



**Universidad Michoacana de San
Nicolás de Hidalgo**



**Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra
Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio**

Tesis

**“Modelo numérico y conceptual en Cuitzeo y Tarímbaro
Michoacán haciendo uso de GMS y Tough2”**

Que para obtener el título de
Maestra en Geociencias y Planificación del territorio

Presenta:
Ana Yunnuen Avila Villegas

Asesor: Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy (INICIT-UMSNH)
Co-Asesor externo: Dr. Andrés Borgia (EDRA-ITALIA)

Morelia, Michoacán, Febrero, 2017.

Dedicada a mi esposo y padres.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todos los involucrados en el desarrollo de este trabajo de investigación, por su motivación y confianza para llevarlo a cabo. A mi esposo Héctor por todo su amor y paciencia, por todos los consejos y su apoyo en todos los aspectos de mi vida. A mis papás por apoyarme en cada decisión y etapa, son los mejores.

De forma muy especial agradezco al Dr. Víctor Hugo Garduño por ser un investigador excepcional y un gran ser humano, más que un asesor usted es un ejemplo para mí, gracias por su confianza y por creer en los métodos numéricos y demostrar siempre que el éxito se basa en un trabajo constante y en la voluntad de querer construir un mejor país con oportunidades para su gente joven.

Agradezco al Dr. Andrea Borgia por todas sus enseñanzas, su paciencia, apoyo y su dedicación con este trabajo, agradezco tantas horas que usted invirtió en mi capacitación. También a todos los revisores de tesis: al Dr. Domínguez Mota por su confianza, apoyo y amistad, pocos investigadores son como usted, gracias por apoyarme en todo momento. Al Dr. Avila, gracias a su trabajo y motivación descubrí mi gran interés por la geohidrología. Al Dr. Antonio Pola por su tiempo, paciencia y excelentes aportaciones. A los Drs. Espinoza y Olmos por su confianza.

Agradezco mucho al CEMIE-Geo proyecto 17 por el apoyo económico para realizar este proyecto y a sus integrantes por todo el apoyo técnico, en especial a Gerardo, Emmanuel y Sergio. El trabajo que llevan a cabo es admirable y estoy segura que México requiere más investigaciones como las que ustedes están desarrollando y más gente que se comprometa como ustedes lo hacen.

A todos mis profesores por sus enseñanzas, su profesionalismo y compromiso, especialmente a la Dra. Israde y a los Drs. Macías y Garduño, sus clases siempre me retaron, me motivaron y me transmitieron el gusto y pasión que ustedes tienen por lo que hacen e investigan.

A Lucy Torres por su apoyo, cariño y comprensión siempre. A mis amigas Adriana, Andrea y Zareth por tantas experiencias, tantos retos juntas, tantas risas y frustraciones compartidas. Las admiro y aprecio. A Moni por su ayuda y tantos consejos.

De una manera no menos importante, agradezco el apoyo económico obtenido del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, sin el cual no habría podido realizar esta investigación.

Índice

Índice de figuras	VII
Índice de tablas	IX
Nomenclatura	X
Resumen	XI
Abstract	XII
Capítulo I. Aspectos generales de Investigación	14
1.1 Introducción	14
1.2 Justificación	15
1.3 Hipótesis	20
1.4 Objetivos	21
1.4.1 objetivos particulares	21
Capítulo II. Descripción de la zona de estudio	22
2.1 Localización	25
2.2 Clima	25
2.3 Hidrología	26
2.4 Geología	27
2.5 San Agustín del Maíz	29
Capítulo III. Antecedentes	32
Capítulo IV. Marco Teórico	40
4.1 Marco Hidrogeológico	48
4.1.1 Porosidad y permeabilidad	51
4.1.2 Coeficiente de almacenamiento	54
4.1.3 Recarga	55
4.1.4 Dirección de flujo	59
4.2 Deducción de la Ecuación de Flujo	61
4.2.1 Métodos numéricos para resolver la Ecuación General de Flujo Subterráneo 3D	66
4.2.2 Teorema de Taylor	70
4.3 Programas de modelación numérica	71
4.3.1 GMS	74
4.3.1.1 Modflow	75
4.3.2 Tough2	76
4.3.2.1 TMT2	83
4.4 Calor y temperatura	84
4.4.1 Ley de Fourier de la conducción de calor	89
Capítulo V. Metodología	90
Capítulo VI. Resultados	102
Capítulo VII. Discusión	131

Capítulo VIII. Conclusiones	134
Bibliografía	136
Anexo A: Ejemplo de código de entrada para Tough2	141
Anexo B: Ejemplo de código de entrada para Tough2, simulación 2 De pozo inyector y productor	143

Índice de Figuras

Fig. 1.- Usos directos de la energía geotérmica de acuerdo a la temperatura de los fluidos (editada de García-Gutiérrez, 2015).	17
Fig. 2.- Localización de la malla de modelación en el Acuífero Morelia-Queréndaro en el estado de Michoacán. Resaltando la malla 1 de modelación.	24
Fig. 3.- Mapa de la Cuenca del Lago de Cuitzeo en el Pleistoceno y en el Holoceno Reciente para el análisis de la edad del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (Gómez-Vasconcelos et al., 2012).	28
Fig. 4.- Principales sistemas de fallas con edades inferiores a los 10 M.a. que afectan al Cinturón Volcánico Transmexicano (Ferrari, 2000).	29
Fig. 5.- Localización geográfica de las principales zonas de interés geotérmico al norte del estado de Michoacán.	30
Fig. 6.- Corrientes de convección en la astenosfera donde el calor aprovecha debilidades corticales para su ascenso a la superficie terrestre.	41
Fig. 7.- Modelo Esquemático de un Sistema Geotérmico Hidrotermal (Santiago-Gutiérrez y Santoyo-Alvarado, 2010).	44
Fig. 8.- Modelo Esquemático de un Sistema Geotérmico Mejorado (Santiago-Gutiérrez y Santoyo-Alvarado, 2010).	45
Fig. 9.- Tipos de acuíferos de acuerdo a la textura de las rocas (Artinaid, 2013).	49
Fig. 10.- Representación de los diferentes tipos de acuíferos de acuerdo a la estructura geológica de sus materiales y las condiciones hidráulicas del agua que contienen.	50
Fig. 11.- Polígonos de Thiessen de la precipitación promedio anual en mm en la cuenca del lago de Cuitzeo resaltando la malla del Modelo Morelia (editada de Medina-Vega, 2008).	58
Fig. 12.- Flujo a través de un elemento de acuífero para el análisis de la conservación de la masa.	63
Fig. 13.- Gráfica de Presión-Temperatura resaltando la Curva de saturación liquido-vapor para el agua. Un fluido supercrítico se forma cuando se superan las condiciones de Presión y Temperatura del fluido (Castaños, 2015).	87
Fig. 14.- Pasos para establecer un modelo de simulación hidrodinámica (editado de Armas-Vargas, 2010).	91
Fig. 15.- Descripción general de la metodología empleada para modelaciones Modflow-Tough2.	93
Fig. 16.- Representación de la interpolación de perfiles estratigráficos para la construcción de sólidos en el proceso de modelación regional.	96
Fig. 17.- Frontera de modelación para el Modelo Morelia.	103
Fig. 18.- Solución de Modflow en la malla 3D del modelo Morelia. Resaltan en la capa superior las celdas de drenaje (verde), flujo (azul) y de potencial constante (rojo). Adicionalmente “Head” señala la topografía regional y se remarcan algunos de los vectores de flujo.	104
Fig. 19.- Dirección de flujo por medio de vectores de velocidad en el modelo Morelia. Vista de perfil en dirección S-N.	105
Fig. 20.- Perfiles N-S, S-N de la dirección de flujo en los acuíferos presentes en el Modelo Morelia con vectores de velocidad separados.	106
Fig. 21.- Frontera de modelación del acuífero geotérmico en la localidad de San Agustín del Maíz.	107

Fig. 22.- Flujo de temperatura encontrado en el modelo Cuitzeo (A) 100 años (B) 200 años (Fumagalli, 2016).	108
Fig. 23.- Temperatura a 100 años en la localidad de San Agustín del Maíz, resaltando isothermas de 50 a 200°C (editado de Fumagalli, 2016).	109
Fig. 24.- Temperatura a 200 años en la localidad de San Agustín del Maíz, resaltando isothermas de 50 a 200°C.	109
Fig. 25.- Plumas de Temperatura (50, 100, 150 y 200°C) en la región donde se presentan manifestaciones hidrotermales, A) 5000 años, B) 10000 años, C) 15000 años, D) 20000 años. Modelo Cuitzeo.	111
Fig. 26.- Plumas de Temperatura (50, 100, 150 y 200°C) en la región donde se presentan manifestaciones hidrotermales, A) 25000 años, B) 30000 años, C) 35000 años, D) 40000 años. Modelo Cuitzeo.	112
Fig. 27.- Diferentes vistas de la evolución de isothermas de temperatura en San Agustín del Maíz. Diez mil años. La imagen de la izquierda en vista Sur-Norte y la imagen de la derecha en vista oblicua.	113
Fig. 28.- Cambio de presión 9 horas – 10 mil años en las diferentes capas de los pozos inyector y productor 1.	116
Fig. 29.- Cambio de presión 9 meses – 10 mil años en las diferentes capas de los pozos inyector y productor 1.	117
Fig. 30.- Cambio de presión 9 años – 10 mil años en las diferentes capas de los pozos inyector y productor 1.	118
Fig. 31.- Cambio de temperatura en la capa 4 (400 m de profundidad).	119
Fig. 32.- Cambio de temperatura en la capa 5 (500 m de profundidad).	120
Fig. 33.- Cambio de temperatura en la capa 6 (600 m de profundidad).	121
Fig. 34.- Cambio de presión 1 hora – 10 mil años en las diferentes capas de los pozos inyector y productor posición 2.	124
Fig. 35.- Cambio de presión 8 días – 10 mil años en las diferentes capas de los pozos inyector y productor posición 2.	125
Fig. 36.- Cambio de presión 8 días – 10 mil años en las capas 8 (800 m de profundidad) y 9 (900 m de profundidad) de los pozos inyector y productor posición 2.	126
Fig. 37.- Comparativo de presión (Pa) en celda de producción. 9 años – 10 mil años.	129
Fig. 38.- Comparativo de Temperatura (°C) en celda de producción. 9 años – 10 mil años.	129
Fig. 39.- Comparativo de presión (Pa) en celda de reinyección. 9 años – 10 mil años.	130
Fig. 40.- Comparativo de Temperatura (°C) en celda de reinyección. 9 años – 10 mil años.	130

Índice de tablas

Tabla 1.- Usos de la energía geotérmica directa en el mundo.	18
Tabla 2.- Características básicas de los Sistemas Geotérmicos que actualmente se utilizan o se desarrollan para la generación de Energía Eléctrica alrededor del mundo.	45
Tabla 3.- Porosidad en % para algunas rocas y material no consolidado (Kruseman y Ridder, 1994).	53
Tabla 4.- Materiales y parámetros físicos empleados en la modelación.	54
Tabla 5.- Datos de precipitación media anual en los municipios que comprenden la zona de modelación.	57
Tabla 6.- Datos de evaporación promedio anual en los municipios que comprenden la zona de modelación.	58
Tabla 7.- Materiales y parámetros físicos empleados en la modelación del modelo Morelia.	61
Tabla 8.- Métodos numéricos en la resolución de la ecuación general de flujo subterráneo 3D (editado de Armas-Vargas, 2010).	67
Tabla 9.- Descripción general de los parámetros del archivo de entrada para Tough2.	79
Tabla 10.- Descripción del paquete de ecuaciones de estado EOS 3.	81
Tabla 11.- Insumos del modelo conceptual en GMS.	94
Tabla 12.- Insumos para TMT2.	99
Tabla 13.- Datos de flujo en el pozo de producción simulación 1. Celda 51714.	122
Tabla 14.- Datos de flujo en el pozo de reinyección simulación 1. Celda 51114.	123
Tabla 15.- Datos de flujo en celda de producción 61411. Condición inicial a 10 mil años.	127
Tabla 16.- Datos de flujo en celda de reinyección 62011. Condición inicial a 10 mil años.	127
Tabla 17.- Datos de flujo en celda de producción 61411. Estado estacionario.	128
Tabla 18.- Datos de flujo en celda de reinyección 62011. Estado estacionario.	128

Nomenclatura

h	Potencial hidráulico (m)
z	Altura (m)
P	Presión intersticial (kg/m^2)
γ	Peso específico del agua (kg/m^3)
$\emptyset$	Porosidad
S	Coeficiente de almacenamiento
S^*	Coeficiente de almacenamiento específico
V_w	Volumen de agua (m^3)
V_a	Volumen de acuífero (m^3)
m_e	Porosidad eficaz
b	Espesor saturado del acuífero (m)
β	Módulo de compresibilidad del agua (m^2/kg)
α	Módulo de compresibilidad del acuífero (m^2/kg)
K	Conductividad hidráulica (m/s)
Q	Caudal (m^3/s)
A	Sección o área transversal (m^2)
Δh	Perdida de carga hidráulica (m)
Δl	Distancia recorrida por el agua (m)
$\Delta h/\Delta l$	Gradiente hidráulico
v	Velocidad de flujo (m/s)
T	Transmisividad (m^2/s)
m_w	Masa de agua (kg)
t	Tiempo (s)

Resumen

El modelo que proponemos en esta investigación aporta parámetros de caracterización conceptual de los acuíferos presentes en los municipios de Cuitzeo y Tarímbaro al norte del estado de Michoacán por medio del análisis de los sistemas de flujo modelados con el software GMS y su paquete interno de Modflow. De la misma forma se presentan las técnicas de modelación transiente para el flujo de calor en la localidad de San Agustín del Maíz haciendo uso de subrutinas entre GMS y Tough2.

Inicialmente se desarrolló un modelo conceptual Morelia-Cuitzeo en GMS en base a los parámetros hidrogeológicos del acuífero extraídos de la revisión bibliográfica y de trabajo en campo. Con esos resultados se analizaron las condiciones de flujo subterráneo preferencial en la zona y se estableció la frontera de modelación para un segundo modelo en el cual el centro de la malla correspondiente coincidiera con la localidad de San Agustín del Maíz para analizar las condiciones de flujo de calor en el área de estudio. Adicionalmente se modeló el comportamiento del gradiente geotérmico en la zona y se elaboró un post procesamiento de la solución para mil y hasta cuarenta mil años. Finalmente se eligió la solución que se adaptara con mayor fidelidad a las condiciones actuales del yacimiento y se elaboraron dos simulaciones de un campo geotérmico en funcionamiento con un pozo de inyección y otro de reinyección a 500 m de profundidad.

El modelo conceptual Morelia-Cuitzeo sugiere un flujo preferencial en dirección al margen sur del Lago de Cuitzeo desde los acuíferos en Morelia, Charo, Álvaro Obregón, Tarímbaro y Copándaro. El modelo numérico centrado en la localidad de San Agustín del Maíz muestra las plumas de calor y su comportamiento a profundidad. Resalta la relación de su posición geográfica con las zonas de manifestaciones hidrotermales que se observan en superficie en fecha actual. La primera modelación de un campo geotérmico con un pozo de inyección y otro de extracción en zonas dentro del Lago de Cuitzeo con una extracción constante de 26 kg/s mostro una despresurización máxima de 0.1 MPa sin cambios significativos a la temperatura del yacimiento geotérmico en los 9 años de funcionamiento que fueron modelados. El modelo numérico mostro una eficiencia energética suficiente para dar electricidad a 23 casas habitación en una comunidad urbana. Cuando los pozos se

modelaron cerca de la localidad de San Agustín del Maíz bajo la eficiencia energética del campo pero también los cambios en las condiciones de Presión-Temperatura del yacimiento.

Palabras Clave: Modelo conceptual, Tough2, GMS, Modflow, baja y media entalpía, acuíferos, energía geotérmica.

ABSTRACT

The present model provides parameters for aquifers conceptual characterization in Cuitzeo and Tarimbaro in Michoacan state by the analysis of systems flows modeled with the software GMS and its internal package Modflow. In the same way the techniques of transient modeling for the heat flow in the locality of San Agustin del Maiz are presented using subroutines between GMS and Tough2.

Initially, a Morelia-Cuitzeo conceptual model was developed in GMS based on the hydrogeological parameters of the aquifer extracted from the literature review and field work. With those results the conditions of preferential underground flow in the zone were analyzed and the model boundary was established for a second model in which the mesh center was in San Agustin del Maiz. The objective of the second model was to analyze the heat flow conditions in the area. Additionally, the geothermal gradient behavior was modeled and the solution was made for a thousand to forty thousand years after a post processing of data. Finally, we chose the solution that represents the current reservoir conditions and then we proceeded with two simulations of a geothermal field in operation with an injection and a reinjection well at 500 m dept.

The Morelia-Cuitzeo conceptual model suggests a preferential flow towards the southern margin of the Cuitzeo Lake from the Morelia, Charo, Alvaro Obregon, Tarimbaro and Copandaro aquifers. The numerical model focused on San Agustin del Maiz shows the feathers of heat and their behavior in depth. It emphasizes the relation of its geographical position with the zones of hydrothermal manifestations that are observed in surface at the current date. The first model of a geothermal field with the corresponding wells into Cuitzeo Lake and with a constant extraction of 26 kg/s showed a maximum depressurization of 0.1

MPa without significant changes of temperature in the geothermal field in the 9 years in operation simulation. The model showed an energy efficiency to give electricity to 23 houses in an urban community. When the wells were modeled near the locality of San Agustin del Maiz the energy efficiency and the changes in the conditions of pressure-temperature decrease.

Keywords: Conceptual modeling, Tough2, GMS, Modflow, low-medium enthalpy, aquifers, geothermal energy.

Capítulo I

Aspectos generales de Investigación

1.1 Introducción

Por su génesis al ser una fuente de energía renovable y presentar costos tanto ambientales como de explotación mucho menores en comparación al uso de energías fósiles, como por sus distintas aplicaciones útiles, desde la generación de energía eléctrica hasta el procesado sostenible de alimentos, la energía geotérmica representa amplios beneficios. Actualmente México ocupa el sexto lugar (Báez, 2016) a nivel mundial en producción de energía geotérmica. En el Estado de Michoacán se localiza la planta Geotérmica de Los Azufres, la segunda más grande en el país, sin embargo en la actualidad se desarrollan investigaciones relacionadas al aprovechamiento de zonas de baja-mediana entalpía. Algunas de estas zonas, estudiadas desde los ochentas (Cedillo et al., 1981; Vargas Ledezma, 1985), se encuentran localizadas al norte del estado de Michoacán, en localidades dentro de los municipios de Cuitzeo, Tarímbaro, Ixtlán y Villamar (los Negritos).

A grandes rasgos, la energía geotérmica se obtiene por medio de centrales de generación de energía que aprovechan el calor del subsuelo a gran escala. Para llevar este proceso a cabo, un recurso indispensable es el agua que se encuentra en los acuíferos de las zonas donde se explota el recurso hidrotermal. La caracterización de las propiedades hidrogeológicas de los acuíferos, su conceptualización y modelación es indispensable para garantizar el éxito en los procesos de perforación y explotación de la energía geotérmica.

Esta tesis muestra un proceso de modelación del flujo subterráneo transiente en los acuíferos geotérmicos de zonas específicas ubicadas hacia el norte del estado de Michoacán por medio de la aplicación de técnicas computacionales novedosas en hidrogeología.

En los primeros tres capítulos el lector encontrará los aspectos generales de la investigación, descripción de la zona de estudio y los antecedentes principales. En los que se resalta la escasez de modelos conceptuales y numéricos de los acuíferos en la zona de estudio, así como la limitada cantidad de datos para la elaboración de los mismos y una revisión general de los estudios geológicos, geofísicos y geohidrológicos realizados en la región.

En el cuarto capítulo se describe el marco teórico sobre el cual descansa la metodología utilizada para el desarrollo de la investigación. En el capítulo cinco se presentan una descripción de los materiales y metodología empleados, datos y descripción general de la modelación. Finalmente, en los últimos capítulos se exponen los principales resultados obtenidos, una discusión general y las conclusiones correspondientes.

1.2 Justificación

Un desafío fundamental al que se enfrenta México, como muchos otros países en desarrollo, es el de lograr estructurar un buen manejo y explotación de sus recursos naturales. Desde el punto de vista del consumo de energía, el país emplea demasiada energía para producir poco (Bauer et al., 2013). Existen dos tendencias, por un lado, se tiene un uso ineficiente de la energía y por otro lado la continuación de los procesos de urbanización e industrialización en el país conducen a esperar aumentos significativos de la demanda de hidrocarburos. Si bien se puede afirmar que el petróleo tiene una importancia sin precedentes para México al representar más del 90% de la energía primaria del país (Bauer et al., 2013), es inevitable mencionar que esta dependencia energética debe modificarse. El petróleo es un recurso no renovable que cada vez muestra más problemas para su extracción y cuyas reservas [de 13 mil 438.5 millones de barriles de petróleo crudo (Pemex, 2014)] se agotan en

el país (Universia, 2011). México necesita desarrollar alternativas energéticas sin descuidar sus recursos naturales y apostando por el desarrollo de fuentes de energía renovables limpias, como es el caso de la energía geotérmica.

A nivel mundial México ocupa el 4º lugar como generador de electricidad por medio de la energía Geotérmica con una capacidad instalada de 888 MW distribuidos en las plantas geotérmicas de Cerro Prieto (570 MW) y tres vírgenes (10 MW) en Baja California, los Azufres (225 MW) en Michoacán y Los Humeros (68 MW) en Puebla (García-Gutiérrez, 2015).

La clasificación más común de los recursos geotérmicos se basa en la temperatura del agua tomada directamente del reservorio. Para temperaturas mayores a los 150°C los fluidos se denominan de alta entalpia y son adecuados para la producción de energía eléctrica. La investigación relacionada al desarrollo de infraestructura para la explotación de recursos geotérmicos en el país tiene como uno de sus objetivos principales el aprovechamiento de los yacimientos geotérmicos de mediana y baja entalpia (recursos con temperaturas menores a los 150°C) que se utilizan para los denominados usos directos de la energía geotérmica (Santoyo-Gutierrez y Torres-Alvarado, 2010). Desde 1985 Alonso y colaboradores (Ordaz-Méndez et al., 2011) estimaron que las reservas probadas, probables y posibles para recursos de baja-mediana entalpia en la franja del Cinturón Volcánico Trasmexicano eran de aproximadamente 31498 MWe y se sabe actualmente que dichos recursos (Fig. 1) pueden ser utilizados para usos domésticos e industriales como generación de plantas de calor, calefacción, invernaderos, balnearios, agricultura, acuacultura o generar electricidad con temperaturas de 60°C con sistemas híbridos o de ciclos binarios empleando nuevas tecnologías. En total se utilizan 70329 MW para las aplicaciones de la energía geotérmica

directa en 82 países, principalmente en Alemania, Canadá, China, Dinamarca, Estados Unidos, Francia, Islandia, Italia, Japón, Macedonia, Suiza, Suecia y Turquía. México no representa ni el 1% del total instalado para este tipo de aplicaciones reportando una aplicación única en balneología y rehabilitación médica. De acuerdo con datos de García-Gutiérrez (2015), 48 países ya utilizan bombas de calor geotérmicas para proporcionar calefacción, aire acondicionado y agua caliente en casas, oficinas, hoteles, aeropuertos, estaciones del metro, talleres, escuelas, hospitales y centros de recreación y su uso ha representado un ahorro considerable en el gasto de producción de energía eléctrica (véase tabla 1).

