

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO**

**DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA
EDICIÓN 2019**



**PROYECTO FINAL
MODELO NUMÉRICO DE UN CAMPO GEOTÉRMICO EN EL SALVADOR**

**AUTORES:
ALDO AZOÑOS FIGUEROA
LUIS JONATHAN JARAMILLO CORONEL**

**TUTOR:
JULIO EDUARDO QUIJANO CORTEZ**

EL SALVADOR – NOVIEMBRE, 2019

RESUMEN

El trabajo muestra la elaboración y simulación numérica realizada con el código numérico TOUGH2 para un campo geotérmico en El Salvador, el cual presenta características de líquido dominante y se encuentra en un entorno de origen volcánico. Para lo cual, se definieron cinco capas con sus respectivos espesores y permeabilidades, basándose en un modelo geotérmico conceptual: Capa superficial, capa sello, steam cap, reservorio y basamento.

Con los datos mencionados se construyó una grilla irregular con un total de 88 celdas por capa, dando un total de 440 celdas en todo el modelo.

El modelo fue simulado durante 280 mil años con el fin de lograr condiciones estables en el yacimiento. Posteriormente, éstas fueron tomadas como condiciones iniciales para generar el modelo en condiciones dinámicas (inyección y producción).

Como resultado, tras simular el modelo dinámico durante 80 años se obtuvo una disminución de presión de aproximadamente 21 bares y 3°C de temperatura.

PALABRAS CLAVE: TOUGH2, simulación, modelo numérico, reservorio, geotermia.

ABSTRACT

The following study shows the simulation done with the numerical code TOUGH2 for a geothermal field in El Salvador, which has characteristics of dominant liquid and is located in a volcanic origin environment. The model was defined with five layers with their respective thicknesses and permeabilities based on a conceptual geothermal model: Surface layer, cap rock, steam cap, reservoir and basement.

With the mentioned data, an irregular grid was constructed with a total of 88 cells per layer, giving a total of 440 cells throughout the model.

The model was simulated for 280 thousand years in order to achieve stable conditions in the field. Subsequently, these were taken as initial conditions to generate the model in dynamic conditions (injection and production).

As a result, after simulating the dynamic model for 80 years, a pressure drop of approximately 21 bars and 3°C temperature were obtained.

KEY WORDS: TOUGH2, simulation, numerical model, reservoir, geothermal energy.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud a LaGeo S. A. de C. V., a la Universidad del Salvador (UES) y a la Universidad de las Naciones Unidas-Programa de Entrenamiento Geotérmico (UNU-GTP), por haber hecho posible la realización del Diplomado en Geotermia para América Latina, Edición 2019.

Agradecemos principalmente a nuestro asesor, el Ing. Julio Eduardo Quijano Cortez por guiarnos y proporcionarnos las herramientas necesarias para el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivo General	2
1.4. Objetivos Específicos	2
1.5. Zona de estudio	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Trabajos previos.....	3
2.2. TOUGH2	4
3. METODOLOGÍA.....	6
3.1. Instalación de software e implementación de directorios de archivos	6
3.2. Evaluación del modelo geológico conceptual	8
3.3. Construcción de rejillas regulares e irregulares, archivos para adicionar en la entrada de datos para el TOUGH2 y visualización de resultados.....	9
3.4. Creación del archivo de entrada para la simulación en estado natural del reservorio	9
3.5. Simulación numérica del sistema geotérmico en estado natural con TOUGH2	10
3.6. Creación del archivo de entrada para la simulación en estado dinámico del reservorio .	11
3.7. Simulación numérica del sistema geotérmico en estado dinámico con TOUGH2.....	11
3.8. Calibración del modelo numérico	11
3.8.1. Calibración del estado natural	11
3.8.2. Calibración de la historia de producción	12
4. RESULTADOS	13
5. DISCUSIÓN	20

6. CONCLUSIONES	21
7. REFERENCIAS	21
8. APÉNDICES	22

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Ecuaciones de estado (EOS) disponibles en TOUGH2 (Pruess, Oldenburg, & Moridis, 1999).	5
Tabla 3.1. Librerías y aplicaciones básicas para generar el modelamiento numérico, entre otras operaciones.	6
Tabla 3.2. Scripts necesarios para la edición y visualización del modelo numérico. Modificado de (Vega Castro, Luévano García, & Henríquez Ortiz, 2016)	7
Tabla 3.3. Límites de las unidades geológicas.....	9
Tabla 4.1. Datos de presión de separación y producción de pozos productores e inyectores. ...	17
Tabla 8.1. Parámetros que se colocaron para el archivo de puntos.	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de discretización de un elemento (Pruess, Oldenburg, & Moridis, 1999)...	6
Figura 3.1. Perfil geológico del campo geotérmico en estudio.	9
Figura 3.2. Archivo de entrada nat00 para las simulación en estado natural.....	10
Figura 3.3. Encabezado del archivo de salida de la simulación numérica con TOUGH2.....	11
Figura 3.4. Archivo de entrada <i>prod0</i> para las simulación en estado dinámico.	12
Figura 4.1. Discretización del modelo numérico.....	13
Figura 4.2. Rocas asignadas a la capa del reservorio.....	14
Figura 4.3. Distribución de isotermas a -300 m.s.n.m.	14
Figura 4.4. Distribución de isobaras a -300 m.s.n.m.	15
Figura 4.5. Calibración de presión y temperatura del modelo en estado natural.	16
Figura 4.6. Evolución del estado natural del modelo numérico.	17
Figura 4.7. Evolución del estado dinámico del modelo numérico.	18
Figura 4.8. Distribución de isotermas dentro del reservorio en condiciones estado natural.....	18
Figura 4.9. Distribución de isotermas dentro del reservorio en estado dinámico.	19
Figura 4.10. Distribución de isobaras dentro del reservorio en condiciones estado natural.....	19
Figura 4.11. Distribución de isobaras dentro del reservorio en estado dinámico.	20
Figura 8.1. Registro de pozo desviado.....	22
Figura 8.2. Archivo con profundidades.....	22
Figura 8.3. Script <i>info_model.py</i> en el GUI del editor SciTE. Se muestran los parámetros a modificar.	24
Figura 8.4. Script <i>gen_puntos_lejos.py</i> en el GUI del editor SciTE.	25

Figura 8.5. Puntos para realizar la rejilla regular e irregular. Los puntos rojos representan los pozos, los azules representan los puntos creados para las celdas del campo cercano y los negros representan los puntos del campo lejano.	25
Figura 8.6. Script <code>modelo_capas.py</code> en el GUI del SciTE.	26
Figura 8.7. Editor de tablas <i>gnumeric</i> con archivo <code>rocas.xls</code> . La primera fila representa el número de la celda, las siguientes representan las capas.	27
Figura 8.8. Distribución visual de las rocas de la capa 1 y celdas con su respectivo número....	27
Figura 8.9. Script <code>inserte_rocas.py</code> en el GUI del SciTE.	28
Figura 8.10. Archivo de producción del pozo P5B con flujo total.	28
Figura 8.11. Archivo <code>bate_expa</code> con pozos de producción e inyección.	29
Figura 8.12. Script <code>vea_cal_pt_nat.py</code> en la GUI del SciTE.	30
Figura 8.13. Script <code>vea_mapa_pt_modelo.py</code> en la GUI del SciTE.	30
Figura 8.14. Script <code>vea_evol_pt_nat.py</code> en la GUI del SciTE.	31
Figura 8.15. Script <code>vea_mapa_pt.py</code> en la GUI del SciTE.	32

ÍNDICE DE APÉNDICES

Apéndice A. Uso de scripts para la construcción de rejillas regulares e irregulares, archivos para adicionar en la entrada de datos para el TOUGH2 y visualización de resultados.....	22
Apéndice B. Salida de datos del TOUGH2.....	33

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la disponibilidad de los recursos energéticos está directamente ligada al desarrollo económico y humano de cada país. De igual manera, se sabe que dichos recursos están cada vez más limitados y su demanda incrementa considerablemente con el crecimiento de la población. En consecuencia, el abastecimiento energético a nivel global ha sido motivo de preocupación (Bundschuh & Suarez, 2010). Los recursos geotérmicos pueden ser utilizados como una herramienta para cubrir la demanda energética y para ello, es necesario apoyarse en herramientas que ayuden a su explotación razonable.

La simulación numérica se define como una representación aproximada de un sistema, donde todos los procesos y movimientos que ocurran dentro éste, serán descritos mediante ecuaciones matemáticas. Las ecuaciones planteadas para describir el sistema tienen dos tipos de soluciones; solución de tipo analítica y solución de tipo numérica. La solución analítica se define como la solución exacta de la ecuación, mientras que la solución numérica es aquella que se logra mediante la discretización de una ecuación (Antúnez, 1996).

Dentro de la ingeniería de reservorios existen dos tipos de modelos. Los primeros se denominan modelos conceptuales, los cuales son la representación de las características del reservorio, p. ej., temperatura, presión, tamaño y estructura geológica. Los segundos se conocen como modelos numéricos. Éstos son la representación del modelo conceptual en forma de elementos que permitan ser manipulados mediante herramientas numéricas para la extrapolación de características del subsuelo que no pueden ser medidas directamente, p. ej., distribución de presión y temperatura, contenido energético, volumen, recarga y descarga (Lima, Tokita, & Hatanaka, 2013). El modelo numérico de un sistema geotérmico se representa mediante la subdivisión de éste en celdas, las cuales estarán en función de las ecuaciones que controlan los procesos físicos del sistema.

Este trabajo se realizó como proyecto final del Diplomado en Geotermia para América Latina Edición 2019, a través de la cooperación entre la Universidad de El Salvador (UES), la Universidad de las Naciones Unidas con el Programa de Entrenamiento Geotérmico (UNU-GTP por sus siglas en inglés) y LaGeo S.A. de C.V. En éste, se muestra la elaboración y simulación numérica realizada con el código numérico TOUGH2 para un campo geotérmico en El Salvador, el cual presenta características de líquido dominante y se encuentra en un entorno de origen volcánico.

1.1. Planteamiento del problema

En la industria geotérmica actual, los aspectos relacionados a la predicción del comportamiento de un sistema geotérmico son de gran importancia para la planeación y gestión de proyectos. En este contexto, los modelos numéricos son esenciales para la simulación y representación de los procesos físicos que ocurren en el sistema.

Es sabido que, a lo largo de los años, los campos geotérmicos sufren de diferentes factores que reducen su producción, p. ej., caídas aceleradas de presión, problemas de incrustaciones y enfriamiento del reservorio debido a una mala reinyección. Estos problemas pueden ser

evaluados y predichos mediante la correcta elaboración y calibración de un modelo numérico. Para ello, la disponibilidad de datos sobre las propiedades físicas de las rocas que conforman el reservorio (p. ej., porosidad, permeabilidad, densidad, capacidad calorífica) es de gran importancia, y a su vez, su ausencia suele ser un problema muy común en la elaboración de modelos numéricos correctos.

1.2. Justificación

Para resolver los procesos mencionados en la sección anterior, se han desarrollado modelos numéricos capaces de predecirlos y proporcionar información sobre el comportamiento del campo geotérmico en un futuro. Sin embargo, comparado con otras áreas como mecánica e ingeniería civil, la aplicación en sistemas geotérmicos ha sido lenta durante las últimas cuatro décadas y se considera que aún no se aplica a un nivel óptimo. La dificultad en la elaboración de un modelo numérico que represente un sistema geotérmico se debe a la complejidad de éste, donde se involucra la transferencia de masa, solutos y energía a través de rocas poroelásticas, con la superficie del terreno actuando como *no-flow boundary* (Bundschuh & Suarez, 2010).

1.3. Objetivo General

Desarrollar un modelo numérico basado en el código numérico TOUGH2 con el objetivo de simular procesos que involucren cambios de presión y transferencia de calor en función del tiempo, para un campo geotérmico en El Salvador.

1.4. Objetivos Específicos

- Procesar y analizar los registros de presión y temperatura de ocho pozos geotérmicos mediante diferentes herramientas de gráfico y editores de texto, p. ej., GRACE y SciTE para determinar la *feed zone*.
- Elaborar y calibrar de un modelo numérico en condiciones de estado natural basado en perfiles de presión y temperatura.
- Determinar la dirección de flujo dentro del campo geotérmico observando en los mapas de contorno el gradiente de presión y temperatura.
- Estimar la caída de presión y de temperatura del reservorio para 80 años de explotación.

1.5. Zona de estudio

La zona de estudio fue proporcionada por personal de LaGeo S. A. de C. V., sin embargo por motivos de confidencialidad con la empresa todas las coordenadas fueron eliminadas o renombradas para el presente trabajo. Los datos eliminados y/o modificados consisten en las coordenadas, nombres de las plataformas y nombres de los pozos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Trabajos previos

Desde años atrás, diversos artículos han sido escritos para detallar y demostrar la funcionalidad de los modelos numéricos en la representación y simulación de procesos físicos en subsuelos con potencial geotérmico.

En un estudio realizado por Battistelli *et al.* (1995) se ilustran mediante el simulador numérico TOUGH2, los efectos de la reducción de la presión de vapor debido al contenido de sales y la presión de succión en la descarga de un yacimiento geotérmico de vapor dominante. Igualmente, los autores muestran el método usado para modelar la reducción de la presión de vapor. La ecuación de balance de masa usada por TOUGH2 se describe de la siguiente forma:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^{(k)} dV = \int_{\Gamma_n} F^{(k)} * n d\Gamma + \int_{V_n} Q^{(k)} dV$$

Donde $k=1, 2, 3$ en las ecuaciones de estado indica agua, NaCl y gases no condensables, respectivamente.

