia que cierto tamaño de malla sea imposible procesarlo a escala 1:1, motivo por el cual, el software se encuentra limitado en su código para evitar dicho error y arrojar el resultado a la mayor escala que le sea posible. Teniendo como ejemplo de esta limitante la Ilustración 32 y la Ilustración 34 las cuales se encuentran a escala 1:10.

\*\*\*Este límite es depende del poder computacional y el límite pre establecido por Jupyter notebook online, el cual puede variar dependiendo de la versión al momento de uso.

## CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES

### Conclusiones

Se desarrollo un software que prioriza de entendimiento y practicidad de uso por medio de Jupyter Notebook Online, permitiendo así a usuarios con poca o nula experiencia en programación el uso de este. Se integro correctamente archivos de salida de tipo visual y el manual de uso, favoreciendo el entendimiento de los resultados y facilitando su uso. Con ello se logró maximizar los usuarios que pueden hacer uso del software.

Se presenta un software optimizado a Python que lograra reducir los tiempos de procesado en un 10,000%. El cual se validó al evaluar la diferencia entre Python y el código original, teniendo una diferencia porcentual máxima absoluta menor al 10% y teniendo un promedio de diferencia porcentual absoluta menor al 2.5%. Determinado así que es un software veras respecto al original.

Se aplico el software en distintas zonas de estudio, con características particulares, donde se determinó su funcionalidad, dado que el software permite mas de 72 combinaciones de datos de entrada, teniendo una variada grama de posibilidades de uso.

## Referencias citadas

- Bardales L., J. (2016). Análisis geológico de la provincia petrolera de chihuahua, con un modelo geológico 3D en el área de cuchillo parado (Tesis de pregrado). UNAM, Ciudad de México.
- Beardsmore, G. R. (2009). Modelling in Geothermal Exploration. . Australian Geothermal Energy, 7-12.
- Canet, C., S. I. Franco, L. Morelos-Rodríguez, A. Rajabi, and F. Núñez-Useche (2021). Apunte geológico y revisión histórica de la zona geotérmica de Pathé, Hidalgo. Geofísica Internacional, 60(3), 258-279. doi: 10.22201/igeof.00167169p.2021.60.3.2130.
- Carrillo-de la cruz, J. L., Prol-Ledesma, R. M., Velázquez-Sánchez, P. y Gómez-Rodríguez, D. (2020). MAGCPD: a MATLAB-based GUI to calculate the Curie point-depth involving the spectral analysis of aeromagnetic data. Earth Science Informatics, 13, 1539–1550. <https://doi.org/10.1007/s12145-020-00525-x>
- Comisión Federal de Electricidad. (2021). Mantenimiento a los pozos existentes EAC-1 y EAC-2 localizados en el área geotérmica de Acoculco, Puebla. Recuperado de: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgiraDocs/documentos/pue/estudios/2021/21PU2021E0005.pdf>.
- CFE (14/abril/2022). México, potencia en geotermia. Recuperado de: <https://app.cfe.mx/Applicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2502>
- Comisión Nacional del Agua. (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero ceballos (1023), Estado de Durango. Recuperado de: [https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\\_Acuiferos\\_18/durango/DR\\_1023.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/durango/DR_1023.pdf).
- Espinoza-Ojeda, O. M., E. Rivera-Calderón, and P. T. Sánchez-Sánchez (2022). Numerical simulation to estimate the conductive thermal state model – Mexican EGS zones as study cases. Earth Science Informatics, 15, 603-622. doi: 10.1007/s12145-022-00766-y.
- Espinoza-Ojeda, O. M., J. L. Macías, E. Gómez-Arias, J. A. Muñiz-Jauregui, E. Rivera-Calderón, Á. G. Figueroa-Soto, R. Vázquez-Rosas, and V. H. Garduño-Monroy (2021). A two-dimensional temperature field simulation of the La Primavera geothermal area, México. Geothermics, 96, 102201. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102201>.
- Frías, L. (31 de agosto del 2020). Gran potencial de México en energía geotérmica. Gaceta UNAM. Recuperado de: <https://www.gaceta.unam.mx/gran-potencial-de-mexico-en-energia-geotermica/>.

García Cisneros, E. (2017). Análisis y Viabilidad para el establecimiento de plantas geotérmicas en el estado de Chiapas, México (Tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México.

Gibson, H. J., Stüwe, K., Seikel, R., y FitzGerald, D. (2009). Practical aspects of 3D temperature and heat flow modeling for exploration of EGS energy plays. Australian Geothermal Energy, 56-61.

Guerrero-Martínez, F. J., R. M. Prol-Ledesma, J.-L. Carrillo-de la Cruz, A. A. Rodríguez-Díaz, and I. A. González-Romo (2020). A three-dimensional temperature model of the Acoculco caldera complex, Puebla, Mexico, from the Curie isotherm as a boundary condition. Geothermics, 86, 101794. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101794>.

Gutiérrez Gama, J. G., y González Partida, E. (2016). Procesos geológicos del campo geotérmico Acoculco, Puebla, México. Tlamati Sabiduría, 7 (2).