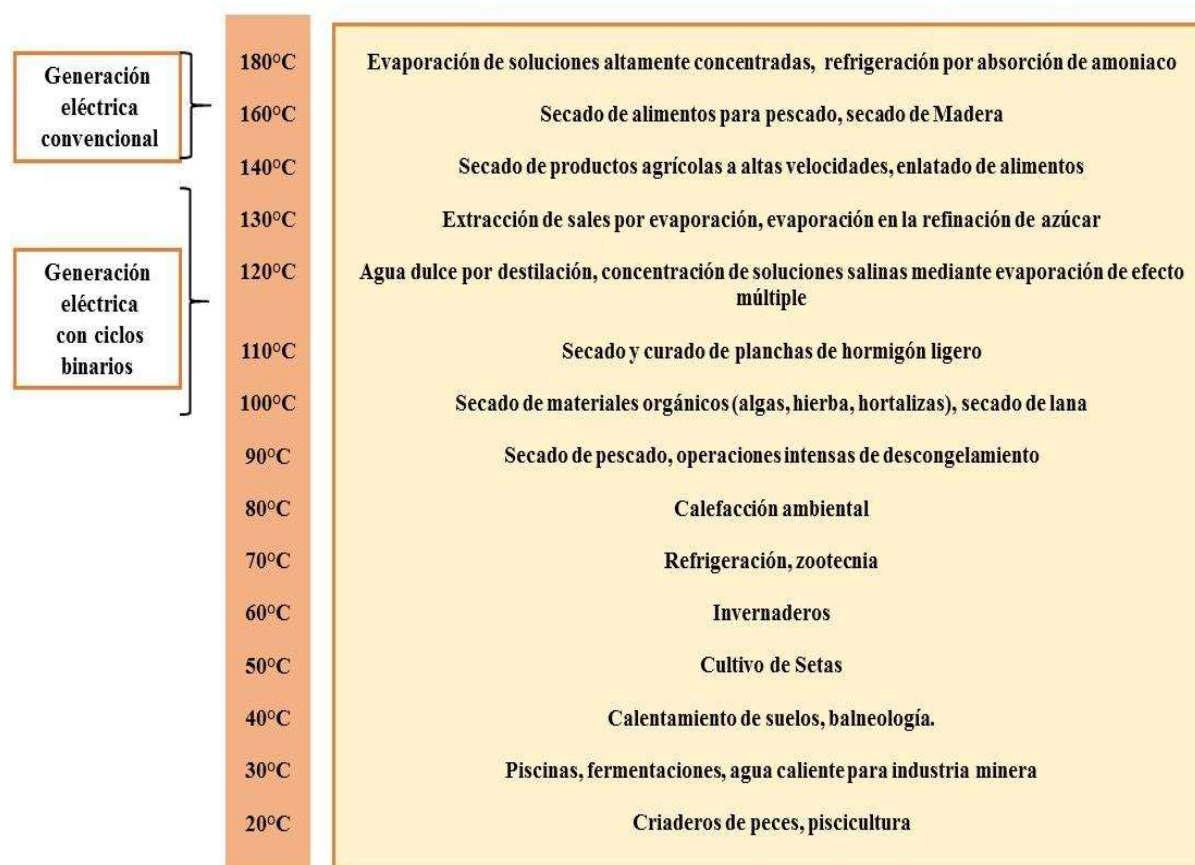


Fig. 1.- Usos directos de la energía geotérmica de acuerdo a la temperatura de los fluidos. (Editada de García Gutiérrez, 2015).

Tabla 1. Usos de la energía geotérmica directa en el mundo (Editada de García Gutiérrez, 2015).

Uso directo	Número de países donde se utiliza	Principales generadores
Bombas de calor geotérmicas	48	Estados Unidos, China, Suecia, Alemania, Francia
Calentamiento de espacios	28	China, Islandia, Turquía, Estados Unidos, Italia.
Calentamiento de invernaderos	18	Turquía, Rusia, Hungría, China y Países Bajos
Calentamiento de canales y estanques de acuicultura	21	Estados Unidos, China, Islandia, Italia, Israel.
Secado de cultivos agrícolas	15	China, Estados Unidos, Hungría
Calentamiento de procesos industriales	15	Curado de concreto (Guatemala, Eslovenia) Embotellado de agua (Bulgaria, Serbia, Estados Unidos) Pasteurización de leche (Rumania, Nueva Zelanda) Industria del cuero (Serbia y Eslovenia) Extracción química (Bulgaria, Polonia, Rusia) Procesado de papel y pulpa (Nueva Zelanda)
Fusión de nieve	6	Islandia, Argentina, Japón, Estados Unidos, Polonia y Eslovenia
Balnearios y albercas	70	China, Japón, Turquía, Brasil y México .

Pese a que la energía geotérmica requiere de una inversión inicial alta, sus costos de mantenimiento son bajos en comparación a las tasas de energía que pueden extraerse, independientemente al clima o a las condiciones geográficas donde se encuentren, lo cual hace que este tipo de energía sea altamente rentable. Pese a esto, el alto potencial de explotación de recursos geotérmicos en México no ha tenido la misma relevancia que la que se ha generado en relación a la explotación de recursos fósiles. En un hecho sin precedentes para el país, la Secretaria de Energía y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología financiaron el proyecto de desarrollo de los Centros Mexicanos de Innovación en Energía

Geotérmica (CEMIE-Geo) a partir de la publicación de la Reforma Energética a finales del año 2013. El proyecto se centra en la búsqueda de metodologías técnicas para mejorar la exploración y el mapeo geotérmico del territorio mexicano, el impacto ambiental de dichas energías, el desarrollo de tecnologías para la generación de la energía eléctrica y otras aplicaciones industriales para el calor geotérmico, el desarrollo de laboratorios especializados y la formación de recursos humanos (Falcón, 2014), esto con el objetivo de dominar y aprovechar la energía geotérmica en México y promover las condiciones adecuadas para desarrollar la industria de la energía geotérmica. Para llevar esto a cabo se requieren estudios multidisciplinarios donde la modelación numérica representa una herramienta de gran importancia técnica, sobre todo considerando que a través de estos modelos podemos recrear escenarios factibles que ayuden a estimar costos y beneficios de los posibles campos a desarrollar y dándoles mayor certidumbre.

Una razón adicional para remarcar la importancia de los estudios multidisciplinarios para la generación de plantas geotérmicas se refleja en la importancia de conocer las formaciones geológicas asociadas a la explotación del recurso, en particular los acuíferos. La ley de Aguas Nacionales (2014) en el artículo 81 de su tercer capítulo del reglamento para el uso de agua en generación de energía eléctrica manifiesta la necesidad de una autorización en materia de impacto ambiental para poder explotar y aprovechar aguas del subsuelo en yacimientos geotérmicos hidrotermales.

La posible afectación a los acuíferos que se presenta al iniciar la explotación de los recursos geotérmicos es un factor que debe prevenirse y ser evaluado antes de comenzar los procesos de perforación y explotación de los recursos geotérmicos. Para poder obtener los permisos de concesiones de agua, los interesados deben presentar a la dependencia correspondiente los estudios del yacimiento geotérmico hidrotermal determinando su

localización, extensión, características y conexión o independencia con los acuíferos adyacentes o sobreyacentes. Si se demuestra esto, el acuífero se considera exclusivamente de tipo geotérmico y su explotación y manejo se rige bajo la ley de energía geotérmica (2014) que permite la perforación de hasta 5 pozos exploratorios para el análisis de la factibilidad de instalación de la planta geotérmica (artículo 14) siempre y cuando se reporte el resultado de dicho estudio ante la secretaria de Energía u organismo correspondiente (artículo 15).

Al no existir antecedentes sobre modelos numéricos exitosos (Lesser y asociados, 2000; Medina-Vega, 2008) en la zona de estudio, este trabajo de investigación aporta un método novedoso para el estudio de las propiedades de flujo del acuífero geotérmico y un criterio para la toma de decisiones sobre la explotación y desarrollo de plantas de energía geotérmica en el estado de Michoacán.

1.3 Hipótesis

- Se puede contribuir al desarrollo hídrico mediante el uso de modelos computacionales de flujo.
- El modelo numérico elaborado aportará información eficiente sobre las características del acuífero de la zona de estudio.
- La puesta en marcha de un pozo productor y extractor no afectará significativamente las condiciones de los acuíferos superficiales presentes en Cuitzeo y Tarímbaro y no representará un inconveniente ambiental para el acuífero superficial y geotérmico en San Agustín del Maíz.

1.4 Objetivos

El objetivo principal de investigación es el de poder aportar información sobre los sistemas de flujo de los acuíferos de Tarímbaro y Cuitzeo por medio de un modelo numérico, que posteriormente, lleve a comprender el flujo de calor en la zona y la conceptualización del acuífero geotérmico de la región para complementar estudios multidisciplinarios que en conjunto permitan el desarrollo de campos geotérmicos de mediana entalpía en Michoacán.

1.4.1 Objetivos particulares:

- Establecer los parámetros de cada acuífero (conductividad térmica, transmisividad, porosidad, índices de almacenamiento, recarga) en base al análisis de la información hidrogeológica disponible.
- Determinar el potencial hidráulico de los acuíferos presentes en la zona de estudio para establecer las zonas de recarga y flujo preferencial subterráneo en cada acuífero.
- Definir el marco geológico en GMS por medio de la información disponible en la zona y de un análisis en campo.
- Modelar el flujo de calor en cada acuífero por medio de subrutinas entre GMS y Tough2.

Capítulo II

Descripción de la zona de estudio

El área de estudio se localiza dentro del acuífero Morelia-Queréndaro, al norte del estado de Michoacán, cubriendo el municipio de Tarímbaro (entre los 19°48'00'' de latitud norte y 101°09'30'' de longitud oeste, a una altura de 1860 msnm), prácticamente la totalidad del municipio de Copándaro (en las coordenadas 19°54' de latitud norte y 101°13' de longitud oeste, a una altura de 1,840 msnm) y una parte del municipio de Cuitzeo (coordenadas 19°58' de latitud norte y 101°08' de longitud oeste, a una altura de 1,840 msnm), así como ciertas partes de los municipios de Álvaro Obregón, Charo y Morelia (Fig. 2).

El acuífero Morelia-Queréndaro, se ubica en la porción noreste del estado de Michoacán, entre los paralelos 19° 26' y 20° 08' de latitud norte y los meridianos 100° 38' y 101° 29' de longitud oeste, abarca una superficie aproximada de 3,510 km². Geopolíticamente abarca la totalidad de los municipios Cuitzeo, Huandacareo, Santa Ana Maya, Copándaro, Tarímbaro, Álvaro Obregón; de manera parcial los municipios de Morelos, Chucándiro, Morelia, Quiroga, Lagunillas, Acuitzio, Charo, Zinapécuaro, Queréndaro e Indaparapeo; y pequeñas porciones de los municipios de Pátzcuaro, Huiramba y Huaniqueo.

El valle Morelia-Queréndaro forma parte de una serie de sistemas lacustres localizados en el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano que son producto de la evolución tectónica y magmática intra-arco relacionada a la subducción de la Placa del Pacífico en la placa Norteamérica. La región se encuentra afectada por sistemas de fallas con dirección E-O y NE-SO que dieron origen al valle donde se aloja el sistema acuífero (Rodríguez-Castro et al., 2012). En la región están presentes ignimbritas, brechas y tobas de composición riolítica que datan desde el Mioceno Inferior al Mioceno actual y depósitos lacustres y de aluvión del

Cuaternario Reciente. La tectónica de la región propicia el movimiento de aguas termales hacia el acuífero que a su vez resulta en zonas de mezcla de agua con calidades muy contrastantes (Silva y Steinich, 2003).

De acuerdo con la información geológica, geofísica, hidrogeológica y cortes litológicos de pozos, es posible determinar la existencia de un acuífero heterogéneo y anisótropo, en general de tipo libre, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de sedimentos arcillosos en la porción alledaña al Lago de Cuitzeo. El acuífero se aloja en una depresión tectónica y está conformado, en su porción superior, por sedimentos clásticos de granulometría variada así como sedimentos arcillosos que se depositaron en la parte baja de la cuenca, en el bloque de techo que se bascula al sur y da espacio al depósito de los sedimentos donde se localiza el Lago de Cuitzeo; el basamento está constituida por rocas volcánicas que presentan permeabilidad primaria y secundaria, principalmente basaltos y tobas (CONAGUA, 2009).

El medio granular y fracturado del acuífero Morelia-Queréndaro conforman una misma unidad hidrogeológica que presenta en general un espesor promedio de 300 a 400 m. Las distintas unidades que conforman el acuífero muestran variaciones: al poniente está alojado principalmente en tobas pumíticas con horizontes líticos y arcillosos y tobas soldadas, cuya geometría es controlada por los sistemas de fallas O-E; hacia Álvaro Obregón y Queréndaro está conformado principalmente por sedimentos clásticos del tamaño de gravas y arenas y hacia la zona contigua al Lago de Cuitzeo por sedimentos arcillosos, brechas andesíticas, basaltos, brechas y cenizas basálticas (CONAGUA, 2009).

En el acuífero Morelia-Queréndaro se registran 986 pozos y 23 manantiales. La extracción de agua subterránea es de 162.2 hm³/año. El uso principal del agua es agrícola, después público urbano (González-Castro et al., 2012).

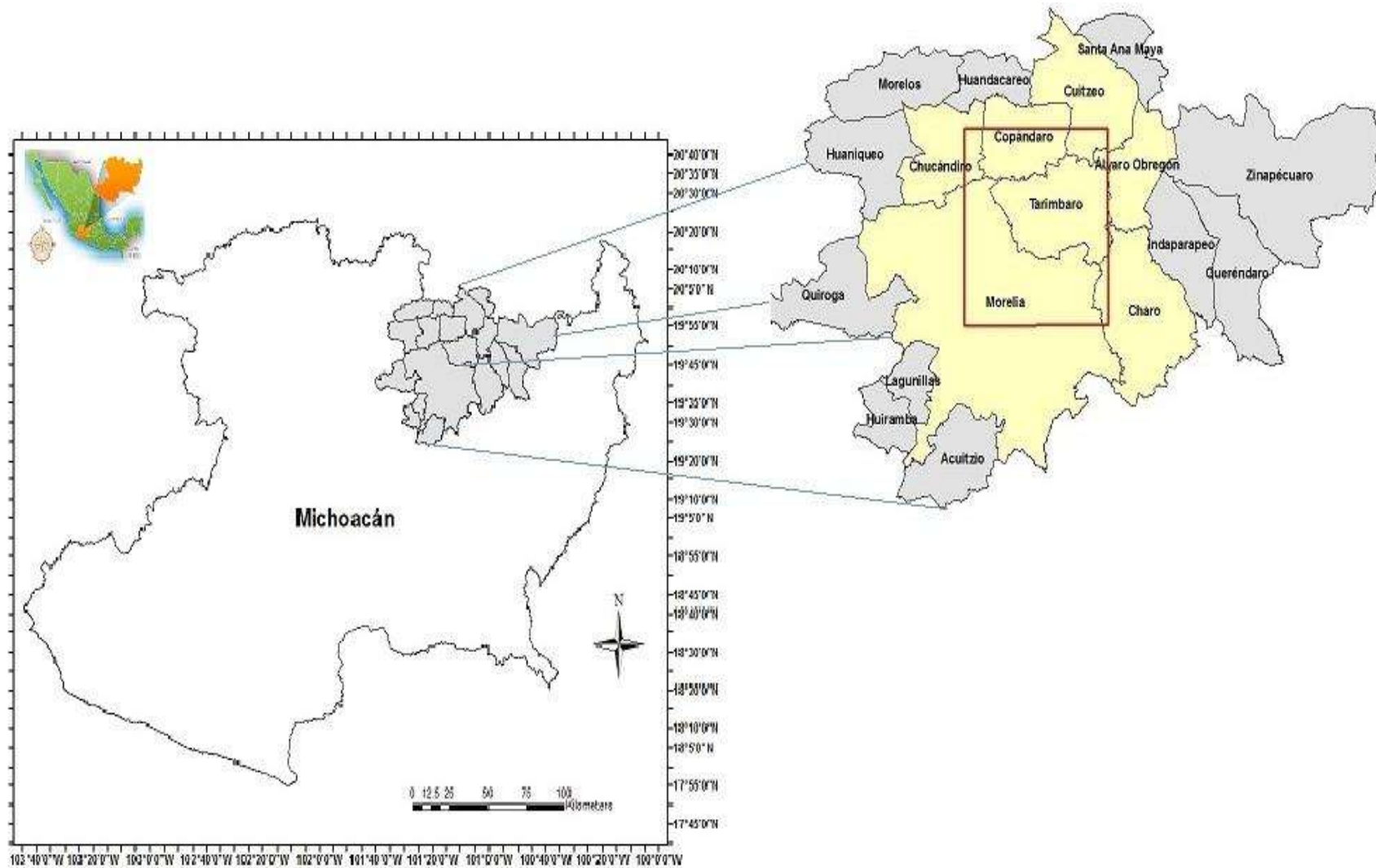


Fig. 2.- Localización de la malla de modelación Morelia en el Acuífero Morelia-Queréndaro en el estado de Michoacán.

2.1 Localización

La zona de modelación forma parte del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) y al tener presencia de acuíferos de origen volcánico y sistemas caracterizados de fallas, estos muestran gran permeabilidad asociada a la porosidad secundaria y a una alta transmisividad relacionada con las fracturas presentes en la roca (Medina-Ortega, 2010), motivo por el que despiertan interés para la explotación de recursos energéticos como la geotermia.

2.2 Clima

La zona de estudio presenta primordialmente clima templado subhúmedo con lluvias en verano y parte de otoño, precipitación pluvial anual de 749.5 mm en promedio con lluvias de menos del 5% en invierno. La fluctuación de temperaturas esta entre los 7°C y los 25°C de forma general pero en base a datos de 1986-2005 la temperatura promedio mensual en Tarímbaro es de 17.8°C, 18°C en Cuitzeo en base a datos de 1923-2005 y 18.1°C en Morelia para datos entre 1947 y 2005.

La evaporación promedio anual en Tarímbaro es de 128.23 mm, de 157.9 mm en Cuitzeo y 155.3 mm en Morelia. Además de señalar que los niveles más altos de evaporación se reportan en la porción central del lago (Medina Vega, 2008).

Es de vital importancia para el desarrollo del modelo conocer aspectos generales del clima en la región debido a que la construcción del modelo conceptual y las simulaciones en Modflow requieren de la construcción de polígonos con la precipitación y evaporación media anual de la región.

2.3 Hidrología

Hidrológicamente el sitio se localiza en la región conocida como el sistema Lerma-Chapala-Santiago. Se constituye por el río San Marcos (de poniente a Oriente de Tarímbaro), arroyos temporales (la Barranquilla Grande y el Tren), manantiales de aguas termales (San Agustín del maíz) y el Lago de Cuitzeo. El lago es alimentado por manantiales pero su profundidad máxima no alcanza los 2.25 m, lo cual favorece la rápida evaporación.

Existen 604 aprovechamientos. 434 corresponden a pozos profundos, 32 a norias y 138 a manantiales. Entre enero de 1997 y diciembre de 1998 la profundidad media del espejo de agua¹ en Álvaro Obregón-Queréndaro fue de 7.8 m, en la periferia del lago de Cuitzeo de 14-16 m y en el valle de Morelia la máxima profundidad registrada fue de 88.25 m (Rodríguez-Castro et al., 2012).

Medina-Vega (2008) reporta que en la Cuenca del Lago de Cuitzeo existen principalmente tres acuíferos: uno en la unidad fluvio lacustre (acuífero superficial), otro en un acuífero intermedio (flujos piroclásticos e ignimbritas) y el tercero que corresponde al material andesítico que es el más antiguo de la zona y en donde se cree puede estar alojado el acuífero geotérmico.

Por otro lado, Rodríguez-Castro et al. (2012) reporta que en el subsuelo del valle Morelia-Queréndaro existen tres zonas acuíferas: la zona acuífera del valle de Morelia que se encuentra hacia el suroeste de la ciudad entre las carreteras Morelia-Pátzcuaro y Morelia-Quiroga; la de la planicie Álvaro Obregón-Queréndaro, que cuenta con la mayor extensión y espesor en todo el valle y que se localiza en las porciones centro y oriente del valle cubriendo

¹ Espejo de agua: capa de agua profunda.

además los poblados de Tarímbaro, Tégjaro, Carrillo Puerto, Tzitzimeo y Francisco Villa. Finalmente reporta la zona acuífera de los alrededores del Lago de Cuitzeo que se constituyen de diferentes formaciones entre las que destacan brechas de carácter andesítico asentadas en fallas, derrames, efusiones, brechas y cenizas (de composición basáltica), aluviones y depósitos de origen lacustre.

2.4 Geología

La zona de estudio se localiza dentro del CVTM, una zona volcánicamente activa que atraviesa el país de Este a Oeste, en dicha faja se alojan el 79% de las anomalías termales conocidas en México. En el sector central del CVTM entre el rift de Colima y el sistema de fallas Taxco-Querétaro sobre un basamento local de magmatismo bimodal que va de basaltos a riolitas se desarrolla el campo volcánico Michoacán-Guanajuato que data del Plioceno Tardío (Fig. 3) y está formado por centros monogenéticos y pequeños volcanes escudo de composición basáltica (Ferrari, 2000; véase Fig. 4). Los focos termales de la subregión sur de la faja están constituidos por las anomalías cercanas a los lagos de Yuriria, Cuitzeo y Pátzcuaro, alojadas en depresiones tectónicas (González y González-Ruiz, 2015).

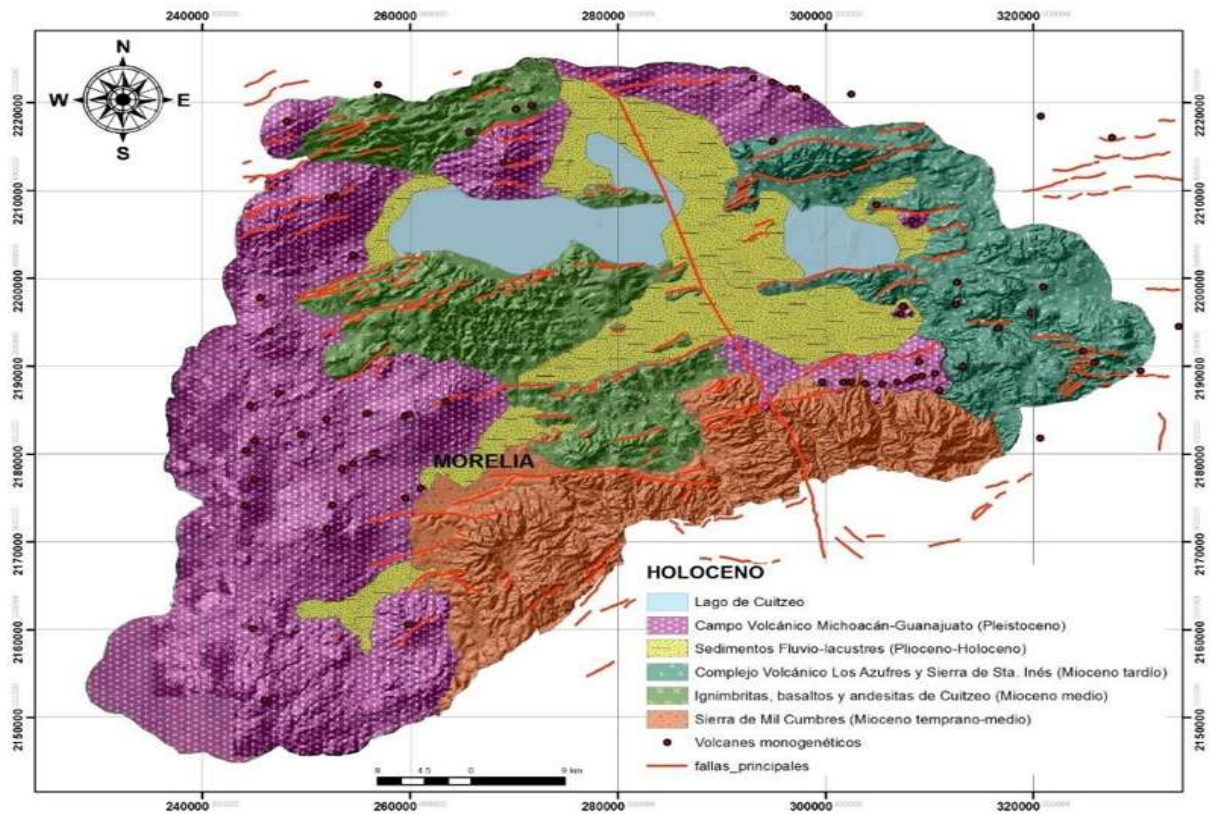


Fig. 3.- Mapa de la Cuenca del Lago de Cuitzeo en el Pleistoceno y en el Holoceno Reciente para el análisis de la edad del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (Gómez-Vasconcelos et al., 2012).