El modelo consistió en un bloque de roca, con una longitud de 50 m de lado. Este bloque se asumió rodeado por fracturas con un volumen de 10^{-4} . Las siguientes propiedades fueron asignadas al modelo: permeabilidad de la matriz $5 \times 10^{-18} \text{ m}^2$, porosidad 5%, densidad 2600 kg/m^3 , calor específico $920 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ y conductividad térmica de $2.51 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. El reservorio se asumió de dos fases con una saturación de líquido del 80% en la matriz del bloque y una temperatura de 240°C .

La simulación de la reducción de permeabilidad fue simulada, presentando seis casos con distintas concentraciones de sal. En general, Battistelli *et al.* (1995) observaron un comportamiento diferente en función de la concentración inicial de sales, siendo mayor o menor que un valor límite debido a la precipitación de éstas.

Estudios más recientes han seguido demostrando la efectividad de los modelos numéricos en ambientes geotérmicos. En un artículo escrito por Bailling *et al.* (2016), se puntualizaron los principales elementos usados para el desarrollo de un modelo numérico 3D de subsuelo en la zona costera de Dinamarca. El objetivo planteado por Bailling *et al.* (2016) fue el de elaborar una actualización del potencial geotérmico de la zona y sus perspectivas de utilización. En la zona de estudio, los autores identificaron cinco unidades litológicas con potencial geotérmico. Un elemento fundamental para la elaboración del modelo geotérmico fue resolver la ecuación de calor, la cual fue establecida de la siguiente manera:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + H$$

Donde “ T ” es la temperatura, “ t ” es el tiempo, “ ρ ” es la densidad, “ k ” es la conductividad térmica, “ H ” es la tasa de generación de calor y “ x ”, “ y ” y “ z ” son las tres variables espaciales.

Para resolver la ecuación de calor, los autores utilizaron una versión de MODFLOW, el cual es un simulador de flujo por diferencias finitas para agua subterránea. La calibración de

parámetros (principalmente conductividad térmica de las unidades litológicas) fue realizada con el software PEST.

Como resultado, los autores lograron la elaboración de un modelo capaz de representar la temperatura de la zona con gran exactitud, teniendo diferencias en 1-2°C, con máximos de hasta 4°C, entre los valores modelados y los medidos. Debido a la reducción significativa de porosidad y permeabilidad a profundidad, la zona interés geotérmico fue establecida a profundidades entre 2500-3000 m. Las principales diferencias fueron observadas en áreas con estructuras complejas, p. ej., límites estructurales.

En un trabajo escrito por Vega *et al.* (2016), se presentó una metodología para llevar a cabo una simulación numérica mediante el uso de TOUGH2 para un yacimiento geotérmico. Como primer paso, con el fin de establecer las características principales del yacimiento, los autores realizaron un estudio de la información geológica, geoquímica y geofísica disponible, p. ej., distribución de presión y temperatura, dimensiones, límites y áreas de descarga. Posteriormente, se utilizó el método volumétrico para estimar las reservas energéticas del campo bajo estudio. Finalmente, con el fin de completar el estudio, los autores utilizaron el método probabilístico Monte Carlo.

Para la construcción del modelo, los autores recurrieron al lenguaje de programación Python para la escritura de *scripts*. Con ellos, procedieron a la elaboración de rejillas irregulares. El modelo propuesto por Vega *et al.* (2016) cuenta con 12 capas irregulares, las cuales cuentan con 141 elementos cada una. A éste, se le realizó una discretización en superficie, dando lugar a una malla de polígonos irregulares. Posteriormente, se hizo una discretización a profundidad para generar capas.

Para la representación y calibración del estado natural del modelo, los autores establecieron 280 mil años de simulación. La ubicación de la fuente de calor (180 J/s) y la descarga ($0.70 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}/\text{kg}/\text{cm}^2$) se ubicaron basados en el modelo geoquímico del campo. Con el ajuste del estado inicial, se obtuvo una idea de la distribución de permeabilidades en el sistema. Para la representación y calibración del estado de producción, los autores crearon una serie de datos sintéticos. En esta etapa, uno de los parámetros más importantes es la permeabilidad, ya que cambios en ésta pueden modificar presiones y entalpías. El modelo fue calibrado por un periodo de 40 años, asignando valores de extracción y reinyección de 209 kg/s y 166 kg/s, respectivamente.

Posteriormente, los autores pudieron construir y calibrar un modelo en estado natural.

Finalmente, se usaron datos sintéticos de producción para calibrar el estado dinámico y poder simular la despresurización del yacimiento geotérmico estudiado.

2.2. TOUGH2

TOUGH2 es un programa de simulación numérica para flujo de calor bifásico y fluidos multicomponentes en medios porosos y fracturados. Sus principales áreas de aplicación son en la ingeniería de reservorios, estudios para la disposición de desechos tóxicos, evaluación ambiental y remediación, así como para simulación de flujo y transporte en medios saturados y acuíferos (Pruess, Oldenburg, & Moridis, 1999).

El simulador numérico TOUGH2 se compone de un número de unidades funcionales con interfaces flexibles. El código original de TOUGH2 de 1991 contenía cinco Ecuaciones De Estado (EOS por sus siglas en inglés), las cuales incluían los módulos para aplicaciones geotérmicas y desechos nucleares. Posteriormente, una nueva versión fue creada con mayor

número de módulos (Pruess, Oldenburg, & Moridis, 1999). En la Tabla 2.1 se muestran las EOS y su aplicación:

Tabla 2.1. Ecuaciones de estado (EOS) disponibles en TOUGH2 (Pruess, Oldenburg, & Moridis, 1999).

Módulo	Aplicación
EOS1	Agua / agua con trazador
EOS2	Agua / CO ₂
EOS3	Agua / aire
EOS4	Agua / aire con disminución de presión de vapor
EOS5	Agua / hidrógeno
EOS7	Agua, salmuera, aire
EOS7R	Agua / salmuera / aire / radionúclidos padre-producto
EOS8	Agua / gases no condensables
EOS9	Flujo isotérmico con saturación variable de acuerdo a la ecuación de Richards
EWASG	Agua / sal / gases no condensables

La ecuación de balance de masa y energía aplicada por TOUGH2 para la resolución de problemas se describe de la siguiente forma:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^k dV_n = \int_{\Gamma_n} F^k * n d\Gamma_n + \int_{V_n} q^k dV_n$$

La integración se realiza sobre un subdominio arbitrario V_n del flujo del sistema bajo estudio. Éste se encuentra limitado por una superficie cerrada Γ_n . La variable M representa la masa o energía por volumen, donde se tiene $k = 1, \dots, NK$ representa los componentes de masa, p. ej., agua, aire, H₂, solutos, etc. y $k = NK + 1$ representa la componente del calor. La variable F representa el flujo de masa o calor y q representa las fuentes o sumideros en el modelo (Pruess, Oldenburg, & Moridis, 1999).

La ecuación anterior es discretizada en espacio mediante el método diferencial de integración finita (Edwards, 1972; Narasimhan & Witherspoon, 1976 citados en Pruess, Oldenburg, & Moridis, 1999) como se muestra a continuación:

$$\int_{V_n} M dV = V_n M_n$$

Donde M se define como una cantidad extensiva de volumen y M_n es un promedio de M sobre V_n .

Las integrales de superficie se definen como la suma de promedios sobre segmentos de superficie A_{nm} :

$$\int_{\Gamma_n} F^k * n d\Gamma = \sum_m A_{nm} F_{nm}$$

Donde F_{nm} es el valor promedio de la componente normal F sobre el segmento de superficie A_{nm} entre los elementos de volumen V_n y V_m .

En la Figura 2.1 se muestran tanto la discretización empleada por el método diferencial de integración finita, así como la definición de los parámetros geométricos.

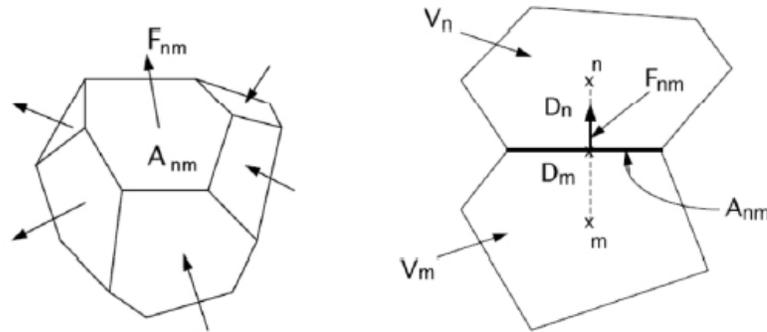


Figura 2.1. Esquema de discretización de un elemento (Pruess, Oldenburg, & Moridis, 1999).

3. METODOLOGÍA

El modelamiento numérico se realizó de acuerdo a las siguientes actividades:

3.1. Instalación de software e implementación de directorios de archivos

Instalación del sistema operativo de código abierto Ubuntu 19.04. Para ello, se descargó un archivo ISO, el cual es una imagen autoejecutable para instalar el sistema operativo Linux. La descarga se realizó directamente de la página: <https://ubuntu.com/download/desktop>.

El sistema operativo sirvió de base para correr las herramientas de pre- y post-procesamiento necesarias para generar el modelo numérico (Tabla 3.1)

Fue necesaria la elaboración de scripts desarrollados en lenguaje de programación Python (Tabla 3.2) enfocados a la edición y representación espacial de los datos ingresados para su posterior evaluación.

Tabla 3.1. Librerías y aplicaciones básicas para generar el modelamiento numérico, entre otras operaciones.

Programa	Descripción	Página web
----------	-------------	------------

SciTE	Editor para programadores.	https://www.scintilla.org/SciTE.html
GRACE o xmgrace	Aplicación para gráficos 2D.	http://plasma-gate.weizmann.ac.il/Grace/
Python 2.7. Interprete Python básico	Python 2.7. Interprete Python básico.	https://www.python.org/
Matplotlib, SciPy y NumPy	Librería científica y numérica para realizar gráficos 2d y 3d de Python.	https://www.scipy.org/
OpenDx o dx explorer	Visualizador 3D.	
g3data	Digitalizador de imágenes.	https://directory.fsf.org/wiki/G3data
Sqlite3	Base de datos portátil.	https://www.sqlite.org/index.html
iapws	Aplicación básica de interfase Python para calcular las propiedades del agua, vapor y soluciones acuosas.	https://iapws.readthedocs.io/en/latest/
itough2	Lenguaje numérico para el modelamiento de procesos físicos en el subsuelo.	https://tough.lbl.gov/software/itough2-software/

Tabla 3.2. Scripts necesarios para la edición y visualización del modelo numérico. Modificado de (Vega Castro, Luévano García, & Henríquez Ortiz, 2016)

Script	Entrada	Salida
md2pxyzv	Registro de perforación, archivo con profundidades del pozo.	<i>*.dat</i>
info_model.py	Extensión del modelo, imagen de fondo, espaciamento de los puntos lejanos, tipos de roca.	
gen_punto_lejos.py	Información en <i>info_model.py</i>	<i>puntos_lejos.dat</i>
poligonos_capa1.py	<i>puntos_lejos.dat, pozos_coord_feedzone.dat</i>	<i>*.png</i>
modelo_capas.py	<i>puntos.agr</i>	<i>conne, eleme</i>
rocas_capa.py	<i>rocas.xls</i>	<i>*.png</i>
inserte_rocas.py	Información en <i>info_model.py, rocas.xls</i>	<i>eleme_t2</i>
vea_cal_pt_nat.py	<i>nat00.out</i>	<i>*.png</i>
vea_mapa_pt_modelo.py	<i>nat00.out</i>	<i>*.png</i>
vea_evol_pt_nat.py	<i>nat00.out, prod0.out</i>	<i>*.png</i>
flujo2t2.py	Pozos de producción e inyección con flujo de masa total	<i>prod_t2</i>
vea_mapa_pt.py	Registros de pozos	<i>*.png</i>

Para el uso de los *scripts*, fue necesaria la creación de los siguientes directorios donde se almacenaron los archivos de entrada y salida de información:

```
~/bin
~/nombre_campo/doc
~/nombre_campo/flujo
~/nombre_campo/form_pt
```

~/nombre_campo/modelo
~/nombre_campo/rejilla
~/nombre_campo/script

En el directorio *~/bin* se copiaron los siguientes archivos o programas:

- *agr2puntos.py*
- *amesh*
- *flujo2t2.py*
- *hola*
- *itough2*
- *md2pxyzv*
- *prista*
- *puntos2poligonos.sh*

Posteriormente, en el directorio *~/nombre_campo/form_pt* se copiaron los registros de pozos.