Gutiérrez-Negrín, L. C. A., I. Canchola Félix, J. M. Romo-Jones, and J. L. Quijano-León (2020). Geothermal energy in Mexico: Update and perspectives. In: proceedings of the World Geothermal Congress, Reykjavik, Iceland, 1-13.

Hamming, R. W. (1997). The art of doing science and engineering. San Francisco, EUA: Stripe Press.

Jansen, G., B. Valley, and S. A. Miller (2018). THERMAID - A matlab package for thermo-hydraulic modeling and fracture stability analysis in fractured reservoirs. arXiv.org, 1-29. arXiv:1806.10942v1.

López H, A., 2009. Evolución volcánica del complejo Tulancingo-Acoculco y su Sistema hidrotermal, estados de Hidalgo y Puebla, México. Tesis para obtener el grado de doctor en ciencias de la tierra, UNAM.

Lorenzo, C., Flores, M., y Ramírez, G., (2011). Caracterización de un yacimiento de roca seca caliente en la zona geotérmica de Acoculco, Pue. Geotermia, 14(1),59-69.

Majorowicz, J., Nieuwenhuis, G., Unsworth, M., Phillips, J., y Verveda, R. (2014). High temperatures predicted in the granitic basement of northwest Alberta - an assessment of the EGS energy potential. ResearchGate, 1-12.

Patiño R., J., Lara R., J., Román R., J. R., Clara V., L., Barrera G., D. y Hernández R., U. (2013). Provincia Petrolera de Chihuahua, Pemex Exploración y Producción. Pemex, Ciudad de México.

Reiter, M., y Torvar, J., (1982). Estimates of terrestrial heat flow in northern Chihuahua, Mexico, based upon petroleum bottom-hole temperatures. GSA Bulletin; 93 (7): 613–624. doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1982\)93<613:EOTHFI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1982)93<613:EOTHFI>2.0.CO;2)

Rivera C., E. (2018). Modelo 2D del estado térmico conductivo estacionario: la primavera (jalisco) y cuencas sedimentarias del norte de chihuahua (Tesis de maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán.

Rocha, S., Jimenez, E., & Palma, H. (2006). Propuesta para dos pozos exploratorios en el proyecto geotérmico de Acoculco, Pue. CFE, informe interno de la GPG No. OGL-ACO-03/06. Inédito.

Rybach, L. (2022). Global status, development, and prospects of shallow and deep geothermal energy. International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics, 5(1), 20-25. <https://doi.org/10.31214/ijthfa.v5i1.79>.

Santoyo, E., y Barragán R., R. M. (2012). Energía geotérmica. Ciencia, 40-51.

Seisdedos S., M. A. (2012). Climatización de edificios por medio del intercambio de calor con el subsuelo y agua subterránea aspectos a considerar en el contexto local (Tesis de pregrado). Universidad de Chile. Chile.

SENER. (2017). Informe pormenorizado sobre el desempeño y las tendencias de la industria eléctrica nacional. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/415850/Informe\\_Industria\\_Electrica\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/415850/Informe_Industria_Electrica_2017.pdf).

SENER. (2017). Reporte de Avance de Energías Limpias. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/354379/Reporte\\_de\\_Avance\\_de\\_Energias\\_Limpias\\_Cierre\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/354379/Reporte_de_Avance_de_Energias_Limpias_Cierre_2017.pdf).

SENER. (2020). Balance nacional de energía 2020. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE\\_NACIONAL\\_ENERGIA\\_0403.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE_NACIONAL_ENERGIA_0403.pdf).

SENER. (2022). Nuevo Esquema del sistema eléctrico nacional. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/700083/Presentacion1.pdf>

Suhas V., P. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow. Minnesota, EUA: Taylor and Francis.

Torres, V., Gonzalez, E., y Birkle, P. (1995). Estudios petrográficos y de alteración hidrotermal de muestras de ripio y núcleos de pozos exploratorios en el campo geotérmico de las Derrumbadas-Acoculco,Puebla. Informe interno del IIE/11/10184/F. 248. Inédito.

Versteeg, H. K. y Malalasekare, M. (1995). An introduction to computational fluid dynamics, The Finite Volume method. New york, EUA: Longman scientific and technical.

Viggiano, J. C., Flores, M., y Ramírez, S. (2011). Evolución del sistema geotérmico de Acoculco, Pue., México: un estudio con base en estudios petrográficos del pozo EAC-2 y en otras consideraciones. *Geotermia*, 24(1), 14-24.

Wong-Loya, J. A., E. Santoyo, and J. Andaverde (2015). RPM-WEBBSYS: A web-based computer system to apply the rational polynomial method for estimating static formation temperatures of petroleum and geothermal wells. *Computers & Geosciences*, 85,45-59. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.09.001>

Wong-Loya, J. A., E. Santoyo, and J. Andaverde (2017). A 3-D wellbore simulator (WELLTHER-SIM) to determine the thermal diffusivity of rock-formations. *Computers & Geosciences*, 103, 204-214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2017.03.016>.