La región terrestre de la zona está dominada por cordilleras de crestas y conos volcánicos fuertemente disectados por cárcavas donde predomina el drenaje radial. El Lago de Cuitzeo tiene un basamento conformado por lavas de composición andesítica que fueron emitidas desde hace 19 M.a. (Trujillo-Hernández, 2017). El vulcanismo y la erosión sucesiva han provocado complejas variaciones en la red hidrológica y los patrones de sedimentación hacia el lago (Israde *et al.*, 2010). Los límites del lago están conformados por fallas y semigrabens constituidos por rocas volcánicas, lo que ha favorecido el ingreso de material detrítico y epiclástico (Razo, 2007).

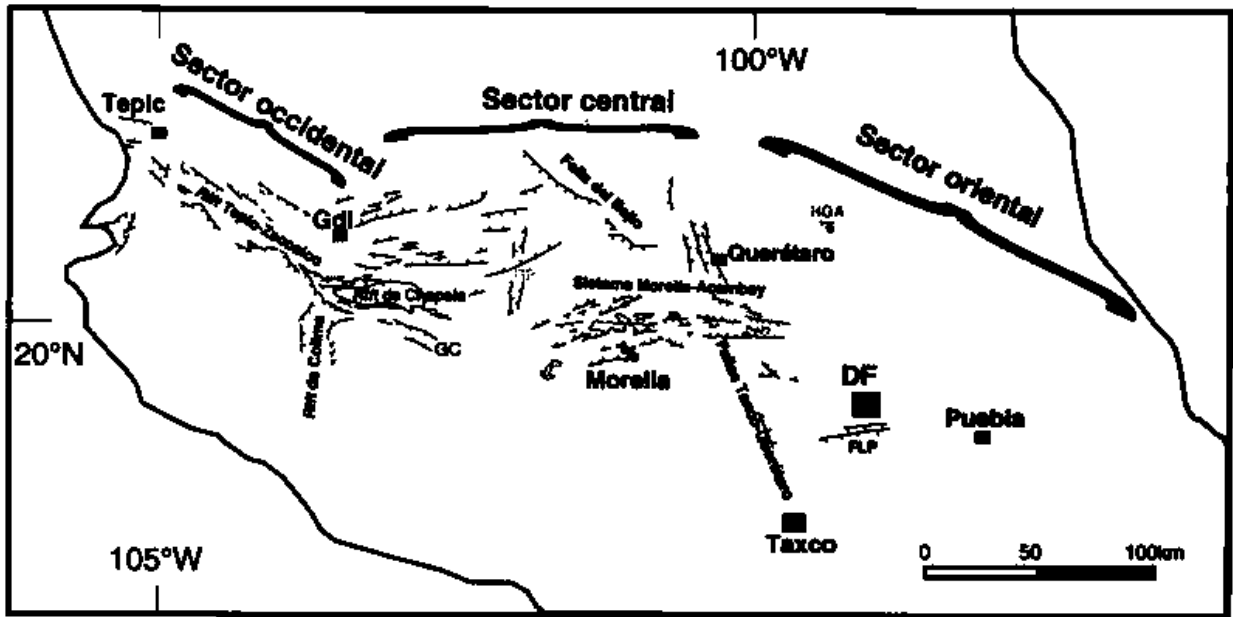


Fig. 4.- Principales sistemas de fallas con edades inferiores a los 10 M.a. que afectan al Cinturón Volcánico Transmexicano (Ferrari, 2000).

2.6 San Agustín del Maíz

La zona con manifestaciones hidrotermales y con principal interés de estudio desde los años ochenta (Fig. 5), se localiza en la porción sur del Lago de Cuitzeo, en la localidad de San Agustín del Maíz. Se encuentra en el municipio de Copándaro Michoacán a 1840 msnm, a unos 37 km de la capital del Estado. Desde Morelia se puede llegar a la localidad por la carretera federal 43 Morelia-Uriangato.

San Agustín del Maíz está afectado por una tectónica extensional con un mínimo esfuerzo horizontal de dirección N 330° que forma fallas normales de dirección ENE, NE y E-O que caen principalmente hacia el N. Estas fallas forman parte del sistema de fallas Morelia-Acambay. Olvera-García et al. (2017) propone que la zona de San Agustín del Maíz se encuentra en una intersección de fallas donde habría acumulación de esfuerzos lo cual

favorece a la permeabilidad de las rocas de la región, que a su vez dependen de la densidad de las fracturas de las rocas, su orientación y su conductividad hidráulica.

El acuífero geotérmico cuenta con presencia de flujos piroclásticos, lavas andesíticas, basaltos, conglomerados, Metareniscas, granitos y riolitas (CONAGUA, 2009).

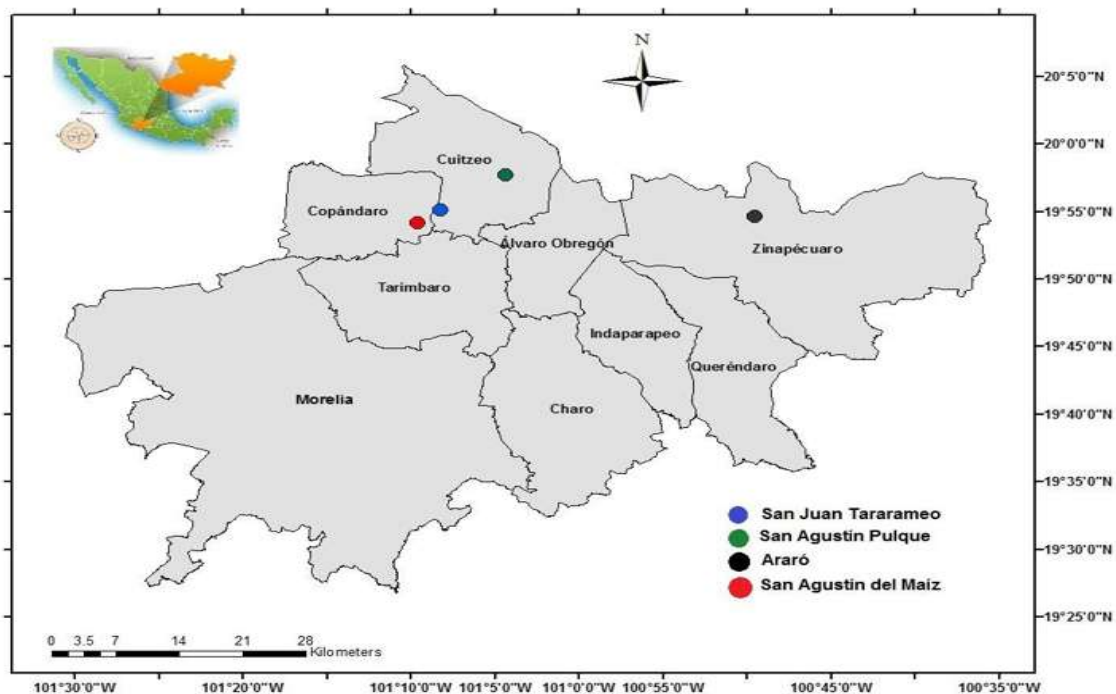


Fig. 5.- Localización geográfica de las principales zonas de interés geotérmico al norte del estado de Michoacán.

Todo proyecto de explotación de energía geotérmica se ejecuta generalmente en cinco fases: reconocimiento, prefactibilidad, factibilidad, desarrollo y explotación sostenible del recurso (Bruni, 2014). En Michoacán, la localidad de San Agustín del Maíz y sus alrededores se encuentran en la etapa de prefactibilidad donde se han conjuntado estudios de geología, geofísica, geohidrología y geoquímica (Guevara-Alday, 2016; Olvera-García, 2017; Trujillo-

Hernández, 2017) para establecer la factibilidad del desarrollo y explotación de una planta de energía geotérmica en la zona, dentro de esos estudios los modelos numéricos aportan herramientas para la toma de decisiones correspondientes.

Capítulo III

Antecedentes

Existen muchos estudios a nivel regional y local desarrollados, ya sean de carácter hidrogeológico, geológico, geoquímico o geofísico que se han elaborado para determinar las características y el potencial hidrotermal de los acuíferos presentes en el norte del estado de Michoacán, especialmente en la cuenca del Lago de Cuitzeo. En este apartado se presenta una síntesis de dichos trabajos.

La primera estimación de los recursos geotérmicos de la República Mexicana la elaboró Alonso en 1975 destacando la importancia de iniciar con los estudios de factibilidad de explotación en diversas zonas del país. Para 1981 Cedillo et al., hicieron un estudio de los acuíferos en Cuitzeo definiendo 3 tipos diferentes: un acuífero superficial en medios granulares, uno intermedio en rocas andesíticas y uno profundo constituido por rocas andesíticas. Este trabajo fue retomado en 1985 por Vargas-Ledezma quien enfatizó las áreas de San Juan Tarameo, San Agustín del Maíz, San Agustín del Pulque y la Estación de Queréndaro, zonas aledañas o en el municipio de Cuitzeo, con particular importancia para la explotación de recursos geotérmicos, que además supuso como parte de un mismo sistema geotérmico debido a la similitud química de su composición, estimando que las principales fuentes de alimentación al sistema provienen del acuífero inferior regional y en menor escala del acuífero superior que actúa como diluyente. Así mismo, señalaba que la uniformidad del acuífero superior de la zona es interrumpida únicamente en algunas localidades por efectos de sobreexplotación o abatimiento en la zona del municipio de Tarímbaro. De forma paralela Alonso en 1985 nuevamente hizo un cálculo basado en definiciones de reservas probadas,

probables y posibles sumando 11490 MWe y de 31498 Mwe para temperaturas bajas-intermedias únicamente en el Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM).

Años más tarde la empresa Lesser y Asociados (2000) comenzaron los procesos de modelación de la zona. Hicieron un modelo matemático del valle de Cuitzeo para el análisis de los acuíferos de la zona, principalmente hacia la parte norte en la región colindante con el estado de Guanajuato. En dicho estudio se utilizó el software visual Modflow y Surfer para la modelación de la superficie del terreno, sin embargo no reportaron resultados de la modelación, solo se mencionan los criterios empleados para la elaboración de las condiciones de frontera y los parámetros físicos utilizados (permeabilidad, porosidad, carga hidráulica). Concluyen que en la parte norte del acuífero hay una buena permeabilidad que permite infiltraciones y la recarga del acuífero con flujo hacia el sur (en el municipio de Cuitzeo) y brotando en forma de manantiales o por medio de pozos. Señalaron que el basamento geohidrológico del acuífero, que en su mayoría es de tipo libre, a profundidad está constituido por materiales aluviales y partes de una secuencia ignimbrítica superior del Oligoceno. Concluyeron que la profundidad del nivel estático promedio esta entre los 20-40 m con un abatimiento promedio anual de 1 m y resaltaron la importancia de controlar las extracciones en estos acuíferos.

Garduño-Monroy et al. (2001) desarrollaron un estudio de las fallas asociadas a la sobreexplotación de los acuíferos en Morelia. Señalan que las fallas de la Paloma, la Colina y Tarímbaro se consideran sísmicamente activas. Concluyeron resaltando que la sobreexplotación de las aguas subterráneas es uno de los factores principales para la generación del hundimiento diferencial o creep de las diferentes zonas, resaltando la

importancia de generar técnicas de extracción y diseño de pozos para la explotación del acuífero contenido en los sedimentos fluviolacustres.

Por su parte Iglesias (2002) continuo los trabajos de Alonso (1985) y evaluó las reservas geotérmicas de 297 localidades con presencia de manifestaciones hidrotermales estimando que las reservas estaban entre los 7.7×10^{16} - 8.6×10^{16} kJ.

En ese mismo año se daba a conocer un avance importante en la caracterización de acuíferos geotérmicos con base en análisis químicos². Alfaro et al. (2002), por el método de centelleo liquido determinaron la presencia de Radón en manantiales y pozos en zonas urbanas y agrícolas alrededor del Lago de Cuitzeo. Se estudiaron elementos mayores por medio de análisis químicos convencionales y elementos traza por la técnica de espectrometría de masas encontrando rangos altos de Radón en las estaciones de Cuitzeo, Jeruco, Panteón y los Baños.

Posteriormente Segovia et al., (2005) reportan zonas de interés para la posible explotación de recursos geotérmicos: San Agustín del Pulque, San Juan Tarameo, San Agustín del maíz y Araró. En las primeras 3 zonas encontrando alteraciones hidrotermales y en las muestras de Araró una composición química similar a la de Los Azufres, indicando una correlación entre ambos fluidos. Reportan que las zonas de interés presentan temperaturas entre 129°C y 216°C, a partir de las cuales concluyen con que las zonas son óptimas para la generación de energía eléctrica por ciclos convencionales o binarios.

En 2006 García et al., elaboraron un mapa nacional de los recursos geotérmicos de México y señalaron la importancia de estudiar a detalle las localidades de Cerritos Colorados, Los

² La presencia de Radón en las rocas puede proveer información concerniente al origen del agua circundante y sus mecanismos de flujo y por tanto los acuíferos pueden determinarse de acuerdo a su concentración de Radón.

Azufres, Cuitzeo, Ixtlán de los Hervores y zonas volcánicas de Nayarit (Ordaz-Méndez et al., 2011).

Garduño-Monroy y Avila-Olivera (2007) a partir de la información de los pozos de extracción de agua subterránea desarrollaron un análisis sobre el abatimiento actual del nivel freático y reportaron la existencia de tres acuíferos en la ciudad de Morelia:

1. Acuífero confinado, profundo, con flujo intermedio ubicado dentro del techo de las andesitas muy fracturadas y con conductividades hidráulicas secundarias cuya superficie freática se encuentra a una profundidad de entre 100 y 150 m.
2. Acuífero somero de tipo libre que se encuentra entre los poros de los depósitos lacustres y fluviolacustres del Mioceno-Plioceno.
3. Acuífero localizado en lavas del vulcanismo tipo semiescudo y que da lugar a los manantiales más importantes de la ciudad de Morelia como son los de La Mintzita, los de La Colina y Manantiales.

Observaron que en la parte norte de la ciudad se explotan los 3 acuíferos y hacia el sur los de la secuencia lacustre y el acuífero profundo de las ignimbritas y andesitas, así como que los bloques que se basculan se localizan en la parte NE de la ciudad donde el agua es extraída del acuífero de las secuencias lacustres. Posteriormente reportaron los siguientes acuíferos relacionados con la cuenca del Lago de Cuitzeo:

1. Un acuífero regional profundo, alojado en las andesitas fracturadas y por debajo de los 1600 msnm, es un acuífero regional, con poco oxígeno, muchos sólidos y temperaturas del flujo regional.
2. Un acuífero intermedio entre 1759 y 1600 msnm, que se encuentra en las andesitas e ignimbritas fracturadas con recargas en la zona de mil cumbres y sierra de San Andrés (los azufres), su circulación es de Sur a Norte.
3. Un acuífero intermedio en las secuencias granulares fluviolacustres con recargas en el lago de Cuitzeo, en los bloques basculados y en las sierras medias.
4. Un acuífero superior asociado a los manantiales que surgen entre las lavas del vulcanismo reciente y las secuencias lacustres (la Minzita, Manantiales, etc.)
5. Acuífero asociado con el flujo geotérmico concentrado con las fallas normales EO y ENE-OSO.

Adicionalmente en los reportes elaborados por CONAGUA (2009) para toda la planicie Tarímbaro-Álvaro Obregón-Queréndaro se describe que en la zona existen 2 acuíferos principales, uno de ellos ubicado entre 1848 y 1700 msnm alojado en secuencias lacustres y fluviolacustres. Otro profundo que se alberga en andesitas e ignimbritas fracturadas entre 1750 y 1600 msnm.

En un esfuerzo por caracterizar el comportamiento del acuífero Cuitzeo-Tarímbaro se han realizado diversos estudios en el mismo, sin embargo, pocos relacionados con la modelación numérica o conceptual. Medina Vega (2008), realizó una investigación relacionada a la geohidrología en Cuitzeo. Concluyó con un modelo conceptual a partir de datos geológicos, de estratigrafía, geología estructural, hidrogeoquímica, piezometría y geofísica, pero señaló

que los datos de precipitación, evaporación e infiltración media anual, gravimetría y magnetometría resultaron insuficientes para la modelación en Modflow haciendo énfasis en la necesidad de recabar información de las condiciones hidrodinámicas de los acuíferos mediante la realización de pruebas de bombeo para determinar coeficientes de almacenamiento, volúmenes de escurrimiento, medición de infiltraciones y las conductividades hidráulicas de zonas aledañas al acuífero.

Los procesos de modelación en la región los continuaron Ortiz-Rivera et al. (2010). Aplicaron un programa de modelamiento hidrológico denominado SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para simular la producción de agua y sedimentos en la cuenca del Lago de Cuitzeo con el cual identificaron las zonas de escurrimiento como variable de respuesta hidrológica analizando el efecto de diferentes cambios de cobertura y uso del terreno con o sin cambios, así como el efecto de la precipitación en la respuesta hidrológica en términos de cantidad, concluyendo con datos de recarga media anual para los acuíferos de la zona.

Por su parte Medina-Ortega (2010) elaboró un modelo matemático del acuífero Ciudad Hidalgo-Tuxpan en el oriente del estado de Michoacán, con datos del año 2003-2007 utilizando el software Modflow 2005 en el cual se resolvió de forma tridimensional la ecuación de flujo de agua subterránea. Los parámetros hidráulicos de la zona se basaron en la reinterpretación de 10 pruebas de bombeo recopiladas de trabajos anteriores para estimar condiciones hidráulicas que se utilizaron como valores iniciales de los materiales geológicos para el modelo matemático del acuífero. El modelo logró reproducir el comportamiento hidráulico del acuífero con un error inferior al 5% de cargas hidráulicas medidas contra las cargas hidráulicas simuladas.

Para calcular, comparar y evaluar el balance hídrico de la cuenca de Cuitzeo, García et al., (2011) utilizaron 3 aproximaciones para la estimación del balance hídrico regional

espacialmente distribuido en cuencas sin datos de aforos. Se elaboró la estimación puntual del balance hídrico mensual por medio del método Thornthwaite & Mather y polígonos de Thiessen y se aplicó la ecuación Fao-Penman para el cálculo y distribución de parámetros. Con la metodología empleada lograron comparar temperaturas medias, precipitación anual, una media anual del exceso de humedad y un déficit de humedad media anual.

Los procesos de modelación numérica con aplicación del software de nuestro interés, se han desarrollado en Italia, donde se elaboraron modelos numéricos empleando subrutinas entre GMS y Tough2. Se hizo un estudio de las mareas presentes en la costa de la Laguna de Venecia en 2011 (Borgia et al.). Se emplearon modelos calibrados de Modflow desarrollados con las interfaces graficas de GMS para poder caracterizar los flujos de agua y depositación de arenas. Se aplicaron mallas de 100x60 celdas cuadradas, para un total de 252 mil celdas que posteriormente fueron utilizadas para elaborar subrutinas en lenguaje FORTRAN a las que llamaron TMT2 (Translating MODFLOW to tough2) para poder trasladar esta malla con todas las condiciones de frontera hidrogeológicas a un archivo de Tough2 y se añadió información adicional para conseguir las diferentes simulaciones. El potencial de Tough2 para el análisis transiente del flujo de calor en sistemas bifásicos es el motivo principal por el cual nos interesamos en la metodología utilizada en Italia.

Correa-González et al. (2012) utilizaron series temporales de datos climatológicos, hidrométricos, de pozos, de la calidad de la red superficial y del acuífero y aplicando la formulación de Teméz en un Sistema de Información Geográfica, obtuvieron la escorrentía superficial y subterránea en la cuenca del rio grande y el acuífero Morelia-Queréndaro aplicando una discretización en celdas de 1000 x 1000 m. El modelo simuló el acuífero y el transporte de sedimentos tomando datos anuales de concentraciones y su distribución

mensual en la red superficial y en el acuífero, así como el excedente de Nitrógeno anual en el área de estudio. Concluyeron que existe una relación entre las actividades agropecuarias en la zona y la concentración de Nitratos en el acuífero, observando que las mayores concentraciones se presentan en la ciudad de Morelia, Tarímbaro, Álvaro Obregón y zonas aledañas a Cuitzeo.

Posteriormente en 2014, en un estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia, Garduño-Monroy et al., observaron que el área de descarga del sistema acuífero se ubica hacia la margen NE y en particular en el Lago de Cuitzeo. Reportaron que el nivel estático en las aguas subterráneas de la cuenca del Lago durante los meses anteriores a la temporada de lluvias se mantiene a menor profundidad en la rivera SO del Lago de Cuitzeo e incrementa el nivel freático del mismo, resaltando que el flujo del agua subterránea se concentra mayormente en esta misma zona del lago. En cambio para los meses posteriores a la temporada de lluvias la menor profundidad del nivel estático se mantiene en la zona NE de la Rivera del Lago de Cuitzeo, cambiando también la dirección del flujo subterráneo que se desplaza a la zona NE del lago. Así mismo, se menciona la existencia de dos direcciones principales de flujo, la primera ocurre en Morelia y Tarímbaro la cual es una zona de recarga del acuífero en el S y SO. La segunda tiene una dirección de flujo que va hacia el NO y recibe principalmente la aportación de la parte sur, SMC (Sierra de Mil Cumbres), de igual forma que la primera la dirección del flujo tiende a ir hacia el lago. Con base en los niveles estáticos y las direcciones de flujo para la cuenca de Cuitzeo, determinaron que la zona de recarga del acuífero profundo se localiza principalmente en la SMC y la descarga del mismo se origina tanto en la ribera sur del lago como en una porción de la zona norte en la localidad de Santa Ana Maya.

Capítulo IV

Marco Teórico

Geotermia es un término empleado para referir a la energía térmica natural que existe en el interior de la Tierra. En la práctica se le denomina así al estudio y utilización de la energía térmica que transportada a través de rocas y/o fluidos se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales de la misma dando origen a los sistemas geotérmicos (Santoyo-Gutiérrez y Torres-Alvarado, 2010). A escala de los tiempos geológicos el manto terrestre se comporta como un fluido viscoso y sus movimientos permiten que el calor interno fluya hacia la superficie principalmente por procesos convectivos, aprovechando las fracturas o adelgazamientos de la corteza terrestre (Fig. 6). Gran parte del magma no logra llegar a la superficie y tiende a acumularse debajo de ésta en donde calienta grandes regiones de roca o depósitos de fluido, las cuales dan origen a los sistemas geotérmicos. El calor utilizado en dichos sistemas proviene de lugares privilegiados dentro de un espesor de hasta 3 km de profundidad, más abajo la temperatura es mayor pero no existen las condiciones técnicas para aprovecharlo ya que la permeabilidad de las rocas se reduce por la acción de cargas litostáticas (Santoyo-Gutiérrez y Torres-Alvarado, 2010).