Finalmente, en el directorio *~/nombre_campo/script* se copiaron los siguientes archivos o programas:

- *extrac_tf.py*
- *gen_puntos_lejos.py*
- *info_model.py*
- *info_model.pyc*
- *inserte_rocas.py*
- *modelo_capas.py*
- *poligonos_capa1.py*
- *rocas2modelo.py*
- *rocas_capa.py*
- *tiempo_rec.py*
- *vea_cal_pt_nat.py*
- *vea_evol_pt_nat.py*
- *vea_mapa_pt.py*
- *vea_mapa_pt_modelo.py*

3.2. Evaluación del modelo geológico conceptual

La representación del modelo numérico se basó en la geología de la zona. El perfil geológico original del campo estaba compuesto de cuatro unidades; sin embargo, las siguientes modificaciones fueron hechas:

- La primera unidad no fue tomada en cuenta debido a su poco espesor.
- La unidad que representa el reservorio fue dividida en dos, esto para representar la *steam cap* y el reservorio.
- Se agregó la unidad 5 para representar el basamento.

El resultado de las modificaciones se muestra en la Figura 3.1.

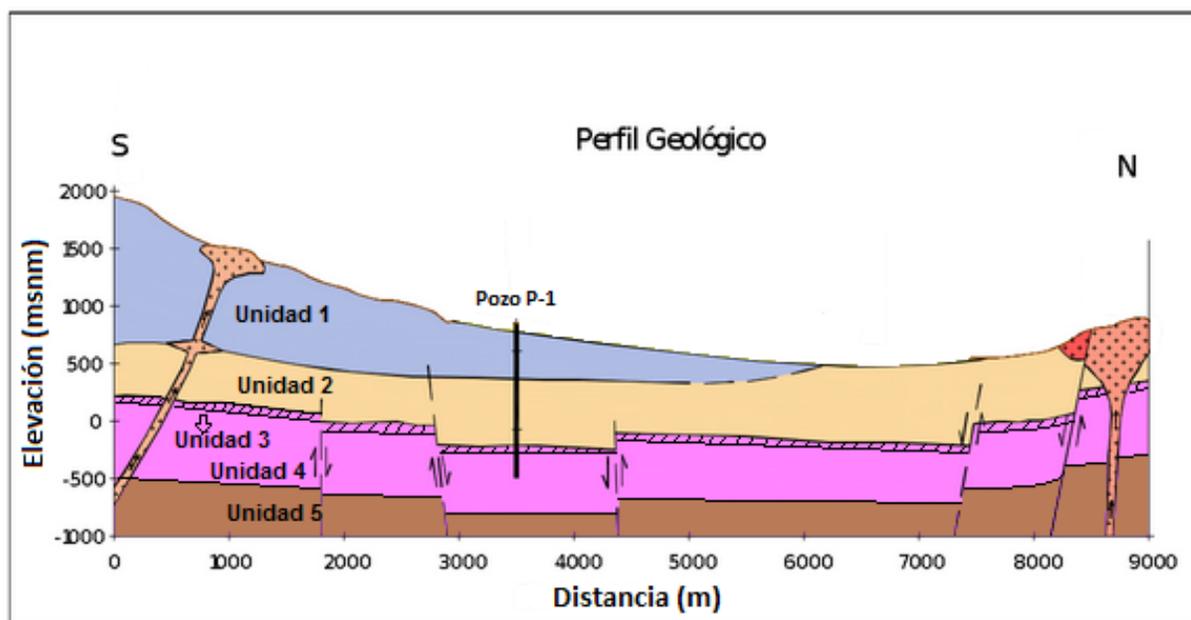


Figura 3.1. Perfil geológico del campo geotérmico en estudio.

La elevación del pozo P-1 fue tomada como referencia para medir los espesores de las unidades. Los límites y profundidades se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Límites de las unidades geológicas

ID	Capas del modelo geotérmico	Cima (m.s.n.m.)	Base (m.s.n.m.)	Centroide (m.s.n.m.)	Espesor (m)
Unidad 1	Capa superficial	734	360	547	374
Unidad 2	Capa sello	360	-202	79	562
Unidad 3	Steam cap	-202	-252	-222	50
Unidad 4	Reservorio	-252	-952	-602	700
Unidad 5	Basamento	-952	-1452	-1202	500

3.3. Construcción de rejillas regulares e irregulares, archivos para adicionar en la entrada de datos para el TOUGH2 y visualización de resultados

Se creó un manual para el uso de los scripts que se puede observar en el Apéndice A.

3.4. Creación del archivo de entrada para la simulación en estado natural del reservorio

En el directorio `~/nombre_campo/modelo` se generó el archivo `nat00` (Figura 3.2). Este archivo contiene ciertos parámetros que guiaron la simulación.

Los parámetros modificados fueron los siguientes:

- En la entrada ROCKS, se asignaron las propiedades de cada una de las capas: densidad, porosidad, permeabilidad (x, y, z), conductividad térmica y capacidad calorífica.
- En la entrada PARAM se asignó el tiempo de la simulación para llegar a condiciones de equilibrio.
- En la entrada ELEME se tomó el archivo *eleme_t2* del directorio *~/nombre_campo/rejilla* y se copiaron sus datos.
- En la entrada CONNE se tomó el archivo *conne* del directorio *~/nombre_campo/rejilla* y se copiaron sus datos.
- Finalmente, en la entrada GENER se definieron las celdas de entrada y salida de flujo, la cantidad de flujo másico, la entalpia y el espesor de las celdas.

```

ROCKS      Kg/m3      POR      kx  m3      ky  m3      kz  m3      W/m C      J/Kg C
rock1      2650.00      0.10     100.E-17   100.E-17   100.E-17   2.00     850.0
rock2      2650.00      0.10     80.E-18    80.E-18    80.E-18    2.00     850.0
rock3      2650.00      0.10     60.E-16    60.E-16    60.E-16    2.00     850.0
rock4      2650.00      0.10     40.E-15    40.E-15    40.E-15    2.00     850.0
rock5      2650.00      0.10     20.E-20    20.E-20    20.E-20    2.00     850.0

PARAM-----1-----v-123456789012345678901234 <-MOP --5-----v-----6-----v-----7-----v-----8
29999      9999000000000000000000000000400005000
0.00000E00 8.8530E12      -1.          XD0 1          9.78150
          1.E-9      1.E2      1.E4
          1.0e5          30.0

START
RPCAP-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
3      .30      .05
1          1.

ELEME
XA001      rock1 5.636e+07
XA002      rock1 3.466e+07
XA003      rock1 1.047e+08

CONNE
XE086XE087      1 1.000e+03 1.000e+03 2.500e+06
XE087XE088      1 1.000e+03 1.000e+03 2.500e+06

GENER-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
XD032sou 1          MASS      80.E+0      1100.E3
XD024ext 1          3      DELV      0.70E-11          700.
XC024ext 1          DELV      0.70E-11          50.
XBC24ext 1          DELV      0.70E-11      20.E5      562.

ENDCY

```

Figura 3.2. Archivo de entrada nat00 para las simulación en estado natural.

3.5. Simulación numérica del sistema geotérmico en estado natural con TOUGH2

En la línea de comando se ejecutó *itough2 fi nat00 1*, donde *nat00* es el archivo de entrada y *1* corresponde al número de la EOS. Obteniendo por resultado el archivo *nat00.out* (Figura 3.3), éste incluye datos de salida que se presentan en el Apéndice B.

Los ajustes fueron realizados en el archivo *nat00*.

```

ROCKS      Kg/m3      POR      kx m3      ky m3      kz m3      W/m C      J/Kg C
rock1      2650.00      0.10     100.E-17   100.E-17   100.E-17   2.00       850.0
rock2      2650.00      0.10     80.E-18    80.E-18    80.E-18    2.00       850.0
rock5      2650.00      0.10     20.E-20    20.E-20    20.E-20    2.00       850.0

PARAM-----1-----v-123456789012345678901234 <-MOP --5-----v-----6-----v-----7-----v-----8
29999      9999000000000000000000000400005000
0.00000E00 1.89345e9      -1.          XD0 1          9.78150
          1.E-9      1.E2      1.E4
          1.0e5          30.0

START
RPCAP-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
3          .30          .05
1          1.

ELEM
XA001      rock1 5.636e+07

CONNE
XA001XA029      1 1.904e+02 1.904e+02 1.262e+05

GENER-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
XD032sou 1          MASS      80.E+0      1100.E3
XD024ext 1          3      DELV      0.70E-11          700.
XC024ext 1          DELV      0.70E-11          50.
XBC24ext 1          DELV      0.70E-11      20.E5      562.

XD006SVA05      22      MASS
0.0000000e+00 3.1622400e+07 6.3158400e+07 9.4694400e+07
2.2090752e+09 2.5246080e+09
-4.4000000e+01-4.4000000e+01-4.4000000e+01-4.4000000e+01
-4.4000000e+01-4.0000000e+00

INCON5 - INITIAL CONDITIONS FOR 440 ELEMENTS AT TIME 0.885300E+13
XA0 1          0.10000000E+00
0.1293063491439E+07 0.2055160283746E+03

ENDCY

```

Figura 3.4. Archivo de entrada *prod0* para las simulación en estado dinámico.

3.8.2. Calibración de la historia de producción

La calibración de la historia de producción se realiza después de haber logrado reproducir el modelo numérico en estado natural. Durante esta etapa se considera que el parámetro de mayor importancia para lograr un ajuste sigue siendo la permeabilidad; sin embargo, otros parámetros también pueden ser modificados (Antúnez, 1996). El ajuste de historia se lleva a

cabo reproduciendo alguna de las siguientes curvas: presión vs temperatura, entalpía vs temperatura, caudales vs temperatura o nivel piezométrico vs temperatura.

4. RESULTADOS

La discretización de un modelo consiste en la subdivisión de un sistema finito en un número determinado de bloques, los cuales estarán regidos por ecuaciones que definirán los procesos físicos que ocurran dentro de ellos. En la Figura 4.1 se muestra la discretización realizada al modelo. En ella, se observa el mallado irregular aplicado en la zona de interés (puntos cercanos) y el mallado regular usado en la zona alejada del reservorio (puntos lejanos). Por otra parte, en la Figura 4.2 se muestra el tipo de roca asignada en la capa 4, la cual corresponde a la capa D o reservorio.

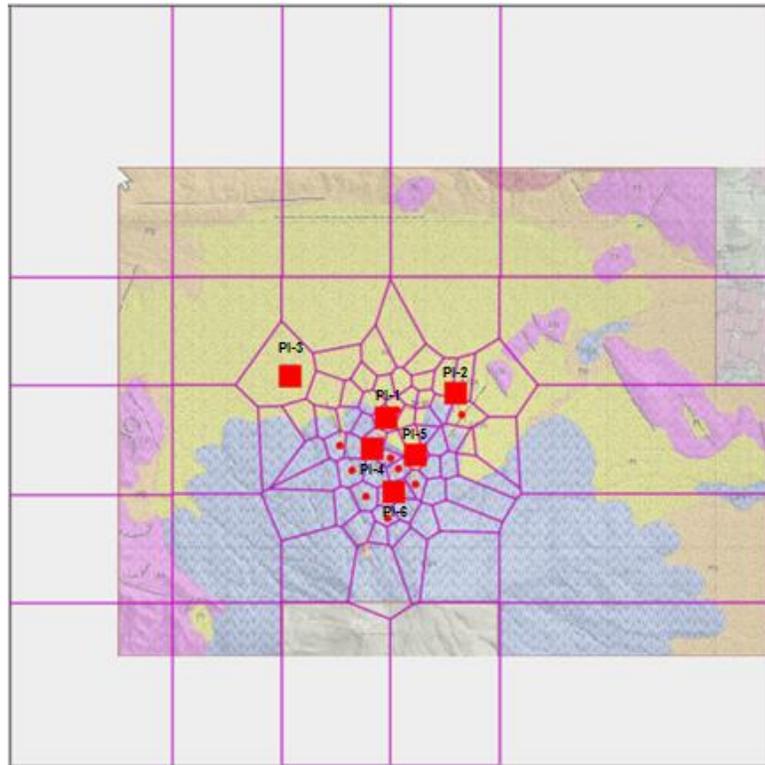


Figura 4.1. Discretización del modelo numérico.

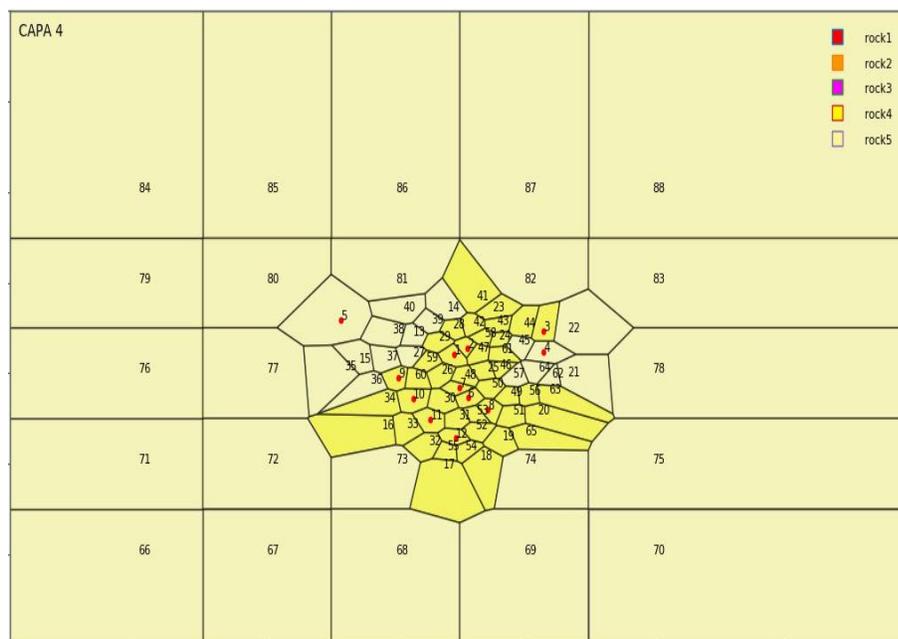


Figura 4.2. Rocas asignadas a la capa del reservorio.