El descubrimiento en 1818 de sales de Boro en Larderello Italia, marco el inicio de la utilización industrial de los recursos geotérmicos. En 1827 el fundador de esta industria, Francois Larderel, desarrolló un sistema para utilizar el calor de los fluidos en procesos de evaporación. La industria que este científico Francés fundó, dio paso a la generación de electricidad a partir de vapor geotérmico en 1904, entrando en funcionamiento una central de 250 kW en 1913 (Llopis-Trillo y Angulo, 2006). Después de la Segunda Guerra Mundial la energía geotérmica comenzó a causar interés a nivel mundial, siendo la década de los

setenta la de mayor auge para este ramo energético con una intensa actividad de exploración e investigación.

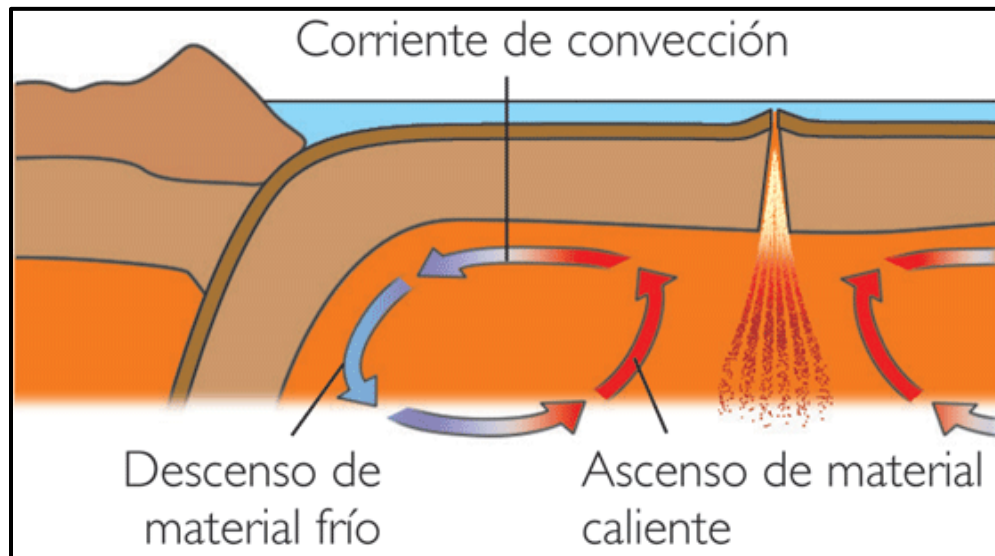


Fig. 6.- Corrientes de convección en la astenosfera donde el calor aprovecha debilidades corticales para su ascenso a la superficie terrestre.

Al ser un país con amplia actividad volcánica y tectónica, México no perdió la oportunidad de comenzar a aprovechar sus recursos geotérmicos y comenzó a explotar el campo de Pathé en el estado de Hidalgo entre 1959 y 1972 (Hiriart Le Bert, 2011), sin embargo, la falta de permeabilidad del campo y las malas técnicas de perforación llevaron al fracaso del yacimiento geotérmico. Fue hasta 1973 que se inició la producción exitosa de energía eléctrica por fuentes geotérmicas en la planta de Cerro Prieto Baja California, la tercera más grande a nivel mundial con una capacidad instalada de 720 MW. Posteriormente en abril de 1982 es puesta en marcha la central de energía geotermoeléctrica Los Azufres en Michoacán con una capacidad de 190 MW. La planta de los Humeros en Puebla, inició su

etapa de producción con capacidad instalada de 35 MW y es en 2001 que lo hizo la planta de las Tres Vírgenes con 10 MW de capacidad.

La energía geotérmica representa un tipo de energía renovable, económica y limpia. La fuente de la energía geotérmica es el calor que fluye del interior de la Tierra hacia su superficie, por lo cual es común que se explote en zonas de actividad volcánica o géiseres. Existen evidencias que muestran que la energía geotérmica ha sido utilizada desde hace más de quince mil años. La observación de fumarolas, géiseres y aguas hidrotermales naturales llevaron al ser humano a dar diferentes usos al calor procedente del interior de la Tierra desde la antigüedad. Fue hasta el siglo XIX que los avances científicos y tecnológicos sobre el subsuelo llevaron a desarrollar mejores métodos de aprovechamiento de dicho recurso.

Para la correcta explotación del recurso geotérmico se requiere del conocimiento de los sistemas geotérmicos. Un sistema geotérmico está formado por una fuente de calor a una profundidad pequeña (500-1000 m) que garantiza un elevado flujo térmico por un largo periodo de tiempo, recubierto de roca impermeable caliente que permite la transferencia de calor a la capa de roca permeable que hay por encima de ella conteniendo agua (acuífero), permitiendo la circulación de esta cerca de la roca caliente. Los acuíferos son formaciones geológicas subterráneas permeables, susceptibles de almacenar y transmitir el agua. Los acuíferos geotérmicos cuentan con la característica de almacenar fluidos a altas temperaturas (Ordoñez-Galvez, 2010). Sobre los acuíferos geotérmicos regularmente se encuentra una capa de roca impermeable y algunas fallas que delimitan el yacimiento y permiten el aporte de agua a partir de las precipitaciones. El agua adquiere la temperatura del sistema geotérmico y se presenta en forma de vapor o como mezcla de líquido y vapor según las condiciones de Presión y Temperatura del yacimiento (Santoyo-Gutiérrez y Torres-Alvarado, 2010).

Los ambientes geológicos en los que el magma puede encontrar agua son numerosos. Esto es debido a que la presencia de agua es abundante en la corteza terrestre, tanto formando acumulaciones de agua subterránea como superficial, así como dentro de los poros y las fracturas de las rocas o incluso en la estructura de los minerales hidratados.

El volumen de roca con temperaturas anormalmente elevadas para la profundidad a la que se encuentran, susceptible de ser recorrido por una corriente de agua que pueda absorber calor y transportarlo a la superficie se conoce como yacimiento geotérmico. Un yacimiento geotérmico debe estar formado por rocas de alta permeabilidad, además de estar localizado dentro de un sistema hidrológico que permita la recarga hidráulica del área en explotación. Es de esta forma que todas las partes del sistema hidrológico implicado, incluida la zona de recarga y el flujo saliente, forman los denominados sistemas geotérmicos.

Se han identificado nueve tipos de sistemas geotérmicos (ver Tabla 2): sistemas convectivos hidrotermales (Fig. 7), sistemas geotérmicos mejorados (roca seca caliente, Fig. 8), sistemas geopresurizados, sistemas geotérmicos conductivos sedimentarios, sistemas geotérmicos radiogénicos, sistemas marinos, sistemas magmáticos, sistemas geotérmicos de agua caliente asociado con yacimientos de petróleo y gas y los sistemas geotérmicos supercríticos.

Los sistemas geotérmicos que son más explotados en el mundo son los del tipo convectivo hidrotermal. Estos están constituidos por una fuente de calor, fluido (líquido y/o vapor) y roca, en donde se almacena el fluido geotérmico (yacimiento, reservorio o acuífero). El fluido que existe en los sistemas hidrotermales tiene su origen como agua meteórica (agua de lluvia, hielo o de nieve). Estos sistemas a su vez se clasifican en los de vapor dominante (muy poco

frecuentes) y los de líquido dominante (de alta y baja entalpia) [Hammons, 2004; Santoyo-Gutiérrez y Torres-Alvarado, 2010).

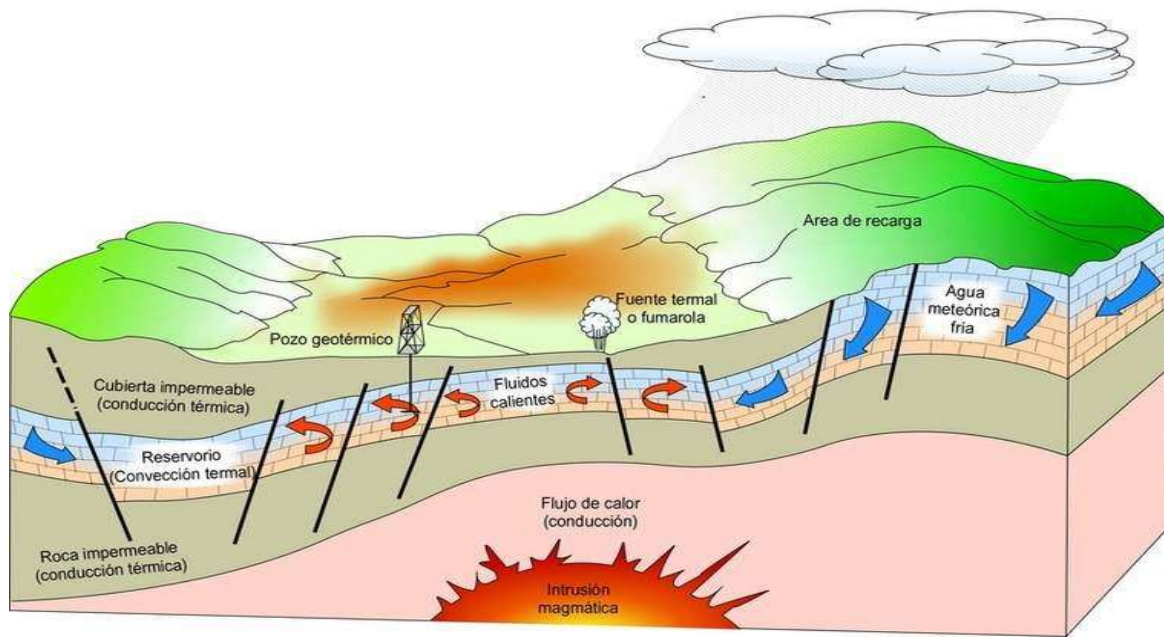


Fig. 7.- Modelo Esquemático de un Sistema Geotérmico Hidrotermal (Santiago-Gutiérrez y Santoyo-Alvarado, 2010).

Los sistemas geotérmicos convectivos hidrotermales que se encuentran en México son sistemas de salmuera súper caliente (con temperaturas de 200° C en adelante) como el de Cerro Prieto en Baja California y salmuera caliente (temperaturas de 100 a 200°C) como en Los Azufres, Michoacán y presentes en casi todos los países del mundo.

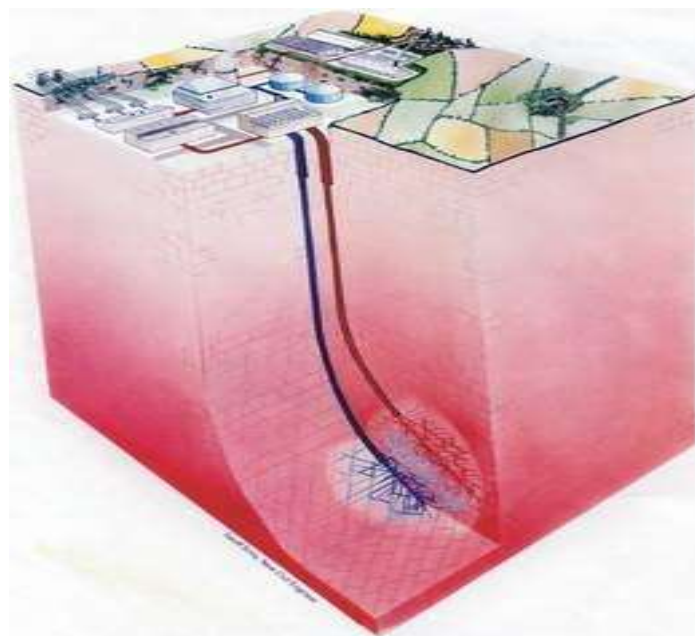


Fig. 8.- Modelo Esquemático de un Sistema Geotérmico Mejorado (Santiago-Gutiérrez y Santoyo-Alvarado, 2010).

Tabla 2.- Características básicas de los Sistemas Geotérmicos que actualmente se utilizan o se desarrollan para la generación de Energía Eléctrica alrededor del mundo (editado de Molina, 2002; Santiago-Gutiérrez y Santoyo-Alvarado, 2010; Pearson, 2010).

Sistemas geotérmicos para la producción de energía eléctrica		
Sistema	Características	Ejemplos
Convectivos Hidrotermales	Están constituidos por una fuente de calor, fluido (líquido y/o vapor) y roca, en donde se almacena el fluido geotérmico. El fluido que existe en los sistemas hidrotermales tiene su origen como agua meteórica (agua de lluvia, hielo o de nieve). Esta agua se infiltra lentamente en la corteza terrestre, a través de poros y fracturas, penetrando varios kilómetros de profundidad en donde es acumulada y calentada por la roca, interacción que puede alcanzar en ocasiones temperaturas de hasta 500 °C. Cuando las temperaturas son superiores a 200 °C, los yacimientos tienen correlación con sistemas volcánicos y la tectónica de placas, mientras que a temperaturas menores se relacionan generalmente con sistemas no-volcánicos, siendo estos últimos los más comunes.	Geysers en California Estados Unidos, Lardarello Italia. Los Humeros, Puebla, Los Azufres, Michoacán y Cerro Prieto, Baja California en México. Nueva Zelanda.
	La explotación de un SGM implica la creación artificial de un yacimiento fracturado mediante técnicas de	Proyectos en fase preliminar

Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM)	fracturamiento hidráulico y acompañado por la inyección de agua a temperatura ambiente a través de un pozo inyector perforado para estos fines. El agua se inyecta continuamente en un pozo, donde se calienta a medida que fluye a través de las rocas. El agua se lleva a continuación a la superficie a través de múltiples pozos para generar electricidad en plantas de energía mediante el calor extraído con circuitos de fluidos artificiales en las rocas madres de alta temperatura.	en Francia, Japón, Estados Unidos, Suiza, Inglaterra y principalmente Australia.
Sistemas Geopresurizados	El fluido en los sistemas geopresurizados, generalmente agua líquida, se encuentra sometido a presiones que pueden alcanzar hasta 100 MPa. Sin embargo, las temperaturas no suelen ser excesivamente altas (150 °C-250 °C). El agua suele coexistir con gases naturales (metano), lo que dificulta su explotación en la actualidad.	Texas y Louisiana, Estados Unidos
Conductivos sedimentarios	Estos sistemas pueden producir recursos de baja y mediana temperatura (20 a 150°C) debido a su flujo de calor y a la baja conductividad térmica de las rocas con gradientes geotérmicos superiores a los normales >30°C/km. Algunos intentos están siendo evaluados para desarrollar proyectos geotérmicos en cuencas sedimentarias con flujos de calor atractivos.	Dakota, Montana y Wyoming, Estados Unidos. Hungría y otras partes de Europa Central.
Radiogénicos	Sistemas asociados a intrusiones graníticas que con el calor generado por el decaimiento radioactivo de los isótopos de torio, potasio y uranio calientan el agua subterránea local. Este calentamiento incrementa los gradientes geotérmicos arriba del promedio global y provee un fluido factible de aprovecharse con la perforación de pozos profundos.	Este de los Estados Unidos, sin explotación comercial.
Marinos	Recursos geotérmicos de alta entalpía existentes en el fondo del mar y manifestados como descargas hidrotermales, chimeneas o fumarolas.	No existen actualmente.
Magmáticos	Estos sistemas se asocian a roca fundida (magma) atrapada en la corteza terrestre, debido a la existencia de aparatos volcánicos activos o en zonas donde la corteza está fracturada. El aspecto más importante de este tipo de recursos son las altas temperaturas disponibles, generalmente mayores a 800 °C.	Proyectos de desarrollo en Hawaii e Islandia.
Sistemas Supercríticos	Son sistemas muy profundos caracterizados por disponer fluidos geotérmicos en estado supercrítico y con temperaturas de hasta 600 °C. El fluido supercrítico puede proveer hasta 10 veces más energía que la de un fluido almacenado en un sistema geotérmico convencional	Nesjavellir, Islandia

La explotación del sistema geotérmico depende del tipo de yacimiento que lo conforme. De manera general, se instalan centrales de generación de energía que aprovechan el calor del subsuelo a gran escala. Su funcionamiento se basa en la extracción del agua caliente, que si tiene la temperatura suficiente, formará vapor de agua que es capaz de activar una turbina de energía cinética que se transforma en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica por medio de un generador.

Los elementos favorables para la existencia de zonas geotérmicas son: la persistente actividad volcánica a través del tiempo y las frecuentes erupciones de productos fuertemente diferenciados, los cuales requieren para su formación un largo periodo de estadía del magma en la cámara. La mayoría de los campos geotérmicos en América Latina están localizados en zonas del vulcanismo cuaternario constituidos por productos diferenciados (andesitas ácidas, riolitas o dacitas) relacionados con una intrusión ígnea bastante superficial que representa la cámara magmática de centros volcánicos recientes o activos (González y González-Ruiz, 2015).

El estudio de las manifestaciones superficiales debe considerar el marco hidrogeológico general; implica el conocimiento de la hidrología de la región y de las condiciones estructurales que controlan los sistemas hidrotermales. Las pruebas a largo plazo de los pozos de exploración sirven para definir la productividad esperada de pozos futuros, así como para generar información sobre la respuesta de la presión (y su descenso) del yacimiento con la producción de fluidos.

Se requieren de varias condiciones para poder establecer un campo geotérmico de alta entalpia; encontrarse en una zona activa de la corteza, una capa de rocas impermeables y un acuífero de alta permeabilidad con rocas fracturadas o granulares que permita una buena conducción de fluidos por convección y por tanto del calor desde su fuente hasta la superficie.

Su explotación sigue técnicas muy parecidas a las que se utilizan para la extracción de petróleo.

En años anteriores, cuando las temperaturas encontradas eran menores a 120 °C (campos geotérmicos de baja-mediana entalpía), resultaba conveniente darle usos distintos a la fuente de calor, ya sea para secado de frutas, en la agricultura, piscicultura, acuicultura y calefacción, actualmente por medio de nuevas tecnologías, se pueden utilizar para producir electricidad (Green Facts, 2013).

Actualmente hay 21 países en el mundo que usan vapor geotermal para generar electricidad. Estados Unidos (2228 MWe) y Filipinas (1909 MWe) tienen la mayor capacidad instalada (Hammons, 2004). México se encuentra en una etapa de desarrollo para ampliar la capacidad de producción en sus plantas geotermoeléctricas y en una etapa de análisis de la factibilidad de explotación del recurso geotérmico en otras zonas con potencial geotérmico.

4.1 Marco Hidrogeológico

Los acuíferos se alojan en formaciones geológicas subterráneas permeables, susceptibles de almacenar y transmitir los fluidos. Para establecer el comportamiento hidrogeológico de los acuíferos se requiere de diversos parámetros físicos (porosidad, permeabilidad, transmisividad, potencial hidráulico) y geológicos (caracterización de los sistemas de fallas en los que se alojan los acuíferos). De acuerdo a la textura, presión y litología, los acuíferos se clasifican de diferente forma. En lo que respecta a la clasificación por litología, los acuíferos se clasifican de acuerdo al tipo de roca que conforma cada formación geológica en detríticos, carbonatados, aluviales y volcánicos. Mientras que de acuerdo a su textura y porosidad la clasificación de los acuíferos es en kársticos y fisurados o porosos (Fig. 9). La

clasificación más frecuente para un acuífero es de acuerdo a la presión hidrostática bajo la que se encuentra sometido, en este sentido los acuíferos se clasifican según la estructura geológica de sus materiales y las condiciones hidráulicas del agua que contienen como libres, confinados o semiconfinados (Fig. 10).

- **Acuíferos libres:** son aquellos en los que el agua está en contacto directo con la atmósfera través de los poros y fisuras de la roca.
- **Acuíferos confinados:** acuífero aislado de la atmósfera por unidades geológicas impermeables, siempre se encuentra saturado de agua y en todos sus puntos se encuentra a una presión mayor que la atmosférica.
- **Acuífero semiconfinado:** es un acuífero que se localiza entre una capa de rocas permeables y una impermeable.

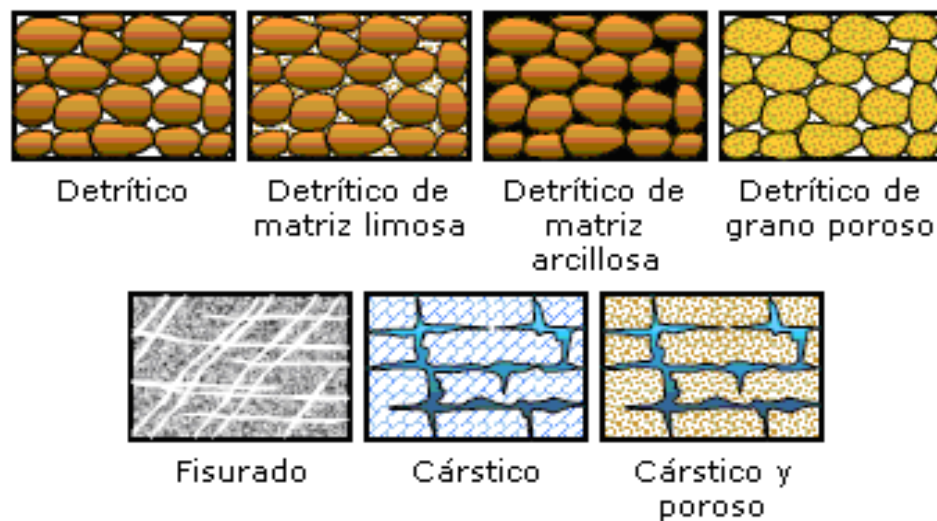


Fig. 9.- Tipos de acuíferos de acuerdo a la textura de las rocas (Artinaid, 2013).

El acuífero que se localiza en el Lago de Cuitzeo y sus alrededores ha sido estudiado desde diferentes perspectivas científicas (geológicas, geofísicas, geoquímicas). A grandes rasgos los acuíferos de la zona se han clasificado (Cedillo et al., 1981; Garduño-Monroy y Avila-Olivera, 2007) en 3 tipos: un acuífero superficial en medios granulares asociado a los manantiales que surgen entre las lavas del vulcanismo reciente y las secuencias lacustres (la Minzita, Manantiales, etc.). Este acuífero también se reporta en toda la planicie Tarímbaro-Álvaro Obregón-Queréndaro (CONAGUA, 2009). Un acuífero intermedio en las andesitas e ignimbritas fracturadas con recargas en la zona de Mil Cumbres y sierra de San Andrés (Los Azufres) con circulación de sur a norte entre los 1759 y 1600 msnm, y un acuífero regional profundo, alojado en las andesitas fracturadas y por debajo de los 1600 msnm. Así mismo, se señala (Garduño-Monroy y Avila-Olivera, 2007; Garduño-Monroy et al., 2014) la presencia de un acuífero asociado con el flujo geotérmico concentrado con las fallas normales EO y ENE-OSO de la región.