Los mapas de isotermas e isobaras dentro del reservorio fueron realizados basándose en los registros de pozos. Los resultados se muestran en la Figura 4.3 y la Figura 4.4 respectivamente.

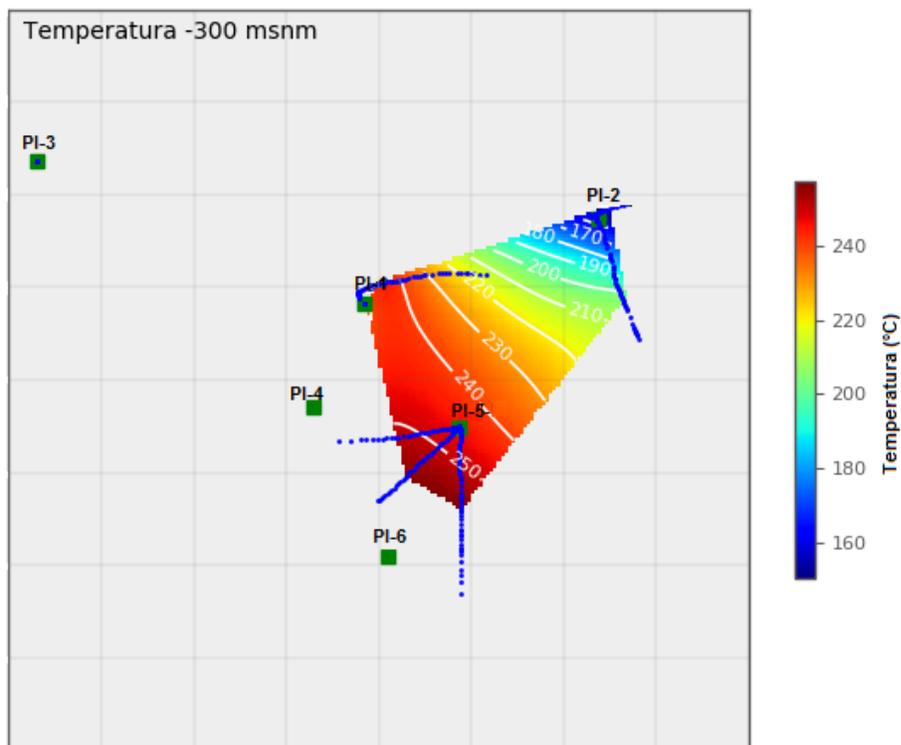


Figura 4.3. Distribución de isotermas a -300 m.s.n.m.

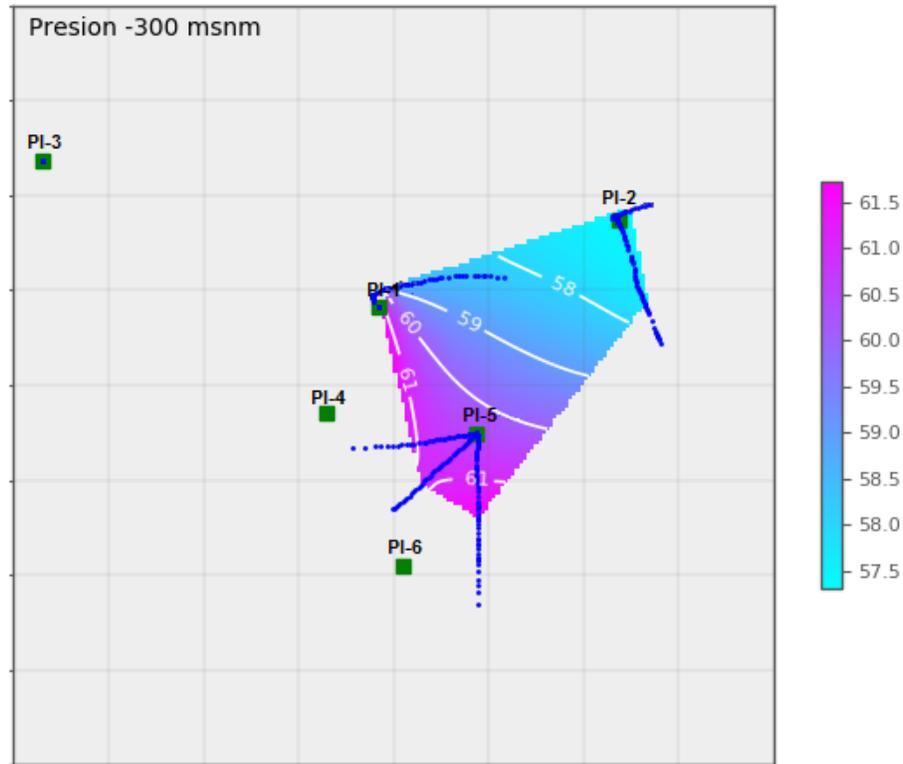


Figura 4.4. Distribución de isobaras a -300 m.s.n.m.

Las propiedades ingresadas al modelo se verifican mediante la calibración del estado natural. En la Figura 4.5 se muestran las calibraciones de presión y temperatura hechas a los ocho pozos ubicados en el área de estudio.

En la calibración de un modelo en estado natural, no existe una regla sobre el tiempo que se debe simular para obtener condiciones estables. El modelo fue simulado por 280 mil años, su resultado se muestra en la Figura 4.6.

Para la simulación del modelo dinámico se tomaron los valores de la Tabla 4.1, la que muestra los valores de producción y de inyección de los pozos del campo, así como la presión de separación de cada uno de ellos.

En la Figura 4.7 se muestra la despresurización a causa de la explotación, así como las ligeras variaciones de temperatura a lo largo de los 80 años de simulación.

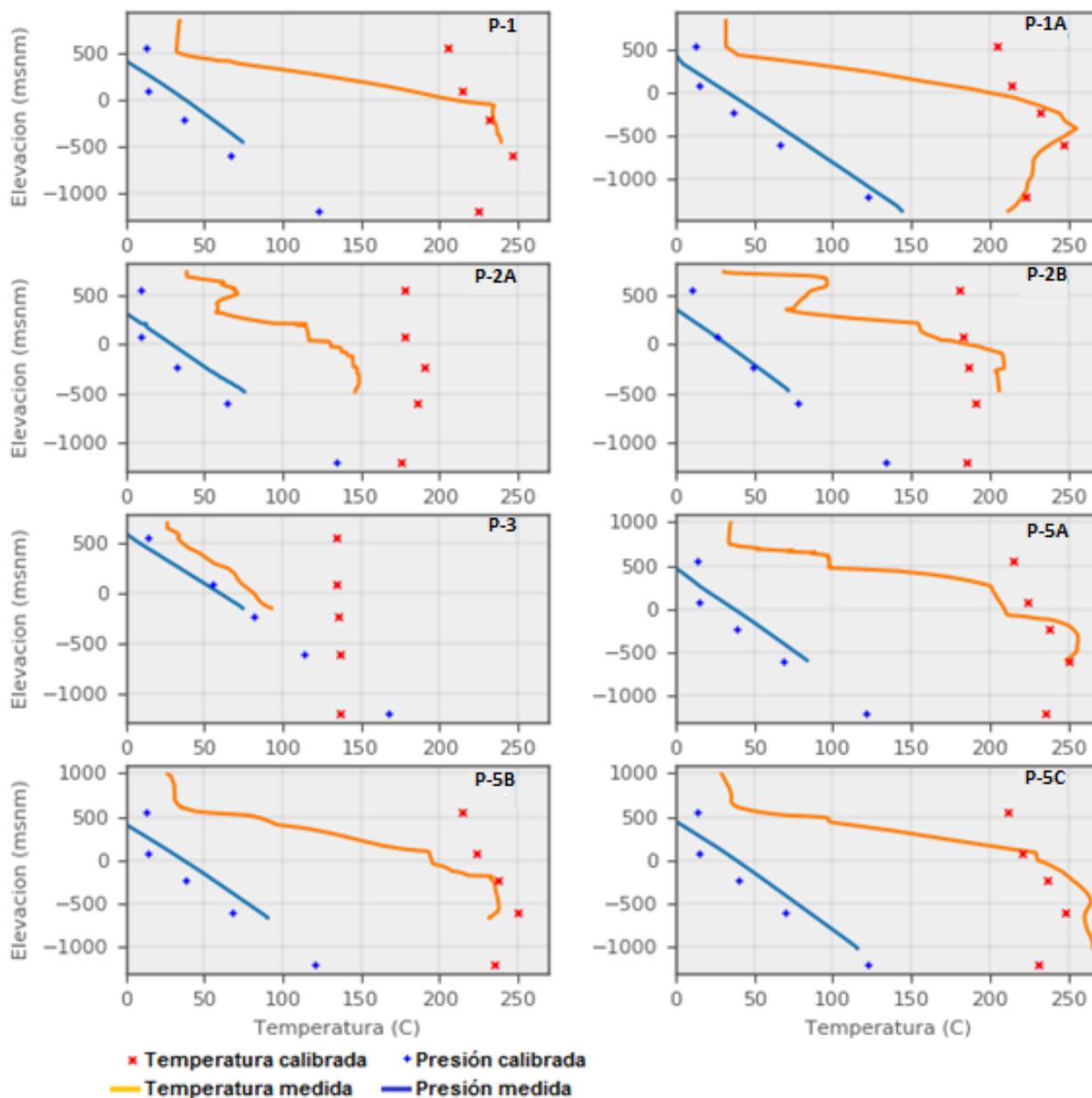


Figura 4.5. Calibración de presión y temperatura del modelo en estado natural.

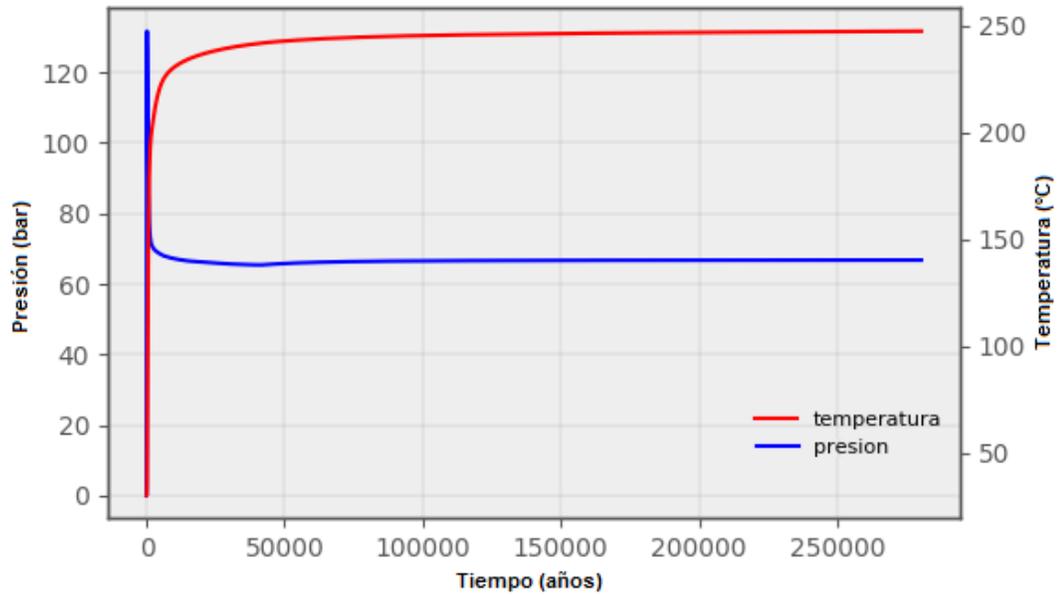


Figura 4.6. Evolución del estado natural del modelo numérico.

Tabla 4.1. Datos de presión de separación y producción de pozos productores e inyectores.