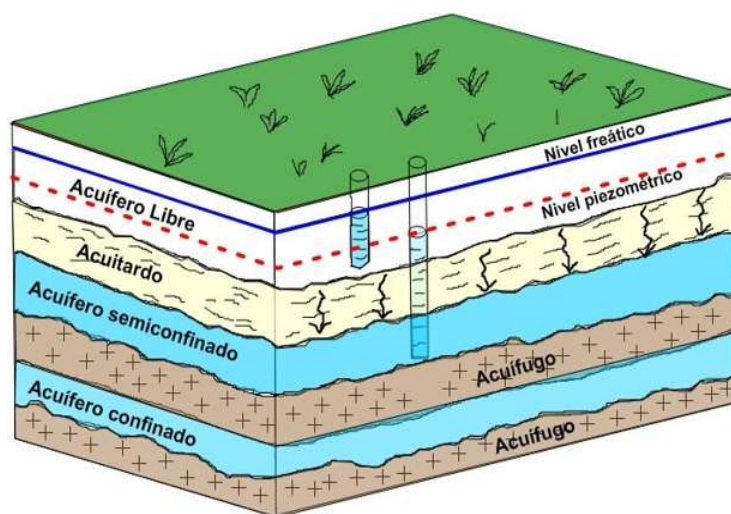


Fig. 10- Representación de los diferentes tipos de acuíferos de acuerdo a la estructura geológica de sus materiales y las condiciones hidráulicas del agua que contienen.

4.1.1 Porosidad y permeabilidad

La cantidad de agua subterránea almacenada en las formaciones geológicas y la facilidad con la cual puede extraerse dependen de la porosidad y permeabilidad de los materiales que conforman al acuífero. La porosidad ($\emptyset$) se define como la capacidad que posee un material para absorber³ fluidos (Ordoñez-Gálvez, 2011). Es una medida que señala la capacidad de almacenamiento de fluidos que poseen las rocas que conforman al acuífero y esta expresada como la fracción del volumen total de la muestra de roca que corresponde a espacios que pueden almacenar fluidos. Esta propiedad es expresada como un porcentaje.

$$\emptyset = \frac{\text{Volumen de espacios para almacenar fluidos}}{\text{Volumen total}} \quad (1)$$

Entre los factores que pueden afectar o modificar la porosidad de un acuífero encontramos los siguientes en las rocas sedimentarias:

Uniformidad del tamaño de los granos: está determinado por el arreglo de los granos durante la sedimentación. La variación en el tamaño de los granos no afecta la porosidad de la roca, siempre y cuando se mantenga el tipo de arreglo o empaque de los granos.

Forma de los granos: podemos tener granos redondeados y no redondeados. Se tiene mejor porosidad cuando los granos son redondeados. Los cambios en los granos se deben a procesos de compactación y diagénesis.

³ Absorber: Proceso físico o químico en que los átomos, moléculas o iones pasan de una primera fase a otra, incorporándose al volumen de la segunda fase.

Régimen de Depositación: esferas con diferentes empaques presentan diferente porosidad.

Compactación Mecánica: reducción del volumen total de los sedimentos como resultado de esfuerzos de compresión causados por sedimentos suprayacentes.

Compactación Química: incluye la reducción del volumen debido a reacciones durante la diagénesis.

Cementación: el tamaño, forma y continuidad de los canales también se afecta debido a la deposición de cuarzo, calcita y dolomita o combinaciones de éstas.

A partir de eso se definen diferentes tipos de porosidad:

- Porosidad eficaz: volumen de poros interconectados.
- Porosidad total: número total de huecos interconectados o no entre sí.
- Porosidad intergranular: tipo de porosidad típica de las rocas detríticas no consolidadas. En ellas los poros constituyen una intrincada red de canales de pequeño diámetro por el que circula el agua subterránea.
- Porosidad por fisuración: se presenta una red de fisuras de mayor o menor densidad como consecuencia de los procesos tectónicos de las rocas. Característico de rocas sedimentarias consolidadas, plutónicas y metamórficas.
- Porosidad por disolución: porosidad de los medios kársticos en los que a partir de pequeñas fisuras y planos de estratificación el agua va disolviendo la roca y en consecuencia se forman verdaderas redes de drenaje tridimensionales.

Cuando un material es poroso y sus poros tienen gran tamaño y se encuentran conectados permite transmitir fluidos. La permeabilidad se define como la capacidad de un material para transmitir fluidos.

No existen parámetros de porosidad de los materiales presentes en los acuíferos de Cuitzeo y Tarímbaro, para hacer aproximaciones a dichos datos se analizaron datos de tablas reportadas en la literatura (Tabla 3) y se usaron aproximaciones respecto a los materiales analizados en campo o en la literatura referente a los acuíferos de la zona de estudio (Tabla 4).

Tabla 3.- Porosidad en % para algunas rocas y material no consolidado (Kruseman y Ridder, 1994).

Roca	%	Material no consolidado	%
Arenisca	5-30	Grava	25-40
Cáliza	0-20	Arena	25-50
Cáliza carstica	5-50	Limo	35-50
Esquisto	0-10	Arcilla	40-70
Basalto	5-50		
fracturado	0-5		
Roca cristalina			
Roca cristalina fracturada	0-10		

Tabla 4.- Materiales y parámetros físicos empleados en la modelación.

Material	Porosidad
Lavas del V. Punhuato	0.1
Lavas del V. Quinceo y tetillas	0.2
Deposito Lacustre	0.1
Ignimbrita Chucándiro	0.1
Andesita	0.1
Ignimbrita Mil cumbres	0.1
Ignimbrita Cuitzeo	0.1
Andesita antigua	0.1
Capas rojas	0.1
Metasedimentarias	0.05
Granito	0.03

4.1.2 Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento S se define como el volumen de agua que proporciona una columna de acuífero de base unitaria y altura el espesor saturado del acuífero al descender en una unidad el potencial hidráulico. Es importante señalar que la presión es lo único que puede hacer que el nivel piezométrico se abata y podamos bajar unidades al potencial hidráulico. En este sentido se tiene entonces

$$S = \frac{V_w}{V_a} \quad (2)$$

dicho coeficiente es adimensional. V_w representa el volumen de agua y V_a el volumen de acuífero. En un acuífero libre el coeficiente de almacenamiento se corresponde con el agua almacenada en los poros interconectados del medio y que puede ser drenado por gravedad, es decir, es igual a su porosidad eficaz m_e . En un acuífero confinado, el coeficiente de almacenamiento equivale a la suma del volumen liberado como consecuencia de la compresibilidad del agua y la compresibilidad del acuífero, que en forma matemática quedan expresados en el primer y segundo sumando respectivamente, es decir

$$S = \gamma b m_e \beta + \gamma b \alpha \quad (3)$$

donde b es el espesor saturado del acuífero, β el módulo de compresibilidad del agua, m_e la porosidad eficaz, α el módulo de compresibilidad del acuífero y γ el peso específico del agua. Para el volumen de agua que puede extraerse por unidad de espesor saturado del acuífero, S^* se define como el coeficiente de almacenamiento específico que se utiliza para comparar acuíferos y clasificarlos en libres, confinados o semiconfinados.

$$S^* = \frac{S}{b} \quad (4)$$

4.1.3 Recarga

La recarga es la entrada de agua dentro de la zona saturada donde comienza a ser parte de las reservas subterráneas. La recarga puede darse por un movimiento descendente del agua debido a fuerzas de gravedad y luego por un movimiento horizontal del flujo debido a diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo.

La recarga se determina por métodos directos (mediante la construcción de lisímetros), balances hídricos (se determinan los flujos de entrada y salida de un sistema, la recarga al acuífero constituye el residuo de la ecuación de balance), trazadores (determinan fuentes de recarga y zonas de descarga y se utilizan para cuantificar la recarga a través de un balance de masa), métodos empíricos (desarrollo de ecuaciones empíricas que relacionan la recarga con alguna variable como la precipitación) y por medio de aproximaciones de Darcy (se encuentran valores de cargas hidráulicas a partir de ecuaciones de flujo y luego se determina la velocidad de filtración, si se asumen condiciones estables, la recarga se determina directamente de la ecuación de Darcy).

Además la recarga se clasifica de diferentes formas: 1) la recarga concentrada se define como el producto de cauces permanentes, estacionales y efímeros. 2) La recarga urbana es el producto de fugas de redes de abastecimiento y alcantarillado. 3) Recarga por excesos de riego o pérdidas en los canales de distribución de riego o por flujos laterales provenientes de otros acuíferos. 4) La recarga directa es la proveniente del agua de lluvia.

Elaborar un estudio para cuantificar cual es actualmente la recarga en la región de modelación consideraría aspectos técnicos y metodológicos particulares que requieren de un estudio hidrogeológico detallado, motivo por el cual se utilizaron datos de recarga directa reportados en 2008 por Medina Vega (Tabla 5, Fig. 11).

Tabla 5.- Datos de precipitación media anual en los municipios que comprenden la zona de modelación (Medina-Vega, 2008).

Municipio	Periodo	Precipitación media anual (mm)
A. Obregón	1965-1985	647.09
Tarímbaro	1986-2005	788.1
Copándaro	1969-2001	849.8
Cuitzeo	1923-2005	674.5
Morelia	1947-2005	789.3

Datos reportados por Medina-Vega (2008) indican que la principal aportación de la precipitación media anual se origina principalmente hacia el S-SE de la cuenca del Lago de Cuitzeo en base a un análisis de datos reportados por CONAGUA en 2005. En la zona de estudio la principal recarga directa se observa en los municipios de Copándaro, Morelia y Tarímbaro respectivamente.

En lo que respecta a los datos de evaporación media anual, estos varían de acuerdo a diversas condiciones climáticas, disponibilidad del agua y velocidad del viento. Para diferentes periodos de tiempo, los datos de evaporación promedio anual se observan en la tabla 6 concerniente a los municipios de Tarímbaro, Copándaro, Cuitzeo y Morelia.

Tabla 6.- Datos de evaporación promedio anual en los municipios que comprenden la zona de modelación (tomada de Medina-Vega, 2008).

Municipio	Periodo	Evaporación Promedio anual (mm)
Tarímbaro	1988-2005	128.23
Copándaro	1969-2001	157.9
Cuitzeo	1923-2005	151.5
Morelia	1952-2005	155.3

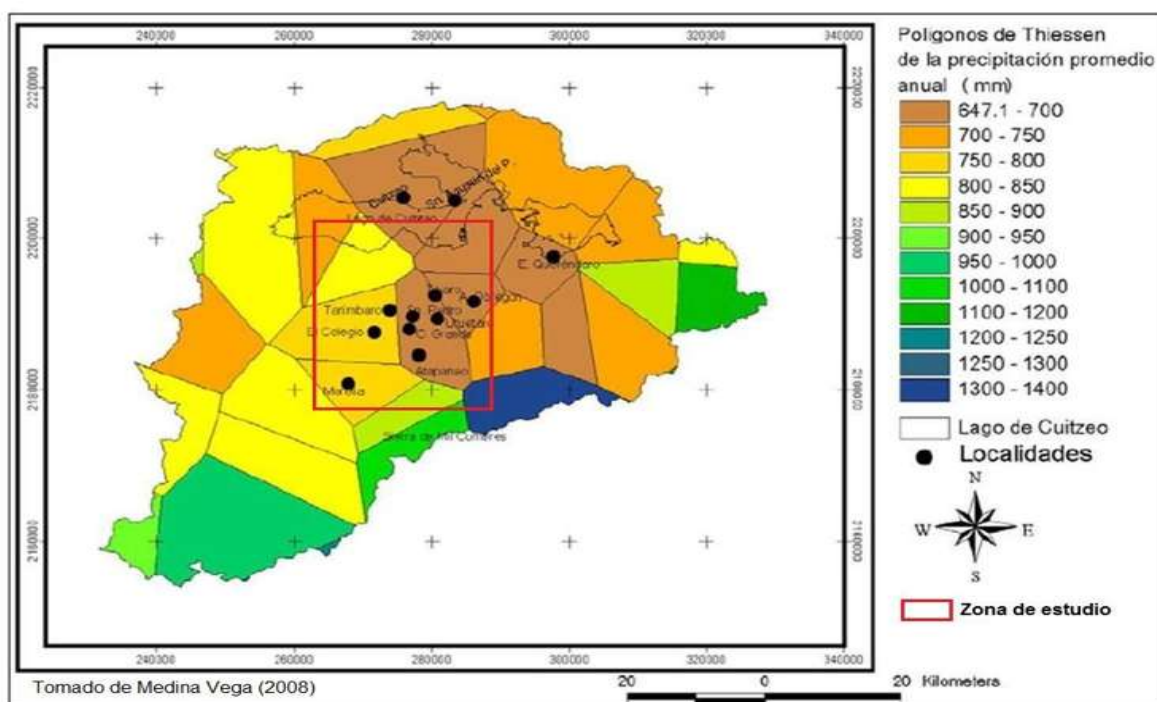


Fig. 11.- Polígonos de Thiessen de la precipitación promedio anual en mm en la cuenca del lago de Cuitzeo resaltando la malla del Modelo Morelia (editada de Medina-Vega, 2008).

4.1.4 Dirección de Flujo

El nivel piezométrico⁴ en un acuífero confinado (o semiconfinado) y el nivel freático⁵ en un acuífero libre son consecuencia directa de la energía que tiene el agua en ese punto. A esta energía se le conoce como potencial hidráulico (h).

El potencial hidráulico es suma de la energía potencial (consecuencia de la posición del punto en el espacio), la energía a consecuencia de la presión a la que se encuentra el agua en el punto considerado y una energía cinética como consecuencia de la velocidad del movimiento del agua (Vélez, 1999; Ordoñez-Gálvez, 2011; Sánchez, 2012). El movimiento del agua subterránea es tan lento que la carga por velocidad se considera despreciable y en consecuencia se elimina. El potencial hidráulico toma entonces la siguiente forma:

$$h = z + \frac{P}{\gamma} \quad (5)$$

donde z es la cota del punto del acuífero sobre un plano de referencia, P representa la presión a la que se encuentra sometida el agua o presión intersticial y γ el peso específico del agua. La carga hidráulica, como también se le llama al potencial hidráulico, es la responsable de establecer la dirección del flujo de agua en el acuífero.

Para el acuífero que se localiza en la zona de modelación, el basamento geohidrológico del acuífero, que en su mayoría es de tipo libre, está constituido por materiales aluviales a profundidad y partes de una secuencia ignimbrita superior del Oligoceno (CONAGUA, 2009;

⁴ Nivel piezométrico se puede definir como la cota que alcanzaría el agua en el interior de un sondeo ranurado en un punto del acuífero. Puesto que la presión del agua en todos los puntos de un acuífero confinado es mayor que la atmosférica, la superficie piezométrica estará siempre por encima del techo del acuífero y entonces es considerada como una superficie virtual.

⁵ Nivel Freático: es el nivel que alcanza el agua de manera natural.

Garduño-Monroy, 2014). Con base en estudios estatigráficos y geofísicos a profundidad, el nivel estático⁶ promedio en el lago de Cuitzeo está entre los 20-40 m con un abatimiento⁷ promedio anual de 1 m (Lesser y Asociados, 2000). Dicho nivel estático en las aguas subterráneas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, durante los meses anteriores a la temporada de lluvias se mantiene a menor profundidad en la rivera SO del Lago de Cuitzeo e incrementa el nivel freático del mismo, resaltando que el flujo del agua subterránea se concentra mayormente en esta misma zona del lago. En cambio para los meses posteriores a la temporada de lluvias la menor profundidad del nivel estático se mantiene en la zona NE de la Rivera del Lago de Cuitzeo, cambiando también la dirección del flujo subterráneo que se desplaza a la zona NE del lago (Garduño-Monroy et al., 2014).

Para la elaboración del modelo conceptual los datos de conductividad hidráulica y porosidad de los materiales (Tabla 4 y 7) se establecieron a partir de datos reportados en la bibliografía (Sanders, 1998), mientras que la anisotropía (horizontal 1.0 y vertical 3.0), conductividad hidráulica y almacenamiento específico se mantuvieron constantes debido a la falta del conocimiento exacto de dichos datos. Los datos estructurales de la región se obtuvieron a partir del mapa de las principales zonas de fallas en la zona aledaña al Lago de Cuitzeo (Pasquarè et al., 1991).

⁶ El nivel estático se define como la distancia del suelo al nivel del espejo de agua cuando la bomba de extracción de agua no está en funcionamiento.

⁷ El Cono de abatimiento es la superficie piezometría dinámica y el valor del nivel del agua en un punto de dicha superficie es el llamado nivel dinámico.

Tabla 7.- Materiales y datos de conductividad hidráulica empleados en la modelación del modelo Morelia.

Material	Horizontal K (m/s)
Lavas del Punhuato	1×10^{-7}
Lavas del V. Quinceo y tetillas	1×10^{-7}
Deposito Lacustre	1×10^{-5}
Ignimbrita Chucandiro	1×10^{-5}
Andesita	1×10^{-6}
Ignimbrita Mil cumbres	1×10^{-5}
Ignimbrita Cuitzeo	1×10^{-5}
Andesita antigua	1×10^{-6}
Capas rojas	1×10^{-7}
Metasedimentarias	1×10^{-8}
Granito	1×10^{-9}

4.2 Deducción de la Ecuación de Flujo

Por medio de la ecuación de continuidad y la Ley de Darcy se pueden describir los procesos de flujo subterráneo a partir de la ecuación diferencial conocida como la ecuación General de flujo subterráneo 3D. La ley de Darcy describe en función de experimentos de laboratorio las características del movimiento de un fluido a través de un medio poroso. La ley de Darcy dice que el caudal circulante por un tubo lleno de arena es directamente proporcional a la sección transversal al flujo y a la pérdida potencial de presión a lo largo del tubo:

$$Q = A \cdot K \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} . \quad (6)$$

La constante de proporcionalidad es la conductividad hidráulica (K). Q representa el caudal, A la sección del tubo normal al flujo subterráneo, Δh la pérdida de energía que experimenta el agua y Δl la distancia recorrida por el agua a través de la arena. $\Delta h / \Delta l$ también se conoce como gradiente hidráulico y representa la pérdida de energía por unidad de longitud de camino recorrido que experimenta el agua subterránea al circular a través de un medio poroso. Para un flujo en una sola dirección, por ejemplo al eje x , la ley de Darcy se reescribe en forma diferencial como:

$$v = \frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (7)$$

v es la velocidad del flujo subterráneo. El signo negativo indica que la presión declina en la dirección del flujo. Los acuíferos son siempre heterogéneos y anisótropos, sin embargo, a escala regional suelen asumirse homogéneos e isótropos para poder aplicar al acuífero la modelación matemática para su caracterización. Considerando un medio anisotrópico, se puede descomponer el vector velocidad de acuerdo a sus componentes cartesianas:

$$v_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad (8)$$

$$v_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad (9)$$

$$v_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (10)$$

Si consideramos un elemento en el acuífero de dimensiones dx, dy, dz orientando en el espacio según los ejes cartesianos x, y, z (Fig. 13) y aplicando el principio de conservación

de la masa que establece que si a las entradas de masa le restamos las de salida obtenemos la variación de masa en el almacenamiento del elemento, podemos establecer la ecuación general del flujo subterráneo:

$$m_w = V_w \cdot \rho \quad (11)$$

De la ecuación 7, $Q = A \cdot v \rightarrow \frac{V_w}{t} = A \cdot v$, debido a que el caudal se puede ver como el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo, de donde podemos establecer

$$V_w = A \cdot v \cdot t . \quad (12)$$

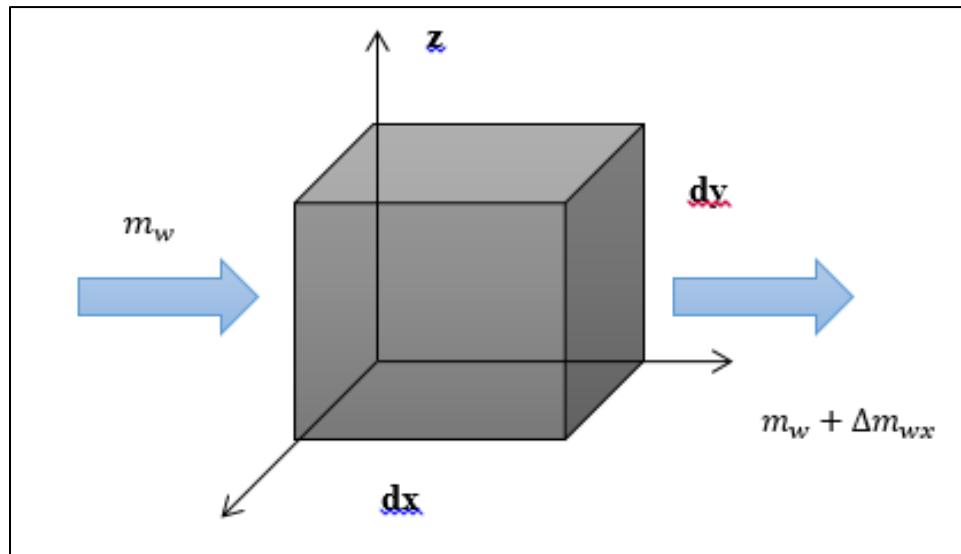


Fig. 12.- Flujo a través de un elemento de acuífero para el análisis de la conservación de la masa.

A partir de la ecuación 11 vemos que la masa de agua que está entrando es

$$m_{wx} = A \cdot v \cdot t \cdot \rho = dy \cdot dz \cdot v_x \cdot dt \cdot \rho \quad (13)$$

y la masa de agua de salida como

$$m_{wx} + \Delta m_{wx} = A \cdot v \cdot t \cdot \rho = dx \cdot dz \cdot v_{x+dx} \cdot dt \cdot \rho. \quad (14)$$

La diferencia entre la masa de entrada y la de salida se calcula aplicando la fórmula de Taylor, despreciando los términos superiores a la primera derivada llegamos a que

$$\Delta m_{wx} = \Delta V_x \cdot \rho = \frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot \rho \cdot dt. \quad (15)$$

Suponiendo un volumen $dx \cdot dy \cdot dz$ unitario y $dt = 1$, y eliminando la densidad de ambas partes de la igualdad tenemos que

$$\Delta V_x = \frac{\partial v_x}{\partial x}. \quad (16)$$

El desarrollo es análogo para y y z, de donde se tiene que

$$\Delta V_y = \frac{\partial v_y}{\partial y} \quad (17)$$

$$\Delta V_z = \frac{\partial v_z}{\partial z}. \quad (18)$$

Tomando en cuenta la ecuación 7 y sustituyéndola en la ecuación 16, se tiene que para el eje x

$$\Delta V_x = \frac{\partial \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right)}{\partial x} = K \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad (19)$$

El cálculo es análogo para los ejes y y z. de esa forma el balance de flujos de agua en la unidad de tiempo para un elemento unitario del acuífero queda expresado por la ecuación 20.

$$\Delta V = \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) \cdot K \quad (20)$$

La variación del volumen almacenado puede expresarse en función del coeficiente de almacenamiento específico por tratarse de un elemento de espesor unitario

$$\Delta V = S^* \frac{\partial h}{\partial t} \quad (21)$$

Así la ecuación general del flujo subterráneo en régimen transitorio para un medio homogéneo e isótropo queda expresado por

$$S^* \frac{\partial h}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) \cdot K. \quad (22)$$

Cuando el régimen es permanente o estacionario la carga hidráulica h es constante a lo largo del tiempo por lo que se anula la derivada respecto al tiempo

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (23)$$

mientras que para un medio heterogéneo y anisótropo la ecuación queda expresada por

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} K_x + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} K_y + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} K_z = 0 \quad (24)$$

4.2.1 Métodos numéricos para la resolver la Ecuación General de flujo subterráneo 3D

La resolución de la ecuación general de flujo subterráneo 3D se puede llevar a cabo mediante técnicas analíticas, graficas (mapas de isopiezas) o numéricas (tabla 8). La aplicación de los modelos numéricos permite la simulación de sistemas más complejos que los que se pueden resolver por medio de técnicas analíticas o gráficas, permitiendo la simulación de variaciones espacio-temporales. Actualmente existen varios métodos numéricos bien adaptados para la simulación numérica de diversos tipos de Ecuaciones Diferenciales Parciales (elíptica, parabólica o hiperbólica), que representen leyes de conservación para aproximaciones discretas a las derivadas de las funciones involucradas en la ecuación gobernante del sistema, que en nuestro caso particular, está representada por la ecuación general de flujo para agua subterránea. El método más utilizado y conocido en el

ámbito de Ciencias de la Tierra es el método de Diferencias Fintas (MDF). Otros métodos numéricos de gran utilidad son el método de Elementos Finitos (MEF) y Volúmenes Finitos (MVF) que se encuentran brevemente descritos en la Tabla 8.