Pozo	Tipo	Presión de separación (bar)	Vapor (kg/s)	Agua (kg/s)	Total (kg/s)
Productores					
P-5A	Prod	9	18	26	44
P-5B	Prod	9	10	20	30
P-5C	Prod	9	10	20	30
P-4A	Prod	9	8	20	28
P-4B	Prod	9	8	20	28
P-6A	Prod	9	8	20	28
P-6B	Prod	9	8	20	28
Total	-	-	70	146	216
Inyectores					
P-2A	Iny	nd	0	50	50
P-2B	Iny	nd	0	50	50
P-2C	Iny	nd	0	50	50
Total			0	150	150

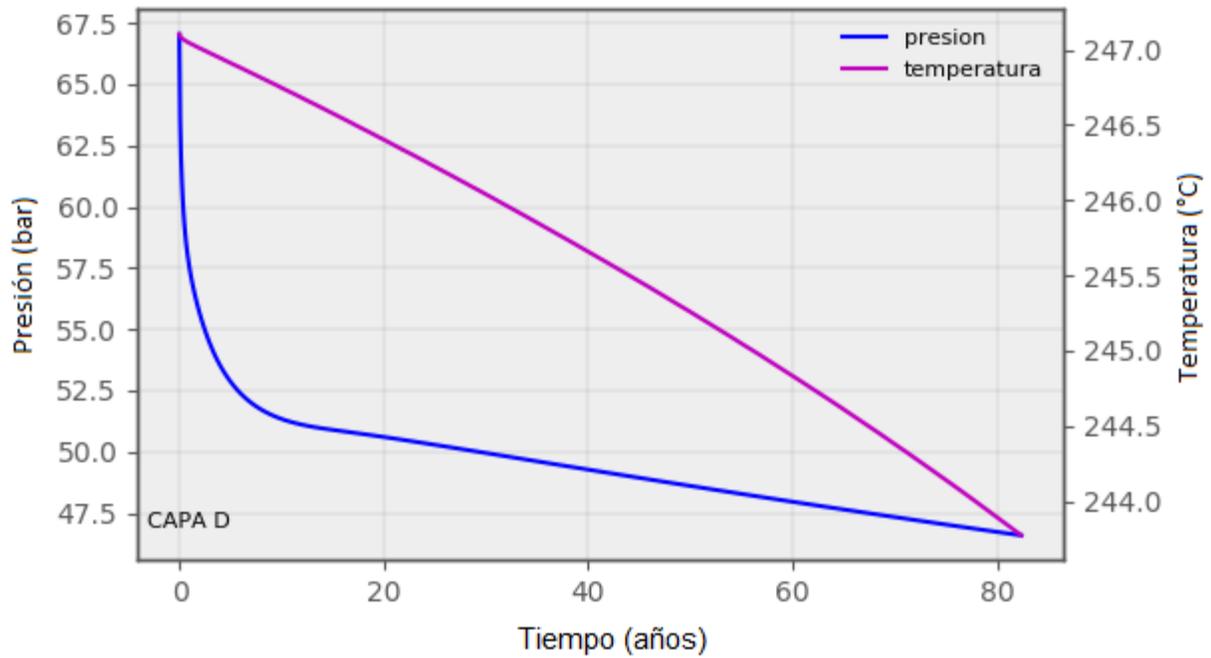


Figura 4.7. Evolución del estado dinámico del modelo numérico.

A continuación, en la Figura 4.8 y la Figura 4.9 se muestran los mapas de isotermas en la unidad del reservorio tanto en *estado natural*, como en estado dinámico, respectivamente.

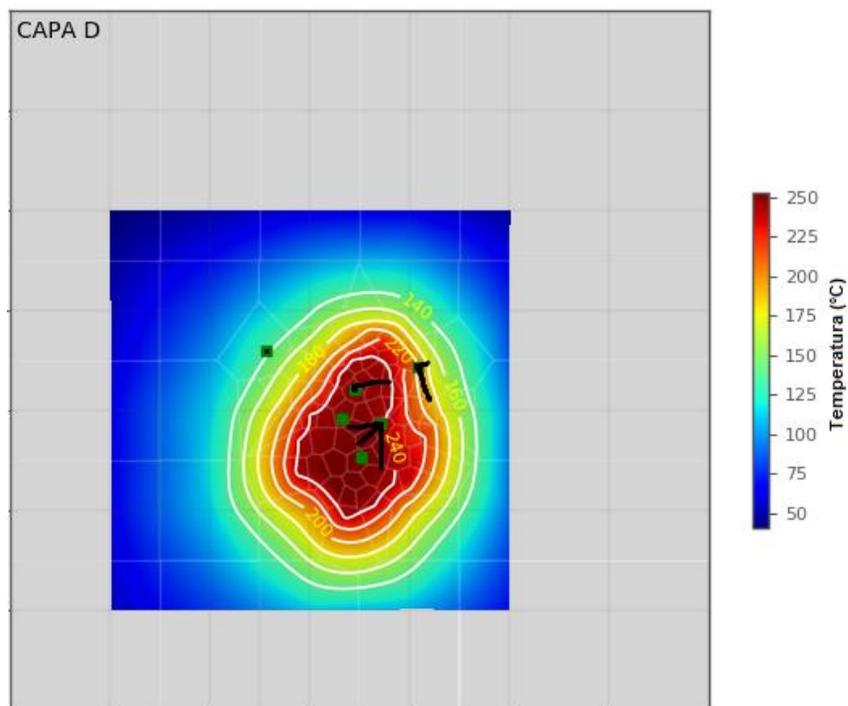


Figura 4.8. Distribución de isotermas dentro del reservorio en condiciones estado natural.

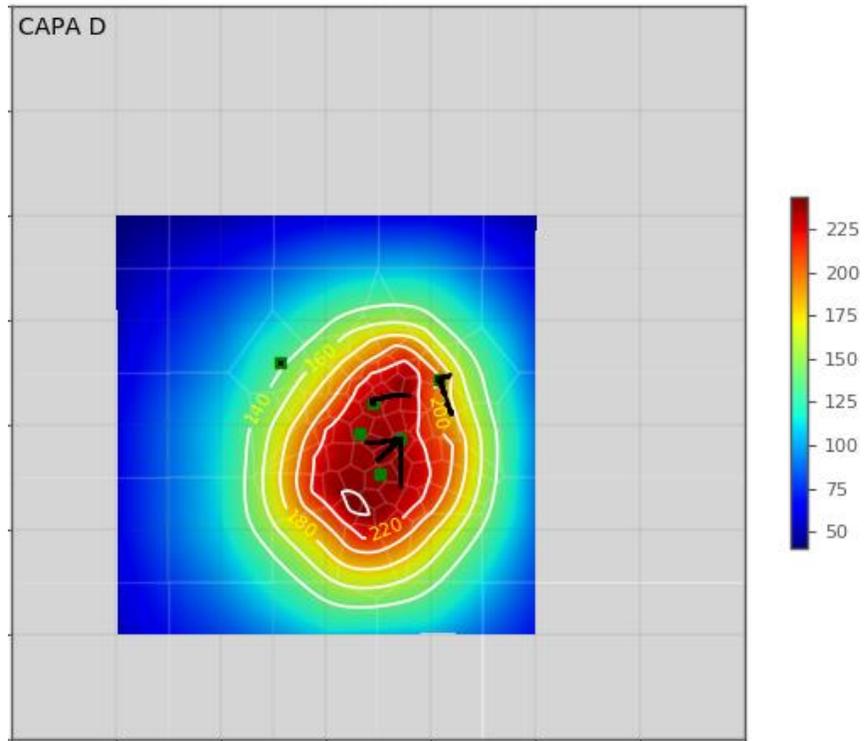


Figura 4.9. Distribución de isotermas dentro del reservorio en estado dinámico.

En la Figura 4.10 y la Figura 4.11 se muestran los mapas de isobaras dentro de la unidad del reservorio tanto en *estado natural*, como en estado dinámico, respectivamente.

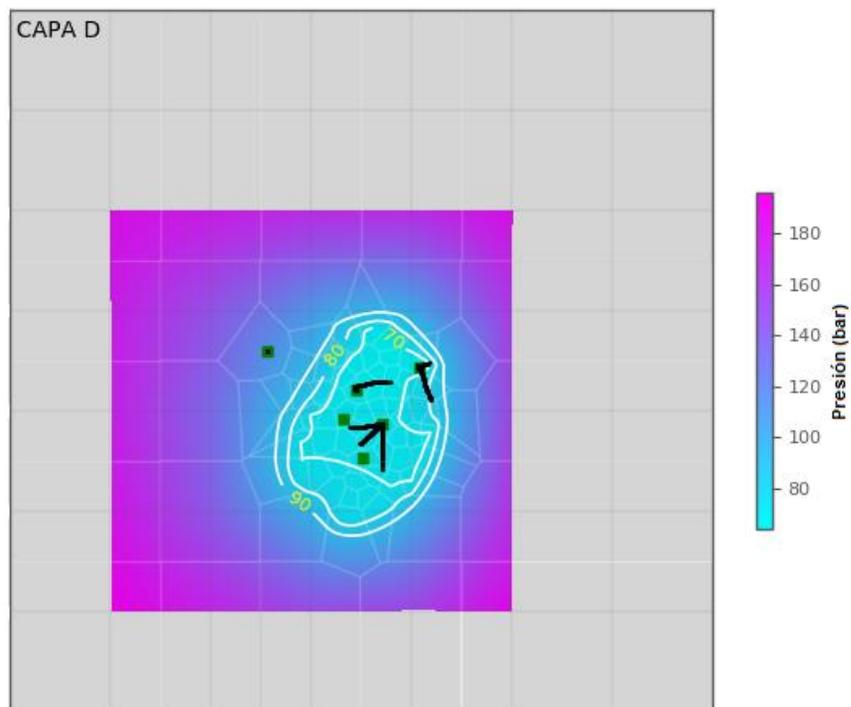


Figura 4.10. Distribución de isobaras dentro del reservorio en condiciones estado natural.

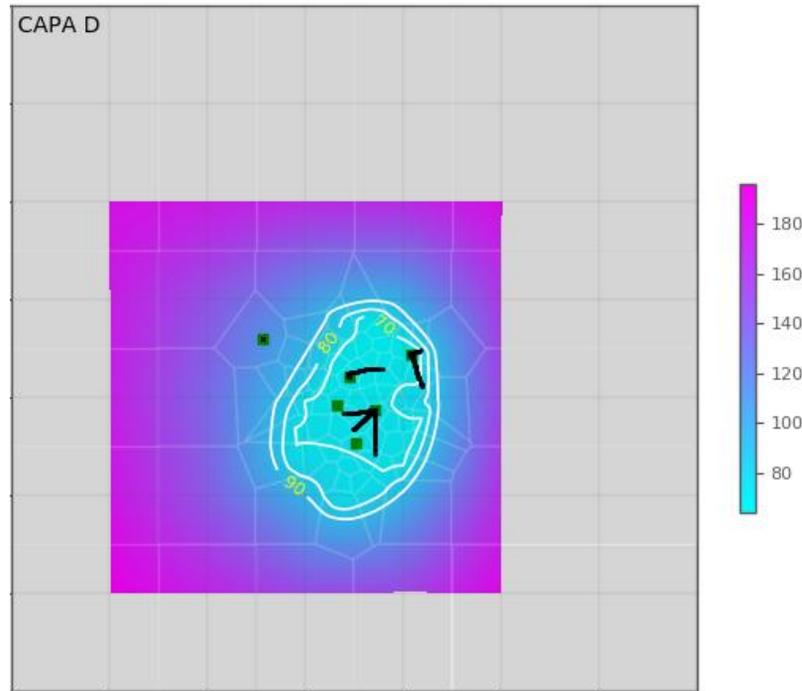


Figura 4.11. Distribución de isobaras dentro del reservorio en estado dinámico.

5. DISCUSIÓN

Se debe resaltar que algunas variaciones fueron hechas al modelo geológico original con el fin de tener una mejor representación del modelo numérico. Sin embargo, los espesores de las unidades litológicas sí representan los datos originales.

Para realizar la calibración del modelo estático únicamente fue necesario realizar ajustes en los valores de permeabilidad en las direcciones x, y, z, tal como se describe en Antúnez (1996). Esto se debe a la buena representación hecha para la zona central del modelo.

En lo que respecta a los pozos P-2A y P-3, se sobreestimaron las temperaturas simuladas con respecto a los valores medidos en los registros de pozos (ver Figura 4.5). Esto en parte se debió a que dichos pozos se encuentran en la región exterior de la zona de interés, lo que no permitió lograr un mejor ajuste.

A pesar de que la calibración en estado natural fue hecha por 280 mil años, ésta alcanzó condiciones de estabilidad en los primeros años (ver Figura 4.6). Esto se debió a la buena representación del modelo numérico.

Haciendo un análisis de la calibración del modelo dinámico, se observó despresurización y una ligera disminución de temperatura con el tiempo dentro de la zona de interés. Sin embargo, la variación de temperatura es mínima y la despresurización puede ser contrarrestada con una correcta reinyección al sistema geotérmico. Por lo tanto, se consideró como una buena calibración del estado natural lo que permitió mantener condiciones aceptables en producción.

6. CONCLUSIONES

- En el Capítulo 4 se presentó el modelo numérico generado con TOUGH2, por lo que el objetivo general se cumplió satisfactoriamente.
- Después de analizar los registros de presión y temperatura se concluyó que la *feed zone* se encuentra entre 200 y 400 m.b.n.m..
- El modelo fue calibrado con los perfiles de presión y temperatura, lo cual permitió realizar predicciones del comportamiento del campo geotérmico en el tiempo.
- Basado en el mapa de contornos de presión se pudo inferir la dirección de flujo dentro del reservorio (capa D), la cual tuvo una dirección SO-NE.
- La caída de presión observada en la celda XD001 fue de aproximadamente 21 bares durante los 80 años de explotación, en cambio la temperatura mostró un comportamiento más estable disminuyendo 3°C aproximadamente.

7. REFERENCIAS

- Antúñez, E. (1996). *Curso de entrenamiento al personal de GEOCEL en el uso del simulador numérico de yacimientos THOUGH2*. Santa Tecla: LaGeo S.A. de C.V.
- Balling, N., Poulsen, S. E., Fuchs, S., Mathiesen, A., Bording, T., Nielsen, S. B., & Nielsen, L. H. (2016). Development of a numerical 3D geothermal model for Denmark. *Proceedings European Geothermal Congress*, (págs. 19-24). Strasbourg.
- Battistelli, A., Calore, C., & Pruess, K. (1995). Vapor pressure lowering effects due to salinity and suction pressure in the depletion of vapor-dominated geothermal reservoirs. *In Proceedings, TOUGH Workshop*, (págs. 77-83).
- Bundschuh, J., & Suarez, M. C. (2010). *Introduction to the numerical modeling of groundwater and geothermal systems: fundamental of mass, energy and solute transport in poroelastic rocks*. CRC Press.
- Lima, E., Tokita, H., & Hatanaka, H. (2013). Reservoir engineering in geothermal fields, *Renewable Energy Systems*. 1397-1421.
- Pruess, K., Oldenburg, C., & Moridis, G. (1999). *TOUGH2 User's Guide, Version 2.0*. California: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California.
- Vega Castro, E. L., Luévano García, G., & Henríquez Ortiz, R. A. (2016). *Metodología de simulación numérica de un yacimiento geotérmico por medio de TOUGH2*. El Salvador: Universidad de El Salvador.

8. APÉNDICES

Apéndice A. Uso de scripts para la construcción de rejillas regulares e irregulares, archivos para adicionar en la entrada de datos para el TOUGH2 y visualización de resultados

Corregir profundidades de los pozos desviados

Se requirió de los siguientes archivos de entrada ubicados en el directorio `~/nombre_campo/form_pt`:

- Registros de los pozos desviados. Estos archivos contienen la ubicación del pozo, la desviación del mismo con respecto a la coordenada inicial en función de la profundidad y las diferentes mediciones realizadas, p. ej., presión, temperatura, entre otras (Figura 8.1).
- Archivos de cada uno de los pozos que contengan las profundidades del pozo en una columna y un parámetro cualquiera, p. ej., una columna con el numero 10 (Figura 8.2).

```
prof[mMD] dyNorth[m] dxEast[m]
xyz 000000.00 000000.00 839.7
zapata 1217
0 0 0
101.00 1.54 0.00
352.00 11.40 0.00
501.00 21.47 0.00
597.00 25.78 -3.66
600.00 25.78 -3.89
609.00 25.84 -4.60
629.00 26.06 -6.20
657.00 26.97 -8.79
690 29.88 -11.66
719 33.58 -12.8
749 37.07 -12.15
776 39.54 -10.1
```

Figura 8.1. Registro de pozo desviado.

```
0 10
101.00 1
352.00 1
501.00 1
597.00 1
600.00 1
609.00 1
629.00 1
657.00 1
690 10
719 10
749 10
776 10
```

Figura 8.2. Archivo con profundidades.

En la línea de comando se ejecutó `md2pxyzv registro_de_pozo archivo_de_profundidades > archivo_de_salida_nombre_pozo`. Este comando corrige las profundidades del pozo desviado y los coloca en m.s.n.m., además, genera una columna con las coordenadas de las profundidades para poder inferir su posición en superficie.

Delimitar la zona de estudio y otros parámetros

Se ingresó al directorio `~/nombre_campo/script` y se ejecutó `SciTE model_info.py &`, el cual nos llevó a una Interface Gráfica de Usuario (GUI por sus siglas en inglés). Posteriormente, se modificaron los límites de extensión del modelo, el espaciado de los puntos del campo lejano, los tipos de roca, el número de capas que tendremos en nuestro campo, el espesor de las capas y la imagen de fondo de la zona de estudio (Figura 8.3).

Creación de los puntos de los pozos

En el directorio `~/nombre_campo/rejilla` se creó el archivo `pozos_coord_feedzone.dat` utilizando la ubicación de los pozos y en el caso de los pozos desviados la ubicación de la *feed zone* es superficie. El archivo contiene la información mencionada en la Tabla 8.1.

Creación de los puntos lejanos

Una vez modificado el `info_model.py`, se accedió al directorio `~/nombre_campo/script` y se ejecutó el comando `SciTE gen_puntos_lejos.py &`. Con la tecla F5 se corrió el script y se generó el archivo `puntos_lejos.dat` dentro del directorio `~/nombre_campo/rejilla`.

```
info_model.py * SciTE
File Edit Search View Tools Options Language Buffers Help
1 info_model.py *
#=====
#***INFORMACION MODELO NUMERICO***
#=====

#limites de la extension del modelo
XMIN=000000
XMAX=000000
YMIN=000000
YMAX=000000
limites=[XMIN,XMAX,YMIN,YMAX]

#PUNTOS LEJANOS
margen=2000
paso=2000

#ARCHIVO de puntos (X,Y) editado con Grace
salida_grace="puntos.agr"
#coordenadas (X,Y,Z, POZO) de las zonas de alimentacion de los pozos
puntosPozo='pozos_coord_feedzone.dat'

#nombre de la figura de fondo
mapaFalla='sv_geol_super.png'
#en general presenta numero de elementos "si"=1, "no"=0
numeros=1

#limites de la figura de fondo (fallas, mapa etc)
FXMIN=000000
FXMAX=000000
FYMIN=000000
FYMAX=000000
marco=[FXMIN,FXMAX,FYMIN,FYMAX]

#*****
#***CAPAS Y ROCAS***
#*****
num_capa=5

#ZOOM de pozos y campo cercano
ZX1=000000
ZX2=000000
ZY1=000000
ZY2=000000

ZX1,ZX2,ZY1,ZY2=limites

#ZX1=510000
#ZX2=524000
#ZY1=270000
#ZY2=286000
zrocas=[ZX1,ZX2,ZY1,ZY2]

#colores RGB de las rocas
rocaColor={
'rock1': '#F80000',
'rock2': '#F89800',
'rock3': '#F800F8',
'rock4': '#F8F800',
'rock5': '#F8F898'
}

#MODELO DE CAPAS *** MAX 20 CAPAS
#No.Capa, Prof-Punto-Medio, Espesor
capas=""
1 187 374
2 655 562
3 961 50
4 1336 700
5 1936 500
""
```

Figura 8.3. Script *info_model.py* en el GUI del editor SciTE. Se muestran los parámetros a modificar.

Tabla 8.1. Parámetros que se colocaron para el archivo de puntos.

Coordenada x	Coordenada y	Coordenada z	Nombre del pozo
--------------	--------------	--------------	-----------------

```

gen_puntos_lejos.py
File Edit Search View Tools Options Language Buffers Help
1 gen_puntos_lejos.py
import os, info_model

os.chdir('./rejilla') #atencion la entrada salida es en rejilla
fout=open('puntos_lejos.dat','w')

x1,x2,y1,y2=info_model.limite
margen=info_model.margen
paso=info_model.paso
for j in range(y1+margen,y2-margen,paso):
    for i in range(x1+margen,x2-margen,paso):
        fout.write("%s %s\n" %(i,j))
    fout.close()
    
```

Figura 8.4. Script *gen_puntos_lejos.py* en el GUI del editor SciTE.

Creación de puntos cercanos y archivo de puntos de la rejilla

Se ejecutó el comando *xmgrace &* y se abrió una GUI. Posteriormente, se seleccionó la pestaña *Edit* y se ingresó al comando *import ASCII*. Ahí, se ingresó a los archivos *puntos_lejos.dat* y *coord_feed_zone.dat*. Se modificaron las propiedades visuales de los archivos ingresados para obtener un gráfico con puntos, se agregaron marcadores alrededor de los puntos del archivo *coord_feed_zone.dat* según se creyó conveniente (Figura 8.5) y finalmente se guardó el archivo asignando una extensión *agr* (p. ej., *puntos.agr*) en el directorio *~/nombre_campo/rejilla*.

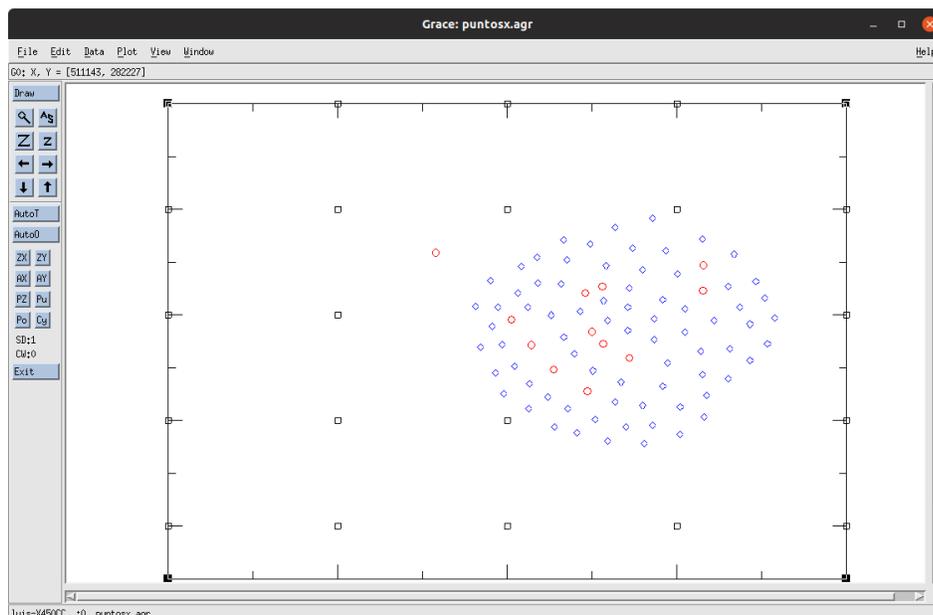


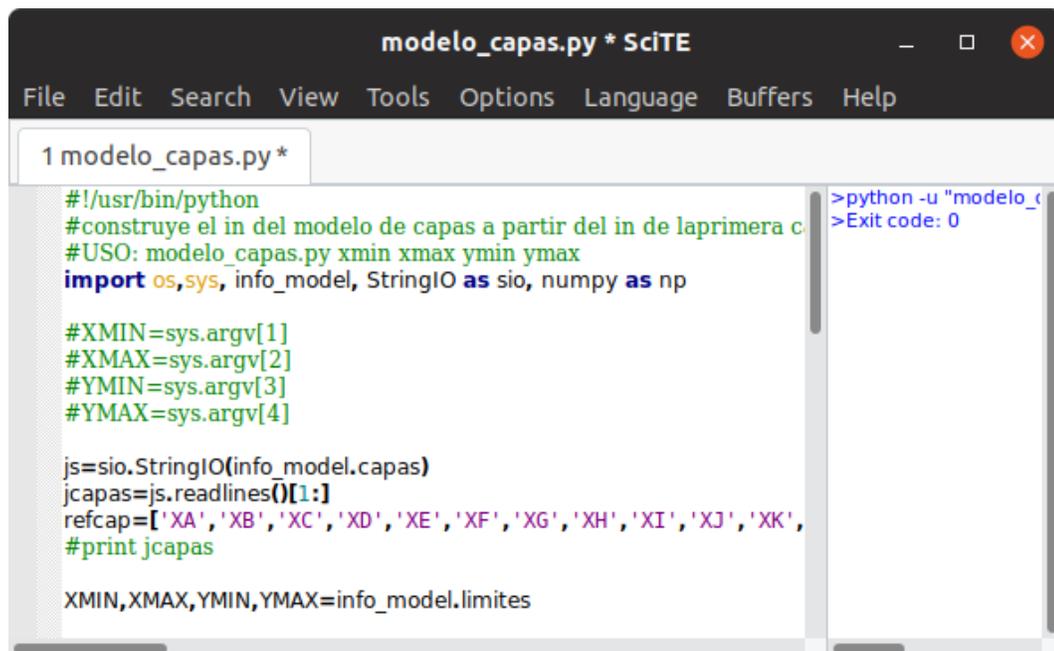
Figura 8.5. Puntos para realizar la rejilla regular e irregular. Los puntos rojos representan los pozos, los azules representan los puntos creados para las celdas del campo cercano y los negros representan los puntos del campo lejano.

Visualización de la rejilla

En el directorio `~/nombre_campo/script` se ejecutó el comando `SciTE poligonos_capa1.py &` para visualizar los polígonos de la primera capa. Éstos sirvieron de referencia para las capas subyacentes. Dichos puntos fueron modificados utilizando el editor del programa GRACE.

Creación del modelo completo

En el directorio `~/nombre_campo/script` se ejecutó el comando `SciTE modelo_capas.py &` y se abrió una GUI. Presionando la tecla F5 se corrió el script y se generaron los archivos `elem` y `conne` dentro del directorio `~/nombre_campo/rejilla`.



```
#!/usr/bin/python
#construye el in del modelo de capas a partir del in de la primera c
#USO: modelo_capas.py xmin xmax ymin ymax
import os,sys, info_model, StringIO as sio, numpy as np

#XMIN=sys.argv[1]
#XMAX=sys.argv[2]
#YMIN=sys.argv[3]
#YMAX=sys.argv[4]

js=sio.StringIO(info_model.capas)
jcapas=js.readlines()[1:]
refcap=['XA','XB','XC','XD','XE','XF','XG','XH','XI','XJ','XK',
#print jcapas

XMIN,XMAX,YMIN,YMAX=info_model.limite
```

```
>python -u "modelo_c
>Exit code: 0
```

Figura 8.6. Script `modelo_capas.py` en el GUI del SciTE.

Creación de tabla con tipo de roca por celda

En la línea de comandos, se ejecutó el editor de hojas de cálculo `gnumeric &` donde se construyó el modelo asignando los tipos de roca definidos en el `info_model.py` a cada una de las celdas creadas anteriormente (Figura 8.7). El archivo fue guardado con la extensión `xls`, (p. ej., `rocas.xls`) en el directorio `~/nombre_campo/rejilla`.