Tabla 8.- Métodos numéricos en la resolución de la ecuación general de flujo subterráneo 3D
(editado de Armas-Vargas, 2010).

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
Volúmenes Finitos	La ecuación diferencial a resolver se integra sobre cada volumen de control, lo cual entrega como resultado una versión discretizada de dicha ecuación. Para realizar la integración se requiere espaciar perfiles de variación de la variable dependiente entre los puntos de la malla, a modo de poder evaluar las integrales resultantes.	Discretización en las ecuaciones de equilibrio local integradas	Para sistemas No Lineales el método puede presentar números de Courant ⁸ diferentes a 1 y presentar divergencia
Elementos Finitos	La idea básica de este método es el de dividir el dominio continuo en un numero finito de elementos y resolver sobre cada uno las ecuaciones del sistema para después, en su forma débil, ensamblar la solución total. Es necesaria la construcción de una malla consistente en una partición geométrica del dominio espacial donde se encuentran las	Discretización versátil en zonas de interés.	Conserva la masa Errores locales en los balances de agua

⁸ En matemáticas la condición Courant-Friedrichs-Lewy es una condición necesaria para la convergencia al solucionar Ecuaciones Diferenciales Parciales por el método de Diferencias Finitas. Se eleva cuando los esquemas explícitos que marchan contra el tiempo se usan para la solución numérica. Como consecuencia, el paso de tiempo debe ser menor que un cierto tiempo en muchas simulaciones explicitas del ordenador que marchan contra el tiempo, de lo contrario la simulación presentara resultados incorrectos.

	variables y la función incógnita está claramente definida. Pese a que se puede aplicar a dominios de geometrías muy complejas, su codificación es difícil.	Se adapta bien a la geología complicada	Complejidad de implementación computacional
Diferencias Finitas	En general para problemas de hidrogeología se utiliza la técnica denominada Diferencias Finitas (DF), es el método numérico más antiguo para resolver EDP, en la cual éstas se aproximan por medio del desarrollo en serie de Taylor para un instante de tiempo y se repite el procedimiento para sucesivos intervalos de tiempo. Debido a que las soluciones numéricas que presenta Modflow descansan en esta técnica, se abordará con mayor profundidad en el siguiente apartado.	Intuitivo y comprobado Conserva la masa Es el método más utilizado y conocido en la comunidad científica	Poca generalidad en el método estándar No es un método conservativo

Por su sencillez conceptual y facilidad de términos matemáticos para su aplicación, el Método de Diferencias Finitas (MDF) constituye un mecanismo idóneo para la resolución de problemas de hidrogeología. Al igual que los métodos de Volúmenes Finitos y Elementos Finitos, el MDF obtiene una solución aproximada de las ecuaciones diferenciales definidas en una región de trabajo en donde se deben establecer condiciones de frontera e iniciales para la solución de problemas concretos. Para la aplicación de dicha técnica se siguen una serie de pasos:

- i) *Discretización del dominio* consiste en transformar el dominio continuo en una malla de nodos, eligiendo el número de nodos en el dominio de la ecuación sobre los cuales se calculará la aproximación a la solución real de la ecuación. Al conjunto de nodos se le denomina malla y dependiendo de la calidad de la misma, así como del volumen que cubra cada celda, se obtendrán mejores aproximaciones. La fabricación de la malla depende en gran medida de las características del medio. En esta investigación de las características de los materiales involucrados en el acuífero.
- ii) *Discretización de las ecuaciones* por medio de la sustitución de las derivadas que aparecen en la ecuación por diferencias discretas evaluadas en los nodos de la malla. Esto produce un conjunto de ecuaciones algebraicas en las que las variables serán los valores de los nodos de la función sobre los nodos que a su vez representan la aproximación buscada.
- iii) *Solución del sistema de ecuaciones algebraicas* por medio de la solución numérica correspondiente.

La técnica de Diferencias finitas ha sido utilizada durante mucho tiempo; Newton, Leibnitz, Laplace y Euler la utilizaron en sus cálculos. El desarrollo de la técnica está justificada en el teorema de Taylor (sección 4.2.1) que permite aproximar una función derivable en el entorno reducido alrededor de un punto mediante un polinomio cuyos coeficientes den las derivadas de la función en ese punto.

4.2.2 Teorema de Taylor

Si n es un número entero y estrictamente mayor a cero y la función f es n veces derivable en el intervalo cerrado⁹ $[a, x]$ y $n + 1$ veces derivable en un intervalo abierto (a, x) ¹⁰ entonces se cumple que

$$f(x_i + \Delta x) = f(x_i) + \Delta x f'(x_i) + \frac{\Delta x^2}{2!} f''(x_i) + \frac{\Delta x^3}{3!} f'''(x_i) + \dots + \frac{\Delta x^n}{n!} f^n(x_i) \quad (25)$$

$$f(x_i - \Delta x) = f(x_i) - \Delta x f'(x_i) + \frac{\Delta x^2}{2!} f''(x_i) - \frac{\Delta x^3}{3!} f'''(x_i) + \dots - \frac{\Delta x^n}{n!} f^n(x_i) . \quad (26)$$

La denominada diferencia hacia adelante se forma reordenando la ecuación 25 para la primera derivada, de la cual se obtiene

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i + \Delta x) - f(x_i)}{\Delta x} + E \quad (27)$$

con E como el error local de truncamiento. Análogamente podemos obtener la diferencia hacia atrás reordenando para la primera derivada la ecuación (26)

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i) - f(x_i - \Delta x)}{\Delta x} + E . \quad (28)$$

Si restamos las ecuaciones (25) y (26) podemos obtener la diferencia central:

⁹ Un intervalo cerrado contiene sus extremos y todos los números comprendidos entre ellos.

¹⁰ Un intervalo abierto no toma en cuenta los límites inferior y superior.

$$f(x_i + \Delta x) - f(x_i - \Delta x) = +2\Delta x f'(x_i) + 2\frac{\Delta x^3}{3!} f'''(x_i) + \dots$$

$$\rightarrow f'(x_i) = \frac{f(x_i + \Delta x) - f(x_i - \Delta x)}{2\Delta x} + E \quad (29)$$

E error de truncamiento. Sumando las ecuaciones (25) y (26) y reordenando los términos podemos obtener una aproximación central para la segunda derivada

$$f(x_i + \Delta x) + f(x_i - \Delta x) = 2 f(x_i) + \frac{2 \Delta x^2}{2!} f''(x_i) + E$$

$$\rightarrow f''(x_i) = \frac{f(x_i + \Delta x) + f(x_i - \Delta x) - 2 f(x_i)}{\Delta x^2} + E \quad (30)$$

En base a las ecuaciones 27-30 se lleva a cabo la discretización de las ecuaciones diferenciales parciales y se entregan los resultados numéricos correspondientes. La veracidad de los resultados que presenta el software depende en gran medida de la malla que se utiliza.

4.3 Programas de Modelación Numérica

Un modelo es una representación simplificada de la realidad, la reproducción simulada o hipótesis del comportamiento de un sistema. Como reporta Tinoco (2005), existen diferentes tipos de modelación para los sistemas hidrogeológicos como lo son los modelos físicos (reproducción a escala de un fenómeno natural), modelos de transporte de masa (permiten calcular la concentración y establecer la evolución de una determinada especie química en el espacio y tiempo) y los que tienen especial interés en este trabajo de investigación:

- Modelos de flujo: modelos que informan acerca de la distribución del potencial hidráulico en el espacio y el tiempo para cada celda definida en el modelo. La dinámica de los sistemas jerárquicos del flujo del agua subterránea a través de las unidades hidrogeológicas.
- Modelos de transporte de calor: a partir de un modelo de flujo establecido permite obtener el intercambio de calor de cada unidad discretizada en el espacio y tiempo. Se aplica en yacimientos profundos de la geotermia para el aprovechamiento energético.
- Modelos conceptuales: se trata de la descripción de cómo se relacionan los conceptos en un problema. Sirven para representar un sistema de manera gráfica. La simulación de los modelos conceptuales imitan el comportamiento del sistema en un ordenador para observar cómo funcionan los parámetros de insumo y con ello analizar qué solución nos permite enfrentar de mejor manera la problemática planteada.
- Modelos numéricos: Resuelven la ecuación diferencial que representa el sistema físico de interés mediante matrices en cada celda en la que ha sido discretizado el sistema. Requieren de una discretización espacio-temporal y logran soportar heterogeneidades del medio.

El modelo conceptual sirvió como base para la construcción de la malla, ya que nos permitió establecer la geometría y características de la misma. Con base en los resultados numéricos de la modelación en Modflow se extrajeron los datos de potencial hidráulico en cada punto de la malla y las condiciones iniciales y de frontera que se utilizarían posteriormente como insumo para la modelación en Tough2. A partir de los archivos que

genera Modflow al resolver de manera exitosa la Ec. General de Flujo subterráneo en GMS se extraen una serie de archivos a una subrutina computacional en lenguaje Fortran 90 conocida como TMT2¹¹ (Traslating Modflow to Tough2). Esta subrutina extrae las condiciones de la malla de GMS y genera un archivo con los parámetros físicos e hidrogeológicos de cada celda (MESH) así como las condiciones iniciales utilizadas (INCON), los cuales sirven como insumos para Tough2.

Tough2 utiliza los archivos INCON y MESH, además de un archivo adicional con los parámetros físicos de cada material utilizado (densidad, permeabilidad, conductividad hidráulica, porosidad y pasos de tiempo). Para la correcta simulación del comportamiento del flujo de calor en un sistema geotérmico se requieren condiciones iniciales especiales de Presión y Temperatura para generar condiciones de un gradiente geotérmico, se trata de una especie de calibración para el sistema. Esto se logra realizando varias corridas en el que las condiciones termodinámicas obtenidas en una simulación y escritas en un archivo provisional de salida (SAVE) se utilizan como condiciones iniciales en compilaciones posteriores. En el caso presentado, una primera simulación fue realizada para obtener las condiciones de la presión hidrostática. Posteriormente este resultado se utilizó como condición inicial para simular las condiciones naturales no perturbadas del flujo de masa y calor. Finalmente una tercera compilación simuló la inyección y producción de fluidos. El resultado obtenido sirvió para representar las condiciones Iniciales generales del sistema y comenzar la modelación transiente en donde Tough2 resuelve la Ec. General transiente de Flujo de calor 3D.

Adicionalmente, se requirió un postprocesamiento de la solución de Tough2 para hacer compatible la solución encontrada con un software que permitiera su visualización espacial.

¹¹ Se tiene que hacer uso de TMT2 debido a la complejidad de elaborar una malla con las condiciones de flujo para más de veinte mil elementos en forma manual.

Se utilizó la subrutina T2TM (Traslating Tough2 to Modflow) para conseguir este proceso y lograr visualizar el resultado encontrado por Tough2 en GMS.

4.3.1 GMS

GMS (Sistemas de Modelación de Agua Subterránea) es un programa desarrollado por un grupo de ingenieros (Aquaveo) con amplia experiencia en el desarrollo de solucionadores para la Ecuación General de Flujo de Agua Subterránea. Se trata de un programa que nos permite construir y hacer simulaciones sobre modelos de agua subterránea con una interface gráfica amigable con el usuario y herramientas avanzadas que permiten visualizar procesos complejos en dos y tres dimensiones. GMS es compatible con archivos tipo Raster, Shape, mapas topográficos y datos de elevación, así como datos estratigráficos, archivos CAD y datos geofísicos. Los paquetes de estratigrafía y geoestadística incluidos en el software, así como la posibilidad de importar y manipular modelos elaborados en Sistemas de Información Geográfica, facilitan el manejo de los modelos conceptuales que una vez desarrollados permiten agregar características de simulación por medio de Modflow y Modpath, paquetes incluidos en GMS y necesarios para la modelación y caracterización de acuíferos (Borgia, 2011).

Las mallas que se crean en GMS no son irregulares, sin embargo, se pueden rotar, acomodar, ajustar o refinar en zonas de interés y mantener un mallado burdo en otras zonas para agilizar los sistemas de memoria y cómputo, lo cual representa una ventaja importante respecto a otros software comerciales.

4.3.1.1 Modflow

La solución analítica de la ecuación de flujo subterráneo 3D (Ec. 22), salvo casos muy simples, se encuentra únicamente por medio de la aplicación de técnicas numéricas. Modflow es un programa multicapa en donde los módulos se agrupan en paquetes y cada paquete trata características específicas del sistema hidrogeológico a ser simulado. Se trata de un modelador de flujo que por medio de la técnica matemática de diferencias finitas resuelve mediante diferentes iteraciones, la ecuación general de flujo de agua subterránea 3D, sustituyendo el sistema continuo por un conjunto finito y discreto de puntos en el espacio y tiempo. El proceso lleva a un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales. La solución del sistema de ecuaciones simultáneas que se resuelve en cada paso de tiempo podría obtenerse mediante métodos algebraicos, sin embargo, cuando el número de ecuaciones es grande resulta más conveniente usar métodos iterativos.

Un método iterativo comienza con una solución inicial de prueba. Se inicia entonces un procedimiento de cálculo que usa la solución de prueba para obtener una solución provisional que satisface el sistema de ecuaciones en diferencias finitas de forma más aproximada. La solución provisional se usa entonces como una solución de prueba y se repite el proceso hasta que las soluciones de prueba y las provisionales son casi iguales, es decir, la diferencia entre el valor del potencial de prueba y el provisional es menor que un valor arbitrario previamente establecido, denominado criterio de cierre o criterio de error para cada nodo.

Las ecuaciones del modelo están basadas en la hipótesis de que todas las propiedades hidráulicas son uniformes a lo largo de cada celda. La convergencia del modelo se consigue cuando se logra ajustar el balance de flujo, para establecer las entradas y salidas de agua. Las

entradas son zonas de recarga debidas principalmente a las precipitaciones. Como salidas del sistema se consideran los manantiales, pozos de extracción y lagos. La solución del sistema de ecuaciones correspondiente, da como resultado el valor del potencial hidráulico en los puntos específicos en los instantes de tiempo elegidos. Estos valores constituyen una aproximación a la distribución continua de valores en el tiempo que daría una solución analítica de la ecuación diferencial.

El software denominado Modflow fue originalmente concebido solamente como un modelo de flujo de agua subterránea y los autores vieron la solución de ecuaciones relacionadas adicionales como algo que se hace en programas separados como Tough2 por mencionar un ejemplo (ver antecedentes). Las limitaciones que presenta Modflow tanto en su versión libre como en su versión comercial radican en que los componentes físicos del sistema, como densidad, viscosidad y temperatura son constantes a lo largo de todo el proceso de modelación.

4.3.2 Tough2

Tough2 es un simulador numérico para flujos no isotérmicos de fluidos multifásicos en 1, 2 o 3D. Los códigos que se insertan en Tough2 son multidimensionales para simulaciones de transporte de agua, vapor, gas no condensable y calor en medios porosos y fracturados. Tough2 fue desarrollado en el laboratorio nacional de Berkeley “Lawrence” a inicio de los años ochenta de forma inicial para la ingeniería de reservorios geotérmicos, pero ahora ampliamente empleado para el tratamiento de desperdicios nucleares, corrección de problemas ambientales, producción de energía geotérmica y procesos mecánicos en medios permeables (Pruess et al., 2012).

Tough2 se puede correr en cualquier estación de trabajo, requiere una aritmética de 64 bit y sus comandos se compilan en lenguaje Fortran 77 o 90. La memoria que requiere el programa para funcionar depende del tamaño de la malla y se estima por medio de la siguiente relación:

$$M = 0.08 * (NEL + 2NCON) * (NEQ)^2. \quad (31)$$

Donde NEL representa el número de elementos de la malla, NCON el número de conexiones y NEQ el número de ecuaciones de masa y balance por bloque de la malla, M la memoria Ram en Kilobytes.

Tough2 resuelve ecuaciones de balance de masa y energía que describe el flujo de calor y fluidos en sistemas multifásicos. La advección de fluidos se describe por medio de una extensión multifase de la ley de Darcy. En adición existe un transporte de masas (difusividad) en todas las fases. El flujo de calor que simula Tough2 ocurre por conducción o convección. Cuando es por convección se incluyen efectos sensibles como de calor latente. La descripción de condiciones termodinámicas se basa en la asunción del equilibrio local de todas las fases. Los parámetros de los fluidos y formaciones pueden ser arbitrariamente funciones no lineales de variables termodinámicas primarias.

Para simulaciones numéricas el espacio continuo y las variables de tiempo deben discretizarse. En todos los códigos de Tough2 la discretización del espacio se hace directamente a partir de las ecuaciones básicas de conservación en forma integral sin convertirlas en ecuaciones diferenciales parciales. Este método de diferencias finitas integrales evita cualquier referencia a un sistema de coordenadas global y ofrece la ventaja

de ser aplicable a discretizaciones regulares o irregulares hasta en 3D. Para sistemas de bloques de mallas regulares asociados a sistemas globales de coordenadas, el método de diferencias finitas integrales es completamente equivalente al método convencional de diferencias finitas. En Tough2 la discretización del tiempo se realiza con un método implícito de 1er orden de diferencias finitas hacia atrás.

La discretización del espacio resulta en un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales fuertemente acopladas, con todas las variables termodinámicas primarias tiempo-dependientes de cada celda en la malla como las incógnitas. Estas ecuaciones son arrojadas en forma residual y resueltas en forma simultánea usando iteraciones Newton-Raphson. Los pasos de tiempo pueden ser ajustados de manera automática durante una simulación de acuerdo a la tasa de convergencia para el proceso de iteración. Un ajuste automático del paso de tiempo es esencial para una solución eficiente de problemas de flujo multifase. Las ecuaciones que gobiernan el fluido multifase y el flujo de calor tienen la misma forma, independientemente de la naturaleza y número de fases de fluidos y componentes presentes. En base a esto Tough2 tiene un diseño de arquitectura modular en el que el módulo de flujo principal y de transporte puede interactuar con diferentes módulos de propiedades de fluido.

La solución de un problema de flujo esencialmente consiste en un conjunto completo de variables termodinámicas como función del tiempo. Los datos necesarios para caracterizar un sistema de flujo incluyen parámetros hidrogeológicos y relaciones constitutivas del medio permeable (permeabilidad absoluta y relativa, porosidad, presión capilar, densidad, potencial hidráulico), propiedades termofísicas de los fluidos, condiciones iniciales y de frontera, pozos y fuentes. Además se requiere especificar la geometría y los parámetros de paso de

tiempo. Los datos se dan a Tough2 en formato ASCII con hasta 80 caracteres por archivo (Tabla 9). Todas las unidades se dan en el Sistema Internacional de unidades.

Los sistemas de flujo se inicializan asignando un conjunto de variables termodinámicas primarias para todos los bloques de la malla en los cuales el dominio de flujo es discretizado, a todos los bloques de la malla se le asignan condiciones termodinámicas default. Pero si se requieren condiciones termodinámicas específicas de acuerdo al medio, éstas se establecen en las condiciones iniciales.

Tabla 9.- Descripción general de los parámetros del archivo de entrada para Tough2.

Parámetro de entrada	Descripción
TITLE	Establece el título de la simulación numérica.
MESHM	Lee los parámetros de la malla.
ROCKS	Propiedades de los materiales.
MULTI	Opcional. Especifica el número de componentes del fluido y el balance de ecuaciones por malla de cada bloque.
SELEC	Se utiliza para ciertos módulos de ecuaciones de estado para sustituir datos de propiedades termofísicas.
START	Opcional. Una serie de datos para una inicialización del programa más flexible.
PARAM	Parámetros computacionales, espacios de tiempo y de convergencia, opciones de programa.
DIFFU	Difusividad de los componentes de masa.
FOFT	Opcional. Especifica los bloques de las mallas para los datos de series de tiempo que son deseados.
GOFT	Opcional. Especifica pozos y fuentes para los datos de series de tiempo deseados.
RPCAP	Opcional. Parámetros para funciones de permeabilidad relativa y presión capilar.
TIMES	Opcional. Especificación de tiempos para generar las opciones de impresión.
ELEME	Lista de los bloques de la malla. Volumen de los elementos.
CONNE	Lista de conexiones de flujo entre los bloques de la malla.

GENER	Opcional. Lista de masa o calor de fuentes y sumideros.
INDOM	Opcional. Lista de condiciones iniciales para especificar dominios del reservorio.
INCON	Es opcional. Contiene la lista de las condiciones iniciales para bloques específicos de la malla.
NOVER	Es opcional. Elimina las opciones de salida de los números de versión y fechas de las unidades de programa ejecutados en Tough2.
ENDCY	Indica el cierre del archivo de Tough2 y el inicio de la simulación numérica.
ENDIFI	Alternativa para ENDCY para el cierre del programa. Causa que la simulación del flujo sea saltada; muy útil si solo se desea la generación de la malla.

La inicialización de los arreglos para la geometría y condiciones iniciales siempre se pone en el archivo de malla MESH e INCON respectivamente. Las propiedades termofísicas de las mezclas de fluidos necesarios para ensamblar las ecuaciones que gobiernan el balance de masa y energía son provistos por paquetes de Ecuaciones de estado denominados EOS (un ejemplo es EOS 3, véase Tabla 10). Una expresión de la forma

$$f(p, v, T) = 0 \quad (32)$$

se denomina ecuación de estado. Dichas ecuaciones no proporcionan información respecto a la energía interna, entalpía, etc., de una sustancia en un estado termodinámico dado, pero aportan información sobre el comportamiento de Presión (Pa), volumen específico (m^3/kg) y temperatura de una sustancia ($^{\circ}\text{C}$).

Existe una extensa cantidad de ecuaciones de estado: Van der Waals, Redlich-Kwong, Berthelot, Dieterici, etc., pero lo que debe tenerse en cuenta al escoger un paquete de

ecuaciones de estado es que debe ser capaz de predecir el comportamiento $p-v-T$ y sus derivados para la correcta predicción de otras propiedades termodinámicas.

Las condiciones de fase de fluidos se reconocen de los valores numéricos de las variables primarias. Además proveen valores para todos los parámetros termofísicos secundarios como funciones de las variables termodinámicas primarias. Los módulos de ecuaciones de estado cumplen con tres funciones adicionales:

- Las condiciones de fase pertinentes para un conjunto de variables primarias están identificadas para todos los volúmenes de los elementos.
- La aparición o desaparición de las fases es reconocida a medida que las variables primarias cambian durante el proceso de iteración Newton-Raphson.
- Las variables primarias se intercambian y reinician propiamente en respuesta a un cambio de fase.

Tabla 10.- Descripción del paquete de ecuaciones de estado EOS3.

EOS 3 (Agua-Aire)	
Componentes	#1: Agua #2: Aire
Elección de parámetros	(2, 3, 2, 6) agua y aire no isotermales (2, 2, 2, 6) agua y aire isotermales. La difusión molecular puede establecerse si el último número es 8.
Variables primarias	Condiciones de una fase: (P, X, T) ... Presión, fracción de aire de masa y temperatura. Condiciones de dos fases: (P _g , S _g , T) ... Presión del gas, saturación del gas y temperatura.

Solo los parámetros secundarios son utilizados en las ecuaciones de flujo. La referencia de presión es por convención siempre la variable primaria y es utilizada directamente en las ecuaciones de flujo. Solo se puede cargar un paquete de EOS para cada simulación.

Adicionalmente ECO2N es un módulo de propiedades de fluidos para simulaciones de Tough2 diseñado para casos donde hay adquisición geológica de CO₂ en acuíferos salinos. Incluye una amplia descripción de las propiedades termodinámicas y termofísicas de mezclas de agua-sal-CO₂ que reproducen las propiedades de los fluidos a través de experimentos para la temperatura, presión, salinidad en condiciones de interés, temperaturas mayores a 10°C y hasta 350°C. Así como presiones menores de los 600 Bar. Adicionalmente los fluidos pueden modelarse de forma isotérmica o no isotérmica.

ECO2N Puede modelar una sola fase acuosa con o sin CO₂ disuelto y sal, una sola fase rica en CO₂ que tal vez contenga el dióxido tanto en forma líquida como en forma gaseosa y quizás incluya agua disuelta o condiciones bifásicas que consisten de una fase acuosa y una fase rica en CO₂ ya sea en forma líquida o gaseosa. La modelación numérica del flujo de salmuera y CO₂ requiere del acoplamiento del comportamiento de la fase de agua, sal, CO₂ mezclados con técnicas de simulaciones de flujos multifásicos.

Las condiciones de frontera pueden ser de dos tipos: Dirichlet donde las condiciones termodinámicas como Presión y Temperatura se establecen sobre la frontera o tipo Neumann donde los flujos de masa y calor se establecen cruzando las superficies de la frontera.

Tough2 resuelve ecuaciones de balance de masa y energía que describe el flujo de calor y fluidos en sistemas multifásicos. El software incluye muchos módulos de propiedades de flujo y ofrece procesos mejorados de modelación, efectos de precipitación, disolución y difusión multifase. Entre las utilidades del programa se encuentran la modificación de los

archivos de la malla y la fácil extracción de archivos gráficos como datos de salida. El trabajo computacional en una simulación de Tough2 incluye la evaluación de las propiedades termofísicas para todos los bloques de la malla, el vector de residuos y la matriz Jacobiana, así como la solución del sistema de ecuaciones lineales para cada iteración Newton Raphson.

Como lo menciona Borgia et al. (2011) los códigos de Tough2 resultan sencillos para los expertos en este programa pero complejos para los hidrogeólogos que no se encuentran familiarizados con él. Pese a que la interfaz del software es muy intuitiva para aquellos en proceso de aprendizaje y resulte sencillo resolver problemas simples de transporte en medios porosos, resulta de gran complejidad el uso de Tough2 en sistemas geológicos complejos.

4.3.2.1 TMT2

Para trasladar los resultados de la malla de Modflow a Tough2 se utilizó el código TMT2. Esta subrutina lee la información de la malla en Modflow y calcula las coordenadas de los nodos de las celdas activas, además computa conexiones para celdas adyacentes, interfaces para áreas de superficie, distancias entre puntos nodales y la interface y el ángulo entre las líneas conectando los dos puntos nodales y el vector aceleración de la gravedad. El tensor de conductividad hidráulica de Modflow K_i se pasa al tensor intrínseco de permeabilidad usado en Tough2 por medio de la relación

$$K_i = \rho_0 g \frac{k_i}{\mu_0} \quad (33)$$

donde ρ_0 y μ_0 son la densidad del fluido y la viscosidad del agua pura respectivamente y g la aceleración de la gravedad. En Tough2 la densidad del fluido actual ρ es calculada asumiendo

un fluido de volumen constante y considerando el fluido como una mezcla de agua pura r_w y de salmuera r_b , por medio de

$$\frac{1}{P} = \left(1 - \frac{X_b}{\rho_w}\right) + \frac{1}{\rho_b} \quad (34)$$

donde X_b es la fracción de masa de salmuera en la mezcla del fluido. La porosidad no necesitó ser trasladada. Otras variables termofísicas como la densidad de granos en la roca, conductividad térmica y calor específico, necesarias para Tough2 se añaden en archivos de entrada.

TMT2 genera los archivos con las condiciones iniciales y parámetros de la malla, estos archivos se utilizan como insumos para Tough2 junto con una plantilla de inicio que es elaborada por el usuario donde se estipulan todos los parámetros de compilación.

4.4 Calor y Temperatura

Calor puede definirse como la interacción energética entre un sistema y sus alrededores, a través de las porciones de los límites del sistema donde no hay transferencia de masa como consecuencia de la diferencia de Temperatura (es una magnitud referida al calor medible) entre el sistema y sus alrededores. Se transfiere de mayor a menor temperatura como lo indica la ley cero de la termodinámica.

Los mecanismos por los que se propaga el calor en cualquier medio son: conducción (propagación de calor entre dos cuerpos a diferente temperatura por agitación térmica de sus partículas sin haber un desplazamiento de las mismas), convección (transmisión del calor por movimiento real de las moléculas de una sustancia por diferencia de densidades) y radiación

(transmisión del calor entre dos cuerpos de temperatura distinta sin que entre ellos exista contacto ni conexión, se trata de la transferencia de calor por medio de ondas electromagnéticas que se desplazan por el vacío del sistema, un ejemplo de este tipo de transferencia de energía es el calor que se obtiene a partir de la radiación solar).

Cuando un fluido entra en contacto con un objeto cuya temperatura es mayor que la de su ambiente y su temperatura aumenta, se dice que ha sufrido una transferencia de energía conocida como convección. Un ejemplo de este tipo de transferencia energética está representado por el aumento de temperatura de los fluidos geotérmicos al entrar en contacto con las rocas de las formaciones geotérmicas en profundidad, dichos fluidos transportan esta energía hasta la superficie y se manifiestan en forma de fenómenos hidrotermales.

En los procesos convectivos, el calor específico (c) y la Capacidad calorífica (C), son aspectos que deben ser señalados. La capacidad calorífica se define como la cantidad de calor que debe suministrarse a toda la masa de una sustancia para elevar su Temperatura en una unidad. Se trata de una propiedad extensiva, representativa de cada cuerpo o sistema. Matemáticamente, la capacidad calorífica queda definida de la siguiente forma:

$$C = \lim_{\Delta T \rightarrow \infty} \frac{Q}{\Delta T} \quad (35)$$

donde Q representa el calor absorbido por el sistema y ΔT el incremento de temperatura en el sistema. El calor específico se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad. Al ser una propiedad intensiva su valor es representativo de cada materia. En

base a ello, la capacidad calorífica puede definirse a partir del calor específico de cada sustancia:

$$C = \lim_{\Delta T \rightarrow \infty} \frac{Q}{\Delta T} = c \cdot m \quad (36)$$

m representa la masa del sistema. La cantidad de calor asociada con un cambio de T del sistema desde una temperatura inicial T_i hasta una final T_f se calcula mediante la integral

$$Q = m \int_{T_i}^{T_f} c \, dT \quad (37)$$

pero cuando la capacidad calorífica C es aproximadamente constante

$$Q \approx mc\Delta T. \quad (38)$$

El calor específico a presión constante implica que la entalpia de una sustancia pura es función de la temperatura y de la presión. El termino de entalpia sirve para designar al fenómeno mediante el cual la magnitud termodinámica de un cuerpo o elemento es igual a la suma que resulta de su propia energía interna más el resultado de su volumen por la presión exterior, es decir, la entalpia supone la cantidad de energía que se pone en acción cuando se genera presión constante sobre un determinado elemento u objeto material.

Existe una correlación entre la presión (P) y la temperatura (T) para la coexistencia de dos fases en equilibrio; a una presión dada corresponde una temperatura única donde las fases

líquida y gaseosa del agua pueden coexistir en equilibrio. Por ejemplo, a una presión absoluta de 1 bar el agua se encuentra en su fase líquida en un amplio rango de temperaturas, pero en una temperatura de 99.63°C, el agua puede encontrarse como líquido o vapor o una mezcla entre ambas fases. A temperaturas mayores, el agua se encuentra únicamente como vapor. Si se aumenta la presión a 10 bar, el agua se encuentra en fase líquida a diferentes temperaturas, teniendo un equilibrio a los 179.91°C. En consecuencia, la presión y la temperatura no son propiedades independientes.

Las condiciones de P y T en que coexisten dos fases en equilibrio se conocen como condiciones de saturación. Cualquier fase que exista en estas condiciones se conoce como fase saturada. El agua puede vaporizarse en un rango de P y T muy alto (Fig. 13).

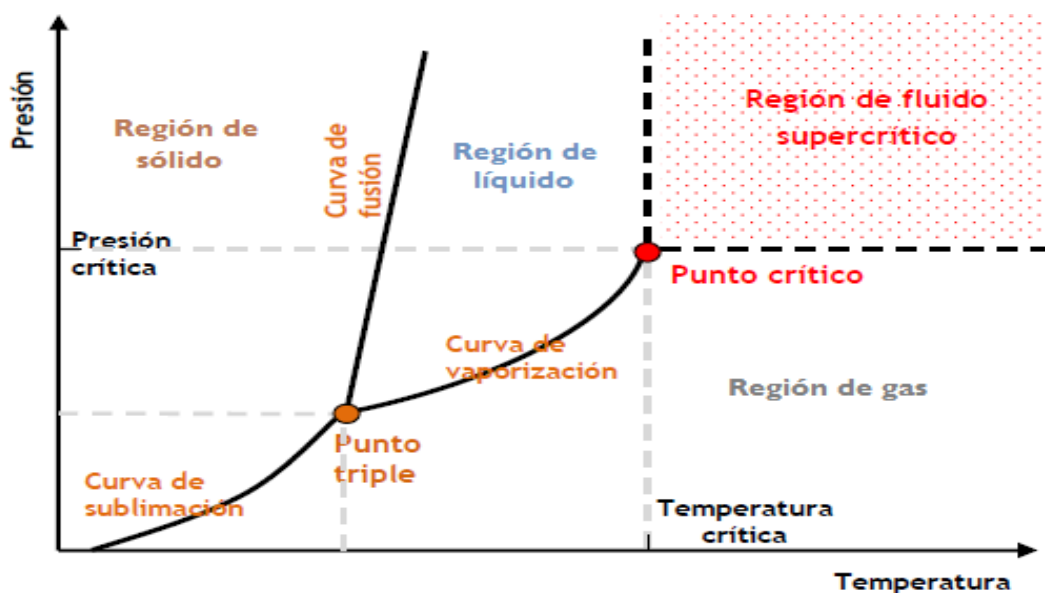


Fig. 13.- Gráfica de Presión-Temperatura resaltando la Curva de saturación líquido-vapor para el agua. Un fluido supercrítico se forma cuando se superan las condiciones de Presión y Temperatura del fluido (Castaños, 2015).

El último método de transferencia de calor es el de la conductividad térmica, una propiedad de los materiales que mide la capacidad de los mismos para conducir calor. Es decir, cuál es su capacidad para transferir energía cinética de sus moléculas a otras adyacentes o a sustancias con las que está en contacto.

$$k = \frac{\dot{q}}{|\nabla T|} \quad (39)$$

donde q es el flujo de calor por unidad de tiempo y unidad de área y ∇T es el gradiente de temperatura.

La conducción de calor a nivel macroscópico se puede modelizar por medio de la ley de Fourier, difiere de la convección en el hecho de que en la convección térmica si existen movimientos macroscópicos de la materia. Todas las formas de materia tienen la posibilidad de transferir calor por conducción, pero la convección solo resulta posible en líquidos y gases.

La conductividad térmica de un gas a bajas presiones tiende hacia una función límite de la temperatura T , para la mayor parte de los gases, este límite se alcanza a una presión de 1 atm. La conductividad térmica de los gases a baja densidad aumenta con la temperatura. En cuanto a los experimentos realizados en líquidos, se ha observado que el calor específico a volumen constante de un líquido monoatómico es el mismo que el de un sólido a temperatura elevada.

La conductividad térmica de los sólidos depende de numerosos factores difíciles de medir o predecir. En el caso de los sólidos porosos, la conductividad térmica depende de la fracción de huecos, tamaño de poros y del fluido contenido en los poros. Los sólidos porosos secos son malos conductores del calor. Los metales son mejores conductores que los no metales y

la conductividad de la mayor parte de los metales puros disminuyen con la temperatura, mientras que las de los no metales aumentan.

4.4.1 Ley de Fourier de la conducción del calor

Esta ley establece que la densidad de flujo de calor por conducción es proporcional al gradiente de temperatura. En un medio isótropo en el que la temperatura varia en las tres direcciones del espacio, esta ley se puede expresar de la siguiente forma

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (40)$$

$$q_y = -k \frac{dT}{dy} \quad (41)$$

$$q_z = -k \frac{dT}{dz} \quad (42)$$

k es la conductividad calorífica (o térmica), propiedad física de las sustancias y de los valores locales de Presión y temperatura. Estas tres relaciones corresponden a los componentes de la ecuación vectorial.

$$q_x = -k \nabla T. \quad (43)$$

Estas ecuaciones establecen que el vector densidad de flujo de calor q es proporcional al gradiente de temperatura ∇T , y de sentido contrario. Por lo tanto, en un medio isótropo el calor fluye por conducción en dirección en que el descenso de temperatura es más pronunciado. Para un fluido en movimiento q representa la densidad de flujo de energía calorífica relativa a la velocidad local del fluido.

Capítulo V

Metodología

Existe una estructura de modelación recomendada para la elaboración de modelos conceptuales de flujo subterráneo (Anderson y Woessner, 1992, Bear et al., 1992, Armas-Vargas, 2010), donde una vez que se ha identificado el problema de modelación y se han revisado los estudios previos, se elabora un diseño del modelo (Fig. 14). En esta parte se hace un análisis de las características de la malla de modelación, las condiciones de frontera y las condiciones iniciales que se estarán empleando. Posteriormente se realiza una selección de los parámetros físicos, geológicos, geofísicos e hidrogeológicos que alimentaran al programa, intentando que estos representen con la mayor fiabilidad posible aquellas características que se observan en campo.

Establecidos los datos de entrada del modelo se procede a elaborar un modelo conceptual, donde se establece una representación simplificada del comportamiento del sistema acuífero. Posteriormente un modelo numérico y finalmente, una vez elaborado el modelo numérico, se recomienda que el resultado sea calibrado en base a un análisis de los flujos en campo mediante ensayo y error. De esta forma el modelo puede someterse a una etapa de comprobación en donde se estipula si el diseño del modelo es el adecuado o si es necesario modificar datos y replantear el modelo conceptual elaborado y por lo tanto la modelación numérica.

La metodología que se siguió en este trabajo de investigación no sigue por completo los pasos recomendados por Armas-Vargas (2010). Al tratarse de un problema de flujo de agua subterránea y flujo de calor transiente, se modificaron algunos aspectos de modelación (Fig. 15).

En una primera etapa, se recabaron diferentes datos y parámetros físicos de la zona de estudio, enfatizando el análisis de datos hidrogeológicos reportados en estudios previos, principalmente en el de Medina Vega (2008) y CONAGUA (2009) para toda la región hacia el norte de Morelia y los municipios de Tarímbaro, Cuitzeo y Copándaro. Posteriormente se seleccionaron las herramientas adecuadas para el procesamiento de datos.

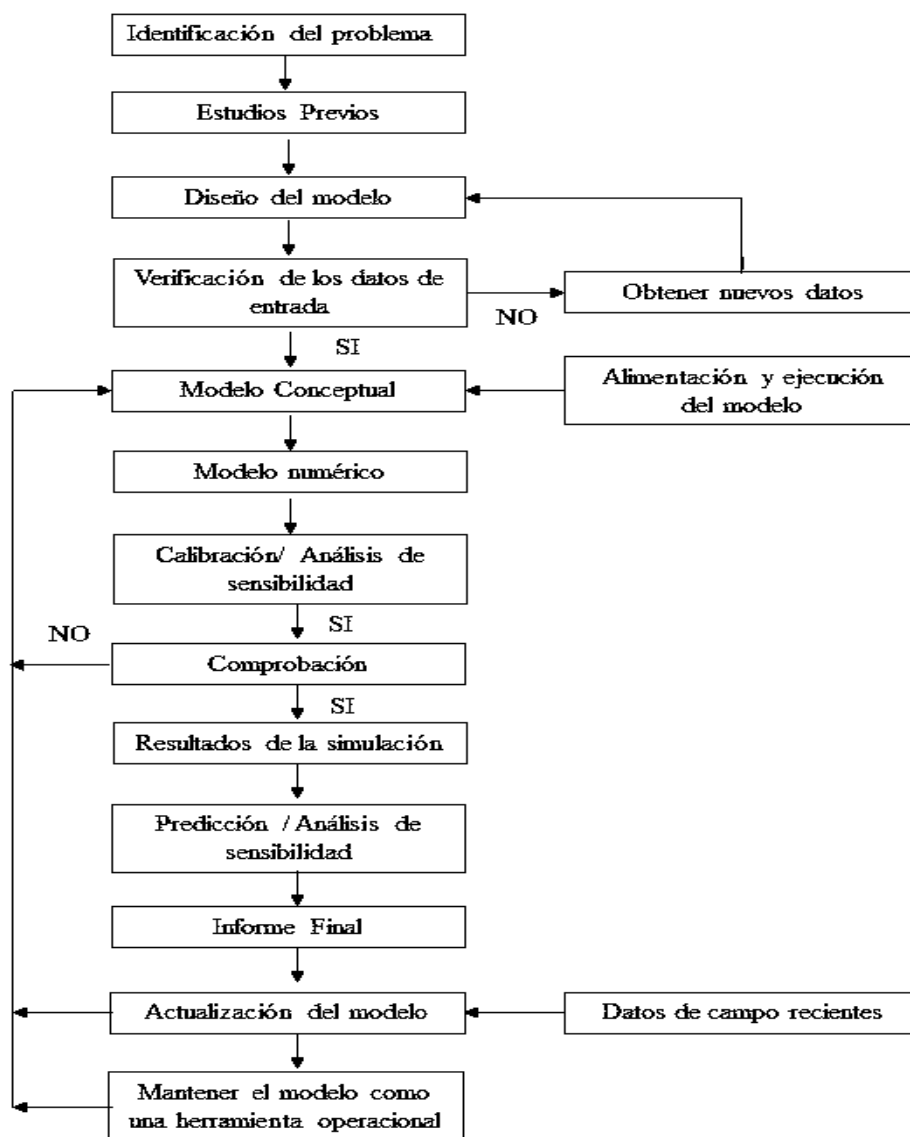


Fig. 14.- Pasos para establecer un modelo de simulación hidrodinámica (editado de Armas -Vargas, 2010).

De acuerdo con Núñez (2001), los modelos numéricos son los más utilizados en hidrogeología, así como en la investigación y gestión de los acuíferos contaminados. Actualmente existen un gran número de herramientas computacionales que presentan modelos genéricos para resolver problemas relacionados al flujo de agua subterránea. La selección de dichas herramientas o modelos dependerá del problema, precisión, costo y utilidad buscada. En base a un análisis de dichos criterios, se optó por utilizar el software GMS que utiliza la técnica numérica de Diferencias Finitas por el modelador interno de sistemas de flujo Modflow.

El procesamiento de datos llevo a la obtención de una serie de insumos para la construcción del modelo conceptual:

- Carta topográfica escala 1:50000, E14A13 (Cuitzeo) y E14A23 (Morelia) para extraer datos de elevación.
- Mapa de puntos de dispersión XY (Scatter points).
- Construcción de una superficie de red irregular de triángulos (TIN).
- Polígonos con la frontera, recarga, drenaje, fallas, intrusiones y celdas de elevación constante (potencial hidráulico) del área de modelación.
- Sólidos con datos geológicos y geofísicos de la zona
- Malla de modelación 3D

Cuando la zona de modelación no queda cubierta por una carta topográfica, se elabora un mosaico en un sistema de información geográfica. Los TIN pueden usarse para representar la superficie de una unidad geológica o la superficie definida por una función matemática.

Los TIN se utilizan para la construcción de los sólidos del modelo y las malla 3D de elementos finitos.

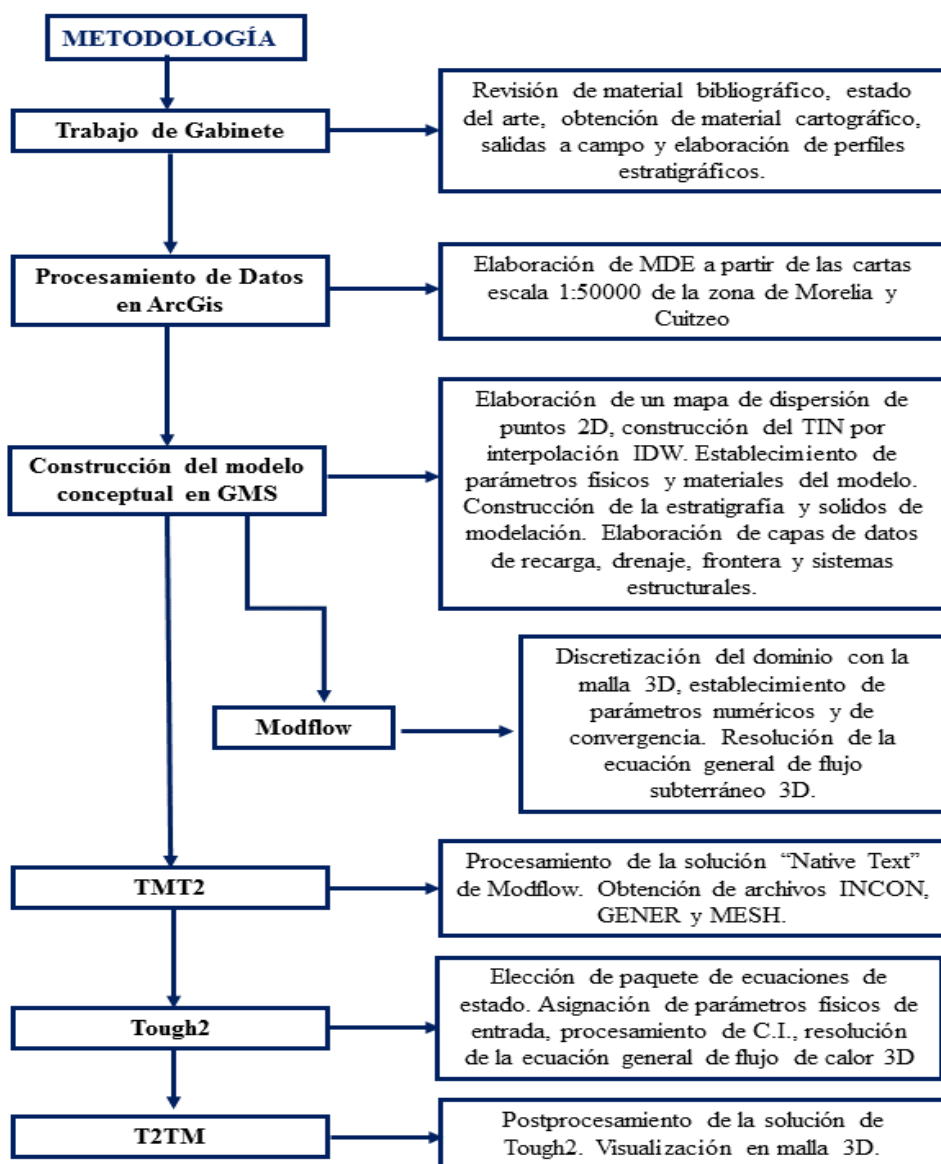


Fig. 15.- Descripción general de la metodología empleada para modelaciones Modflow-Tough2.