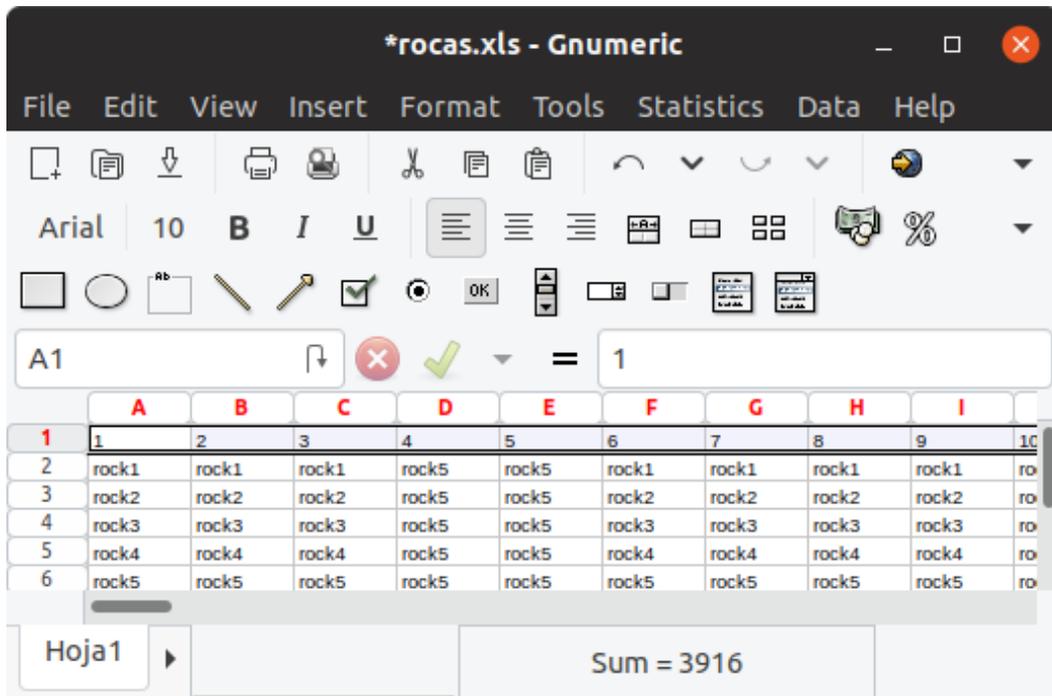


Figura 8.7. Editor de tablas *gnumeric* con archivo *rocas.xls*. La primera fila representa el número de la celda, las siguientes representan las capas.

Distribución visual de rocas

En el directorio `~/nombre_campo/script` se ejecutó el comando `rocas_capa.py #`, donde el símbolo `#` corresponde al número de capa que se desea ver, p. ej., `rocas_capa.py 1` (Figura 8.8). Al visualizar los tipos de roca por capa fue posible modificar la tabla creada en el paso anterior para obtener mejores resultados.

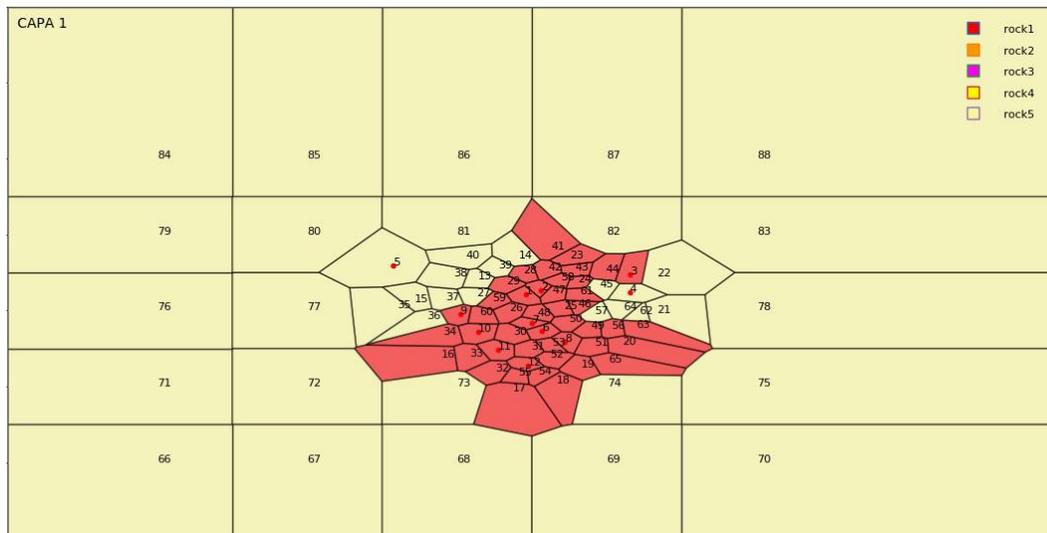
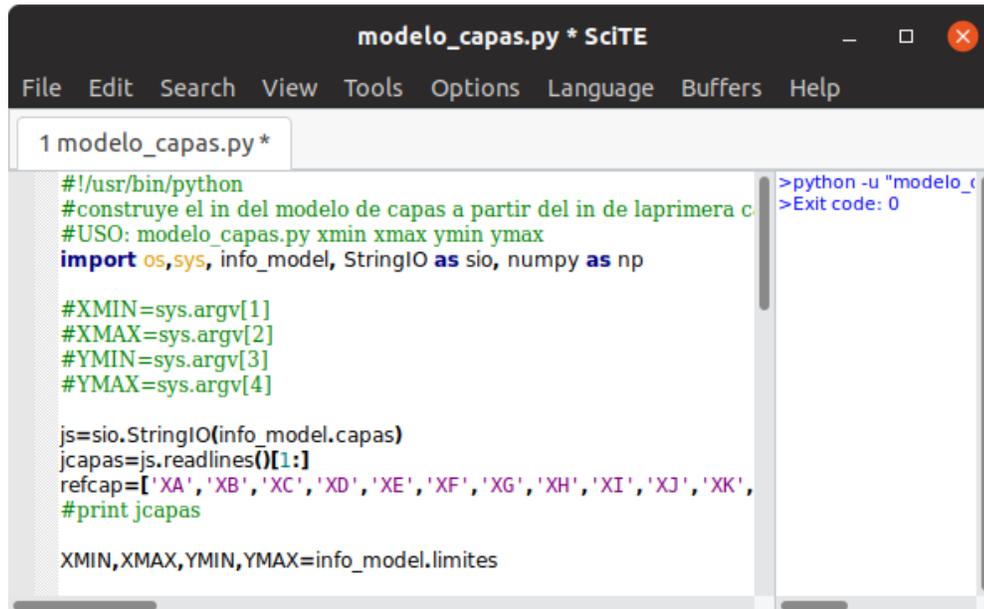


Figura 8.8. Distribución visual de las rocas de la capa 1 y celdas con su respectivo número.

Creación del archivo `elem_t2`

En el directorio `~/nombre_campo/script` se ejecutó el comando `SciTE inserte_rocas.py &` y se obtuvo una GUI. Posteriormente, se presionó la tecla F5 para correr el script y generar el archivo `elem_t2` dentro del directorio `~/nombre_campo/rejilla`. El archivo creado fue necesario para adicionarlo al archivo de entrada del TOUGH2.



The screenshot shows the SciTE text editor window titled "modelo_capas.py * SciTE". The menu bar includes File, Edit, Search, View, Tools, Options, Language, Buffers, and Help. The main text area contains the following Python code:

```
#!/usr/bin/python
#construye el in del modelo de capas a partir del in de laprimera c
#USO: modelo_capas.py xmin xmax ymin ymax
import os,sys, info_model, StringIO as sio, numpy as np

#XMIN=sys.argv[1]
#XMAX=sys.argv[2]
#YMIN=sys.argv[3]
#YMAX=sys.argv[4]

js=sio.StringIO(info_model.capas)
jcapas=js.readlines()[1:]
refcap=['XA','XB','XC','XD','XE','XF','XG','XH','XI','XJ','XK',
#print jcapas

XMIN,XMAX,YMIN,YMAX=info_model.limite
```

On the right side of the editor, a terminal window shows the command `>python -u "modelo_c` and the output `>Exit code: 0`.

Figura 8.9. Script `inserte_rocas.py` en el GUI del SciTE.

Creación del archivo de producción

Dentro del directorio `~/nombre_campo/flujo` se creó un archivo de producción para cada pozo productor e inyector, con la siguiente información: fecha, tiempo y flujo total (Figura 8.10).

```
01-01-2020 00:00:00 30
01-01-2021 00:00:00 30
01-01-2022 00:00:00 30
01-01-2023 00:00:00 30
01-01-2024 00:00:00 30
01-01-2025 00:00:00 30
01-01-2026 00:00:00 30
01-01-2027 00:00:00 30
01-01-2028 00:00:00 30
01-01-2029 00:00:00 30
01-01-2030 00:00:00 30
01-01-2032 00:00:00 30
01-01-2034 00:00:00 30
01-01-2036 00:00:00 30
01-01-2038 00:00:00 30
01-01-2040 00:00:00 30
01-01-2050 00:00:00 30
01-01-2060 00:00:00 30
01-01-2070 00:00:00 30
01-01-2080 00:00:00 30
```

Figura 8.10. Archivo de producción del pozo P5B con flujo total.

Ingreso de los pozos de producción y de reinyección para la creación del archivo *prod_t2*

Se ubicó en el directorio *~/nombre_campo/flujo* y se ejecutó el comando *vi bate_expa*. La instrucción *-1* indica que se trata de un pozo de producción, mientras que la instrucción *1* indica que es un pozo inyector. Ahí, se modificaron las celdas en donde se ubicaran los pozos de producción y reinyección de acuerdo a la Figura 8.11.

En el mismo directorio se ejecutó el comando *chmod +x bate_expa*. Igualmente, se convirtió el archivo de texto en un archivo ejecutable.

Finalmente, se ejecutó el comando *bate_expa* y se generó el archivo *prod_t2*, el cual servirá para adicionar al archivo de ingreso para la simulación dinámica en TOUGH2.

```
flujo2t2.py P5A_prod.dat XD006PUA05 -1 >prod_t2
flujo2t2.py P5B_prod.dat XD007PUB05 -1 >>prod_t2
flujo2t2.py P5C_prod.dat XD008PUC05 -1 >>prod_t2
flujo2t2.py Pxx_iny.dat XD003PUA02 1 760e3>>prod_t2
flujo2t2.py Pxx_iny.dat XD004PUB02 1 760e3>>prod_t2
flujo2t2.py Pxx_iny.dat XD002PUC02 1 760e3>>prod_t2
```

Figura 8.11. Archivo *bate_expa* con pozos de producción e inyección.

Visualización de perfiles PT observados y calculados

En el directorio *~/nombre_campo/script* se ejecutó el comando *SciTE vea_cal_pt_nat.py &* y se obtuvo una GUI (Figura 8.12), en donde se modificó el nombre del archivo que se quería visualizar. Con la tecla *F5* se corrió el script y se generó la imagen.

Visualización de distribución de P y T por capa

En el directorio *~/nombre_campo/script* se ejecutó el comando *SciTE vea_mapa_pt_modelo.py &* y se obtuvo una GUI (Figura 8.13), en donde se modificó el nombre del archivo que se quería visualizar. Con la tecla *F5* se corrió el script y se generó la imagen.

Visualización de evolución PT en un elemento especificado

En el directorio *~/nombre_campo/script* se ejecutó el comando *SciTE vea_evol_pt_nat.py &* y se obtuvo una GUI (Figura 8.14), en donde se modificó el nombre del archivo que se quería visualizar. Con la tecla *F5* se corrió el script y se generó la imagen.

```
vea_cal_pt_nat.py * SciTE
File Edit Search View Tools Options Language Buffers Help
1 vea_cal_pt_nat.py* 2 vea_evolution_pt_nat.py 3 vea_mapa_pt.py 4 vea_mapa_pt_modelo.py*

import os
from pylab import *
from numpy import loadtxt

#ENTRADA
#-----
np=[
'P1.dat.cal',
'P1A.dat.cal',
'P2A.dat.cal',
'P2B.dat.cal',
'P3.dat.cal',
'P5A.dat.cal',
'P5B.dat.cal',
'P5C.dat.cal'
]
ne=['0 1','0 2','0 3','0 4','0 5','0 6','0 7','0 8']
sal_t2='nat00.out'

vz=[547,79,-227,-602,-1202] #capa A-E ref-734 msnm
#-----

rc('figure.subplot',wspace=0.3,hspace=0.2)
rc('legend',fontsize='8.0')
rc('xtick',labelsize='8',color='#585858')
rc('ytick',labelsize='8',color='#585858')
rc('grid',linestyle='-',linewidth='0.1',color='#585858')
rc('axes',facecolor='#eeeeee',edgecolor='#585858',linewidth=1.0,grid=1,labelsize=8,labelcolor='#585858')

#ATENCION la entrada salida es en form_pt
os.chdir('../form_pt') #atencion la entrada salida es en form_pt
figure(figsize=(7,8))
for i in range(len(np)):
    jp=(np[i].replace('sv','SV-'))
    pozo=jp.find('_').upper()
    z,m,d,pp,pt=loadtxt(np[i],usecols=(0,1,2,3),unpack=1)
    com="grep \"X[A-E]\" %s" % '../modelo/%s' | grep -v E05 | grep -v ST | grep -v \" X\" | cut -c 14-21
    os.system(com)
    fp,ft=loadtxt('j1',usecols=(0,1),unpack=1)
    ax=subplot(4,2,i+1)
    plot(pp,z)
    plot(pt,z)
    plot(fp*1e-5,vz,'b+',ms=3)
```

Figura 8.12. Script `vea_cal_pt_nat.py` en la GUI del SciTE.

```
vea_mapa_pt_modelo.py * SciTE
File Edit Search View Tools Options Language Buffers Help
1 vea_cal_pt_nat.py* 2 vea_evolution_pt_nat.py* 3 vea_mapa_pt.py 4 vea_mapa_pt_modelo.py*

import os, info_model
from pylab import *
#ENTRADA
#-----
capa='0'
#var='temperatura'
#var='gresion'
#X1,X2,Y1,Y2=514500,519500,276000,280000 #zoom
X1,X2,Y1,Y2=info_model.limite #total
sal_t2='nat00.out'
#sal_t2='nat1d.out'
#sal_t2='nat1d.out'
#-----

os.chdir('../form_pt') #atencion la entrada salida es en form_pt

#Atencion, hacer link de poligonos.dat en rejilla
txt=open('poligonos.dat','r').readlines()
com="grep Xs ../modelo/%s | grep -v \" X\" | egrep -v 'MAX|ST|MOP|EOP|HEAT|MA30R|ARRAY|xt|HB|HA|V|A-C' | cut -c 15-39 > jp" %(capa,sal_t2)
os.system(com)
com="grep XE ../rejilla/eleme.capas | awk '{print $4,$5}' > jc"
os.system(com)
os.system("paste jc jp >jd")
de,dn,jp,t=loadtxt('jd',unpack=1)
jp=1e5

tx,ty=loadtxt('cgsv_xyz_pozos.dat',usecols=(0,1),unpack=1)
sx,sy,ns=loadtxt('sittos_coord_xyz.dat',dtype=[('c1','f'),('c2','f'),('c3','f')],usecols=(0,1,3),unpack=1)

paso=20
E1,E2,N1,N2=(X1,X2,Y1,Y2) #cchi
lim=[E1,E2,N1,N2]
w=arange(E1,E2,paso)
y=arange(N1,N2,paso)
X,Y=meshgrid(x,y)
if var=='temperatura':
    Z=griddata(de,dn,jp,X,Y)
    c1=140
    cf=260
    inc=20
    cm=matplotlib.cm.get_cmap('jet')
else:
    Z=griddata(de,dn,jp,X,Y)
    c1=50
```

Figura 8.13. Script `vea_mapa_pt_modelo.py` en la GUI del SciTE.

```

vea_evol_pt_nat.py * SciTE
File Edit Search View Tools Options Language Buffers Help
1 vea_cal_pt_nat.py* 2 vea_evol_pt_nat.py* 3 vea_mapa_pt.py 4 vea_mapa_pt_modelo.py*

from pylab import *
import os

sal_t2='prod0.out'
ele='XD0 1'
#-----

os.chdir('../modelo') #atencion la entrada salida es en modelo

os.system("grep \" %s(\" %s | cut -c 22-33,88-96,100-110 > jt" %(ele, sal_t2))
jt,t,p=loadtxt('jt',unpack=1,skiprows=2)
#ts,ps=loadtxt('cgchi_hist_preres_sintetica.dat',unpack=1,skiprows=0)
jt=jt/3.15576e7
p=p/1e5

rc('figure.subplot',wspace=0.3,hspace=0.4)
rc('legend',fontsize='8.0')
rc('xtick',labelsize='10',color='#585858')
rc('ytick',labelsize='10',color='#585858')
rc('grid',linestyle='-',linewidth='0.1',color='#585858')
rc('axes',facecolor='#eeeeee',edgecolor='#585858',linewidth=1.0,grid=1,labelsize=8,labelcolor='#585858')

fig=figure(figsize=(6,3.6))
g1 = fig.add_subplot(111)
#l1=plot(jt,p,'bo',ms=3,mec='b',color='none')
l1=plot(jt,p,ms=3,mec='b',color='b')
ylabel("Presion (bar)")
xlabel("Tiempo (anos)")
g2= g1.twinx()
#l2=plot(jt,t,'rs',ms=3,mec='r',color='none')
l2=plot(jt,t,ms=3,mec='r',color='r')
grid(0)
#legend([l1[0],l2[0],l3[0]],['presion','temperatura','pres-obs'],frameon=0,loc=1)
legend([l1[0],l2[0]],['presion', 'temperatura'],frameon=0,loc=5)
#text(0.01,0.06,"CAPA E",transform = g1.transAxes,color='k', fontsize=8)
#xlim(-10,40)
ylabel("Temperatura (C)")
savefig("jt.png")
os.system("convert -trim jt.png evol_pt_prod.png")
#os.system("convert -trim jt.png evol_pt_nat.png")
os.system("rm -f jt.png")
show()

```

Figura 8.14. Script *vea_evol_pt_nat.py* en la GUI del SciTE.

Visualización de contornos de P y T

En el directorio *~/nombre_campo/script* se ejecutó el comando *SciTE vea_mapa_pt.py &* y se obtuvo una GUI (Figura 8.15), en donde se modificó el nombre del archivo que se quería visualizar. Con la tecla F5 se corrió el script y se generó la imagen.

```

vea_mapa_pt.py * SciTE
File Edit Search View Tools Options Language Buffers Help
2 vea_evol_pt_nat.py* 3 vea_mapa_pt.py*
import os
from pylab import *
from numpy import loadtxt
from scipy.interpolate import interp1d

#ENTRADA
#-----
ref=-200 #referencia msnm
map='Temperatura'
#-----

np=[
'P1.dat',
'P1A.dat',
'P2A.dat',
'P2B.dat',
'P5A.dat',
'P5B.dat',
'P5C.dat'
]
#P3.dat',

os.chdir('../form_pt') #atencion la entrada salida es en form_pt
cx=[];cy=[];ct=[];cl=[];cp=[]
for pozo in np:
    hall="%s.hall" %pozo[:pozo.find(' ')]
    | os.system("awk '{print $1,$2}' %s > jp" %pozo)
os.system("awk '{print $1,$3}' %s > jt" %pozo)
os.system("md2pxyzv %s jp > jpe" %hall)
os.system("md2pxyzv %s jt > jte" %hall)
md,xe,ye,ze,pe=loadtxt('jpe',usecols=(0,2,3,4,5),unpack=1)
te=loadtxt('jte',usecols=(5,),unpack=1)
xei,yei,zei,pei,tei=xe[::-1],ye[::-1],ze[::-1],pe[::-1],te[::-1]
int_x=interp1d(zei,xei)
int_y=interp1d(zei,yei)
int_t=interp1d(zei,tei)
int_p=interp1d(zei,pei)

try:cx.append(int_x.__call__(ref))
except ValueError: continue
cy.append(int_y.__call__(ref))
ct.append(int_t.__call__(ref))

```

Figura 8.15. Script *vea_mapa_pt.py* en la GUI del SciTE.

Apéndice B. Salida de datos del TOUGH2.

ELEM1	ELEM2	INDEX	FHEAT (W)	FLOH/FLOF (J/KG)	FLOF (KG/S)	FLO(GAS) (KG/S)	FLO(AQ.) (KG/S)	FLO(WTR2) (KG/S)	VEL(GAS) (M/S)	VEL(AQ.) (M/S)	TURB.-COEFF. (1/M)
XE019	XE051	1365	0.50300E+03	-0.75547E+07	-0.66581E-04	0.00000E+00	-0.66581E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	-0.76485E-11	0.00000E+00
XE020	XE056	1366	0.10642E+04	-0.16635E+08	-0.63974E-04	0.00000E+00	-0.63974E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	-0.59438E-11	0.00000E+00
XE020	XE051	1367	0.11788E+05	-0.53764E+08	-0.21926E-03	0.00000E+00	-0.21926E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	-0.13541E-10	0.00000E+00
XE020	XE065	1368	0.30774E+04	0.11422E+08	0.26944E-03	0.00000E+00	0.26944E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.56204E-11	0.00000E+00
XE020	XE075	1369	-0.27765E+05	-0.39406E+08	0.70457E-03	0.00000E+00	0.70457E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.29311E-10	0.00000E+00
XE020	XE063	1370	-0.26551E+05	-0.58907E+08	0.45074E-03	0.00000E+00	0.45074E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.89010E-11	0.00000E+00
XE021	XE062	1371	0.28007E+05	-0.35016E+08	-0.79985E-03	0.00000E+00	-0.79985E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	-0.34590E-10	0.00000E+00
XE021	XE063	1372	0.47057E+05	-0.37343E+08	-0.12601E-02	0.00000E+00	-0.12601E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	-0.27700E-10	0.00000E+00
XE021	XE078	1373	-0.78743E+05	-0.33721E+08	0.23351E-02	0.00000E+00	0.23351E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.36384E-10	0.00000E+00
XE021	XE022	1374	-0.98293E+04	-0.76256E+08	0.12890E-03	0.00000E+00	0.12890E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.55896E-11	0.00000E+00
XE022	XE078	1375	-0.26498E+05	-0.27372E+08	0.96807E-03	0.00000E+00	0.96807E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.28125E-10	0.00000E+00
XE022	XE083	1376	-0.50521E+05	-0.39000E+08	0.12954E-02	0.00000E+00	0.12954E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.23698E-10	0.00000E+00
XE022	XE082	1377	-0.46887E+04	-0.36766E+08	0.12753E-03	0.00000E+00	0.12753E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.52956E-11	0.00000E+00
XE023	XE042	1378	0.76454E+04	-0.75674E+08	-0.10103E-03	0.00000E+00	-0.10103E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	-0.10736E-10	0.00000E+00
XE023	XE043	1379	0.15353E+05	-0.56491E+08	-0.27178E-03	0.00000E+00	-0.27178E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	-0.13988E-10	0.00000E+00
XE023	XE044	1380	-0.11585E+04	-0.11249E+09	0.10299E-04	0.00000E+00	0.10299E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.82712E-12	0.00000E+00
XE023	XE082	1381	-0.25140E+05	-0.40956E+08	0.61383E-03	0.00000E+00	0.61383E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.31169E-10	0.00000E+00
XE023	XE041	1382	-0.21327E+05	-0.55493E+08	0.38431E-03	0.00000E+00	0.38431E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.14176E-10	0.00000E+00
XE024	XE044	1383	-0.46582E+04	-0.66516E+08	0.70031E-04	0.00000E+00	0.70031E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.15813E-10	0.00000E+00
XE024	XE043	1384	-0.61433E+04	-0.69546E+08	0.88335E-04	0.00000E+00	0.88335E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.84747E-11	0.00000E+00
XE024	XE058	1385	0.47445E+04	-0.91995E+08	-0.51574E-04	0.00000E+00	-0.51574E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	-0.37400E-11	0.00000E+00
XE024	XE047	1386	0.51337E+03	-0.90970E+08	-0.56433E-05	0.00000E+00	-0.56433E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	-0.65632E-11	0.00000E+00
XE024	XE061	1387	0.39523E+04	-0.10986E+09	-0.35975E-04	0.00000E+00	-0.35975E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	-0.32752E-11	0.00000E+00
XE024	XE045	1388	-0.71253E+04	-0.48446E+08	0.14708E-03	0.00000E+00	0.14708E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.13311E-10	0.00000E+00
XE025	XE048	1389	0.52395E+04	-0.18002E+09	-0.29105E-04	0.00000E+00	-0.29105E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	-0.18358E-11	0.00000E+00
XE025	XE050	1390	0.62833E+03	0.31540E+08	0.19922E-04	0.00000E+00	0.19922E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.17739E-11	0.00000E+00
XE025	XE046	1391	-0.96199E+04	-0.66979E+08	0.14363E-03	0.00000E+00	0.14363E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.85119E-11	0.00000E+00
XE025	XE061	1392	-0.58640E+03	-0.90616E+08	0.64712E-05	0.00000E+00	0.64712E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.55195E-11	0.00000E+00
XE025	XE047	1393	-0.23380E+04	-0.12409E+09	0.18842E-04	0.00000E+00	0.18842E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.13823E-11	0.00000E+00
XE026	XE048	1394	0.19056E+04	-0.25158E+08	-0.75748E-04	0.00000E+00	-0.75748E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	-0.59866E-11	0.00000E+00
XE026	XE059	1395	-0.83097E+04	-0.40395E+08	0.20571E-03	0.00000E+00	0.20571E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.14510E-10	0.00000E+00
XE026	XE060	1396	-0.44610E+04	-0.26190E+08	0.17033E-03	0.00000E+00	0.17033E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.10862E-10	0.00000E+00
XE026	XE030	1397	0.12024E+04	-0.11552E+09	-0.10409E-04	0.00000E+00	-0.10409E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	-0.20611E-11	0.00000E+00
XE027	XE038	1398	-0.42339E+04	-0.39046E+08	0.10843E-03	0.00000E+00	0.10843E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.29682E-10	0.00000E+00
XE027	XE037	1399	-0.13730E+05	-0.30044E+08	0.45701E-03	0.00000E+00	0.45701E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.25494E-10	0.00000E+00
XE027	XE060	1400	0.20310E+04	-0.43292E+08	-0.46913E-04	0.00000E+00	-0.46913E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	-0.16163E-10	0.00000E+00

2413,4