El modelo conceptual que se construye en GMS y que representa la base del modelo de flujo subterráneo, se puede elaborar de dos formas distintas; por medio de la aproximación de la malla 3D o por medio de capas y sólidos que posteriormente se carguen a la malla. Este trabajo empleo la aproximación de capas y sólidos (Tabla 11) por dos razones principales; poder asignar al modelo la geología de la región y en base a dichos datos establecer una interpolación para la construcción de sólidos correspondientes para tener un mayor control en el proceso de construcción de la malla.

Tabla 11.- Insumos del modelo conceptual en GMS.

Insumos del Modelo Conceptual
Cartas topográficas E14A13 y E14A23, Cuitzeo y Morelia respectivamente, escala 1:50000 de INEGI.
Datos hidrogeológicos basados en 15 pruebas de bombeo de corta duración (transmisividades en el acuífero varían entre los 0.13×10^{-3} y 7.08×10^{-3} m ² /s, el coeficiente de almacenamiento se ajustó al de un acuífero libre con zonas de semiconfinamiento con valores entre 0.005 y 0.03. Los datos de infiltración generales para el acuífero Morelia-Queréndaro son de 75 mm ³ /año de manera natural desde los flancos montañosos y 45 mm ³ /año como producto de la infiltración excedentes de riego y la contribución del río grande de Morelia) [Medina-Vega, 2008].
Datos de precipitación por temporada y promedio anuales.
Datos de evaporación por temporada y promedio anuales.
14 perfiles estratigráficos de 30 km de longitud S-N con datos geológico-geofísicos de gran precisión.
Datos de conductividad hidráulica y porosidad de los materiales (Sanders, 1998), anisotropía (horizontal 1.0 y vertical 3.0), conductividad hidráulica (0.01 m/s) y almacenamiento específico.

Inicialmente el modelo digital de elevaciones correspondiente fue importado y se realizó el mapa de puntos de dispersión 2D que posteriormente fue utilizado como insumo para la construcción de una superficie de red irregular de triángulos (TIN). Los TIN pueden usarse para representar la superficie de una unidad geológica o la superficie definida por una función matemática. Esta red se utilizó como una base para la construcción de los sólidos del modelo (Fig. 16).

Los sólidos son los que conceptualizan la geología y la geofísica de la región. En ellos se cargan las características físicas de los materiales y su distribución espacial. Son los más importantes en la construcción del modelo conceptual. Para elaborar los sólidos se requiere conceptualizar la estratigrafía a partir de los perfiles obtenidos en campo y por medio del trabajo de gabinete. Cada perfil se divide en puntos de control (en nuestro caso a cada 5 km) donde se levantan columnas estratigráficas. Posteriormente se construyen manualmente las características de cada perfil y se indican los contactos de cada horizonte. La numeración para los denominados “Horizon ID” se establecen en orden cronológico, desde los materiales más antiguos hasta los más recientes. Se utilizan dichos puntos y el TIN previamente establecido para hacer una interpolación IDW (Ponderación por distancia) y construir los sólidos en la región de las columnas estratigráficas. Posteriormente una extrapolación para cubrir toda la región del TIN.

La interpolación para la construcción de los sólidos se ve comprometida si la estratigrafía contiene saltos abruptos o desplazamientos considerables de los horizontes de los materiales, como los que existen a causa de las intrusiones o sistemas de fallas en la zona. Para que el modelo conceptual represente con mayor fiabilidad las características de la región, se requieren otras capas, donde destacan las que contienen los aspectos estructurales. Estas

capas aunque son elaboradas en 2D se cargan en todas las capas verticales de la malla, para simular su aspecto tridimensional.

Se construyen otras coberturas o capas necesarias para la simulación en Modflow; la que contiene los polígonos con datos de la precipitación media anual, evaporación (Medina-Vega, 2008), drenaje superficial y los polígonos de potencial hidráulico constante. Finalmente se construye una capa con las condiciones de frontera del modelo. Las condiciones iniciales para la simulación en Modflow se establecen a través de un truncamiento en la topografía, donde por medio de una operación aritmética se extrae una capa totalmente saturada, nivelando la topografía de las celdas de carga constante en el acuífero que se está modelando.

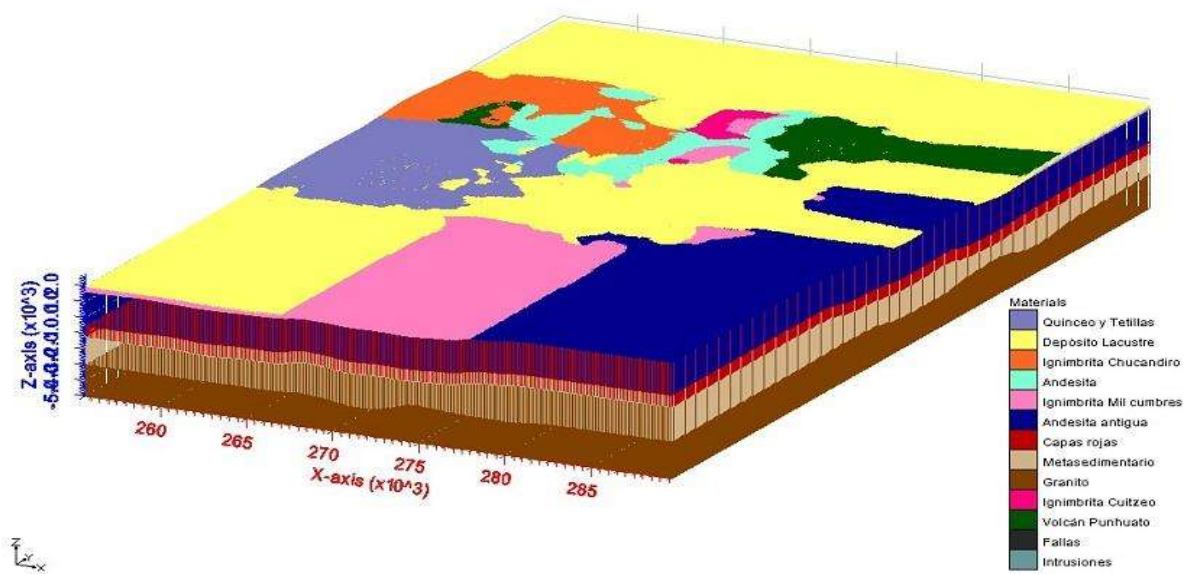


Fig. 16.- Representación de la interpolación de perfiles estratigráficos para la construcción de sólidos en el proceso de modelación regional.

Con la construcción de los sólidos y los parámetros físicos que se han asignado a cada material en la zona de estudio queda conceptualizada la región y entonces se implementan modelos matemáticos que simulan el comportamiento real del sistema. En el modelo matemático el dominio se discretiza mediante una malla 3D que estructura el sistema de celdas en las que se definen sus características de carga hidráulica, permeabilidad y cuantos parámetros físicos se conozcan. Con la discretización del sistema se asignan a cada grupo de celdas las propiedades de control del flujo y se inicia la modelación del flujo de agua subterránea en Modflow.

Para Modflow se activaron paquetes de drenaje, recarga y potencial constante. Los datos para dichos paquetes se cargaron a la malla 3D por medio de las capas previamente elaboradas. Se elige el método numérico de solución (en este caso gradiente conjugado con el método preconditionante incompleto de Cholesky), se revisan las condiciones iniciales y de frontera, se añaden los materiales a la malla y posteriormente se asignan los criterios de convergencia (0.1 m), criterios de residuos ($0.1 \text{ m}^3/\text{s}$), el número de iteraciones (50) y se realiza la compilación.

En GMS no existen las denominadas superficies de falda (nivel freático), sin embargo, Tough2 requiere que la capa superior de modelación sea igual a dicha superficie. Para llevar esto a cabo, se elaboró una malla que contiene la parte superior de cada celda totalmente saturada. Para ajustar la malla a dichos parámetros, se adecua la elevación en base a los resultados para la primera celda. Esto garantiza que el borde inferior de dicha capa se encuentre totalmente saturado de agua y que la malla respete la topografía de la región.

Las condiciones hidrostáticas de Modflow generalmente no corresponden a las condiciones hidrostáticas de Tough2 porque Modflow no considera variaciones en la

densidad del agua, compresibilidad y expansión termal, entonces Tough2 debe reequilibrar las condiciones hidrostáticas.

Los datos necesarios para caracterizar un sistema de flujo en Tough2 incluyen parámetros hidrogeológicos y relaciones constitutivas de los medios permeables (permeabilidad, porosidad, presión capilar, etc.), propiedades termofísicas de los fluidos, condiciones iniciales y de frontera (así como datos de pozos en caso de tenerlos dentro de la simulación). Utiliza el sistema internacional de unidades, por lo que es muy importante que se asignen las mismas unidades físicas de medición en la solución del modelo de flujo.

GMS permite extraer la solución de Modflow en base a los denominados Native text (Tabla 12), que son los archivos originales de Modflow-GMS.

El archivo .rck lo aporta el usuario y el .hed contiene la solución de Modflow. TMT2 procesa los archivos nativos de Modflow y entrega como resultado los archivos INCON (de condiciones iniciales), MESH (con condiciones de malla) y GENER (condiciones geométricas de la malla), adicionalmente el usuario aporta un archivo INPUT con las condiciones generales para correr la simulación transiente.

Una vez reguladas las condiciones iniciales del sistema (véase sección 4.3.2), el usuario elige el tiempo de simulación y el tiempo en el cual el programa exporta datos de la solución. Cada vez que se completa un proceso de simulación en Tough2, el programa exporta el archivo SAVE (condiciones de presión-temperatura finales en cada celda de la malla) y el archivo OUTPUT (con las condiciones generales de la solución en cada paso de tiempo previsto).

Finalmente la solución en Tough2 requiere un último post-procesamiento. La precisión en las coordenadas geográficas de cada elemento en la malla tiene una precisión más burda en Tough2, el objetivo de utilizar la subrutina T2TM (Tough2 to Modflow), radica en la

utilidad de este software para proveer precisión a las coordenadas de cada punto dentro de la malla 3D y con ello ser compatible con GMS. Una vez procesada la solución se exporta a GMS y se visualiza en la malla 3D.

Tabla 12.- Insumos para TMT2.

Archivo	Uso
.dis	Se utiliza para leer los parámetros de la malla de Modflow
.ba6	Se utiliza para leer la matriz de las condiciones iniciales de Modflow y distinguir entre celdas activas, inactivas y de potencial constante
.ghb	Archivo usado para leer los elementos de potencial constante de Modflow y su valor correspondiente
.mfs	Se utiliza para identificar los materiales para cada celda
.rch	Es usado para leer la recarga en cada celda
.hed	Contiene los valores de carga constante computados con Modflow y que se utilizan para calcular las condiciones hidrostáticas iniciales.
.rck	Este archivo contiene los datos de los materiales de GMS y la nomenclatura de dichos materiales para Tough2

Una vez realizada la 1ª modelación conceptual denominada modelo Morelia y analizados los diagramas de flujo, se procedió a evaluar el acuífero en San Agustín del Maíz en un segundo modelo conceptual. Esto con el objetivo de hacer un estudio profundo sobre el comportamiento transiente del campo geotérmico en esa zona. La malla de modelación centra las manifestaciones hidrotermales observadas en campo. Se aplicó la misma metodología reportada para la elaboración del modelo Morelia y dicha simulación transiente fue desarrollada simultáneamente con Fumagalli (2016) en colaboración con el Instituto de

Ciencias de la Tierra de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y el proyecto 17 del CEMIE-Geo.

El resultado de la simulación transiente a 200 años sirvió como insumo para el análisis posterior del campo geotérmico en San Agustín del Maíz, para caracterizar propiedades recientes del campo geotérmico y la puesta en marcha de una planta de explotación de energía geotérmica, para ello se modeló un pozo productor y un pozo extractor en dos simulaciones distintas. Dicho proceso se construyó en dos etapas: 1) los archivos SAVE extraídos de la simulación a 200 años del modelo de Fumagalli (2016) se utilizaron como condiciones iniciales en una nueva simulación transiente que tuvo como objetivo principal reproducir las condiciones actuales del campo geotérmico. Se extrajeron datos a mil, cinco mil, diez mil y veinte mil años. 2) Se utilizó la solución a diez mil años¹² como insumo para la simulación del campo de explotación, esto como una aproximación a priori de la edad actual del yacimiento geotérmico. En esta etapa de modelación se decidió dividir el proceso en dos partes; primero se realizó una simulación del campo geotérmico en lo que creemos podrían ser las peores condiciones de desarrollo (por su localización respecto a carreteras federales y localidades rurales). Después se elaboró una simulación colocando el campo geotérmico en una posición estratégica para el aprovechamiento del recurso hidrotermal en una planicie fuera de las localidades de San Agustín del Maíz y en donde consideramos que técnicamente pudieran desarrollarse dichos pozos.

La simulación del campo geotérmico se llevó a cabo en una extensión de Tough2 conocida como ECO2N. A diferencia de EOS3, ECO2N sirve para modelar mejor la salinización si

¹² En el resultado a diez mil años del modelo Cuitzeo, las condiciones de presión y temperatura del campo se consideraron como archivo INCON para la simulación pero además se añadieron datos de salinidad y Dióxido de Carbono, con el propósito de representar con la mayor fiabilidad posible las condiciones de funcionamiento del campo geotérmico.

es que hay carbonatos de calcio cuando hay sales y CO₂. Para una primera simulación del campo geotérmico se establecieron los datos de salinidad (9.99×10^{-6}) y Dióxido de Carbono (1.0×10^{-4}) constantes. Se hizo un ajuste de presión en las celdas y conexiones en las cuales se localizaría el pozo inyector y productor y se desplazaron en los archivos INCON para que dichas condiciones se mantuvieran durante la simulación.

Para la segunda y última modelación del campo geotérmico en funcionamiento se eligieron nuevas posiciones para los pozos productor y extractor. Una posición en la cual, si se pusieran en marcha los pozos de producción, no se localizaran dentro de las comunidades aledañas. Para llevar esto a cabo se modificó ligeramente la metodología. No se pusieron las celdas de los pozos inyector y productor en la sección de condiciones de contorno fijas, por el contrario, se asignó su valor de Presión, Temperatura, Salinidad y Dióxido de Carbono y se dejó correr en el tiempo hasta que llegó a un punto de estabilidad en el cual se tomó la lectura del resultado.

Los principales resultados de la aplicación de la metodología descrita, su discusión y las conclusiones generales se presentan en los capítulos siguientes.

Capítulo VI

Resultados

En una primera etapa de modelación se consideró una región que abarca los acuíferos de Tarímbaro y Cuitzeo, tomando en cuenta zonas aledañas pertenecientes a los municipios de Morelia, Álvaro Obregón y Copándaro con la intención de analizar los sistemas de flujo y recarga correspondientes para el Lago de Cuitzeo y las manifestaciones hidrotermales de San Agustín del Maíz. Este primer Modelo se denominó Morelia. Para elaborarlo se construyeron las mallas 3D correspondientes para iniciar las simulaciones en Modflow y se asignó la geología y los datos geofísicos, además de capas con datos estructurales (fallas e intrusiones), drenaje, recarga y potencial hidráulico constante. Las condiciones iniciales se extrajeron a partir de un truncamiento¹³ en la topografía con los valores más bajos, para asegurar un saturamiento de agua (necesario para el funcionamiento de Modflow).

El Modelo Morelia, aquí propuesto, abarca un área de 771 km² (Fig. 17) y un espesor vertical de 4360 m con un total de 136000 celdas activas y 397900 conexiones. La máxima profundidad de la malla se localiza a 2500 m. No se aplicaron criterios de refinamiento para la malla correspondiente; cada celda tiene dimensiones de 400 x 400 x 218 m.

En cada modelación se aplicó un método iterativo para obtener la solución del sistema de ecuaciones correspondiente; para la primera iteración el criterio de convergencia en las condiciones iniciales fue de 10 m, posteriormente a 1 m y finalmente cada 10 cm. El criterio de error para la convergencia fue inicialmente de 0.1 m³/s y finalmente de 0.01 m³/s. El método de solución numérica fue el de Gradiente preconjugado (PCG2) con el método

¹³ Truncamiento en el campo del análisis numérico se refiere a una aproximación a los números reales quitando decimales o agregándolos para hacer un ajuste aproximado del valor numérico buscado, en este caso para la media de valores de la topografía de la primera capa del acuífero.

modificado incompleto de Cholesky como preconditionante para la matriz correspondiente para con ello garantizar una óptima convergencia bajo el criterio de que cada instrucción sobre el procesador opera sobre un dato y no un conjunto de datos a la vez. La calibración se realiza de manera automática por el software y el error máximo que se ha encontrado en las simulaciones es del orden de 10^{-9} m.

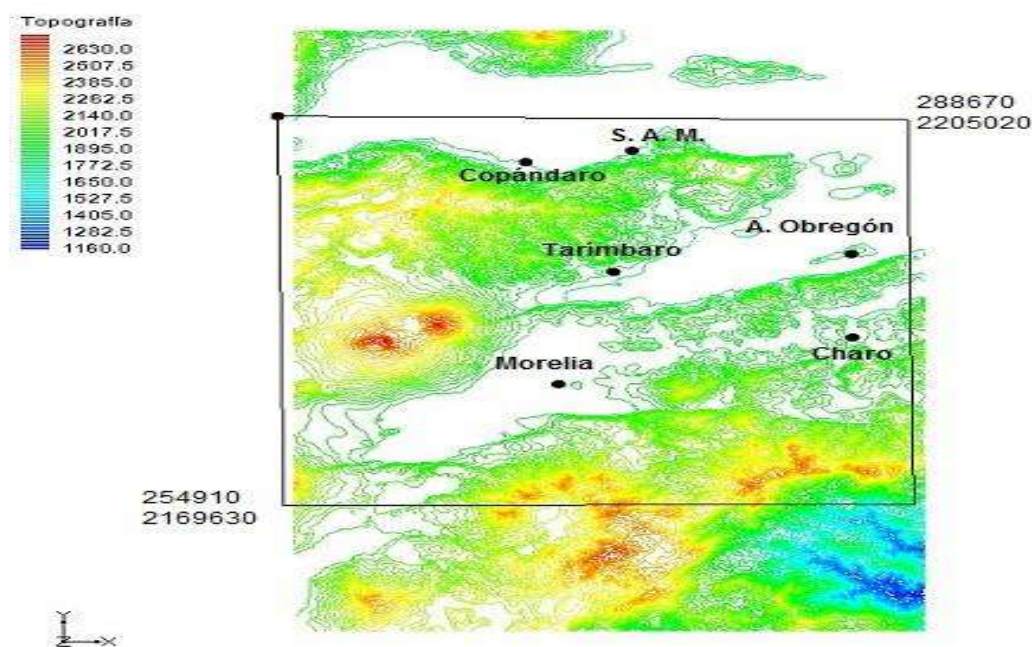


Fig. 17.- Frontera de modelación¹⁴ para el Modelo Morelia.

Los resultados obtenidos de la simulación en Modflow (Fig. 18) sugieren que el sistema de drenaje de la sierra de Mil Cumbres aporta una recarga superficial considerable al acuífero ubicado en Morelia, Charo, Atapaneco, Uruetaro y en el municipio de Álvaro Obregón. El volcán Quinceo y Tetillas aporta una recarga superficial y un flujo subterráneo preferencial hacia los márgenes norte y SE del acuífero de Morelia y SO del lago de Cuitzeo. El flujo

¹⁴ Frontera de modelación es una expresión empleada en matemáticas para denotar el conjunto de puntos que delimitan la región en la cual se resuelven las Ecuaciones Diferenciales.

subterráneo desde el municipio de Charo es en dirección a la planicie del municipio de Álvaro Obregón principalmente, donde se distribuye en 3 direcciones principales; una hacia el municipio de Tarímbaro, otra en dirección al Lago de Cuitzeo y otra mayor profundidad respecto a la asignada a la malla de modelación. Aproximadamente después de 1 km de profundidad la dirección general de flujo subterráneo del acuífero regional es principalmente hacia los márgenes S y SO del lago de Cuitzeo (Figs. 19 y 20).

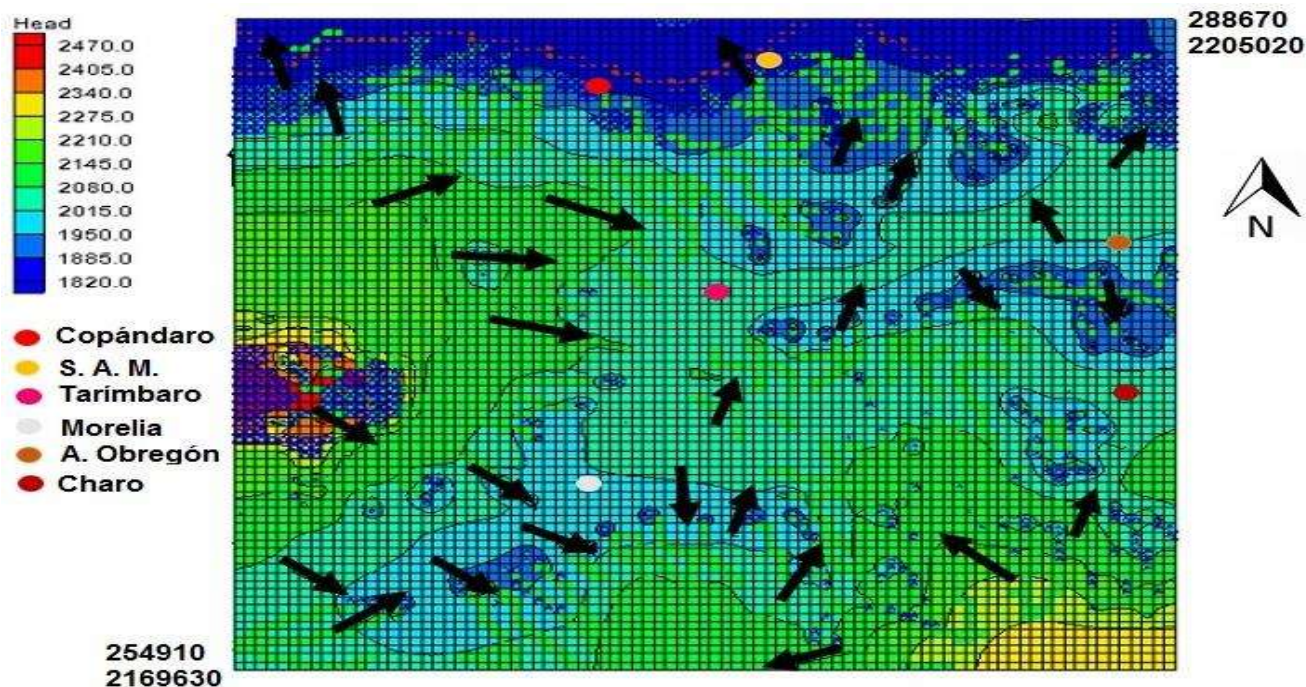


Fig. 18.- Solución de Modflow en la malla 3D del modelo Morelia. Resaltan en la capa superior las celdas de drenaje (verde), flujo (azul) y de potencial constante (rojo). Adicionalmente “Head” señala la topografía regional y se remarcan algunos de los vectores de flujo.

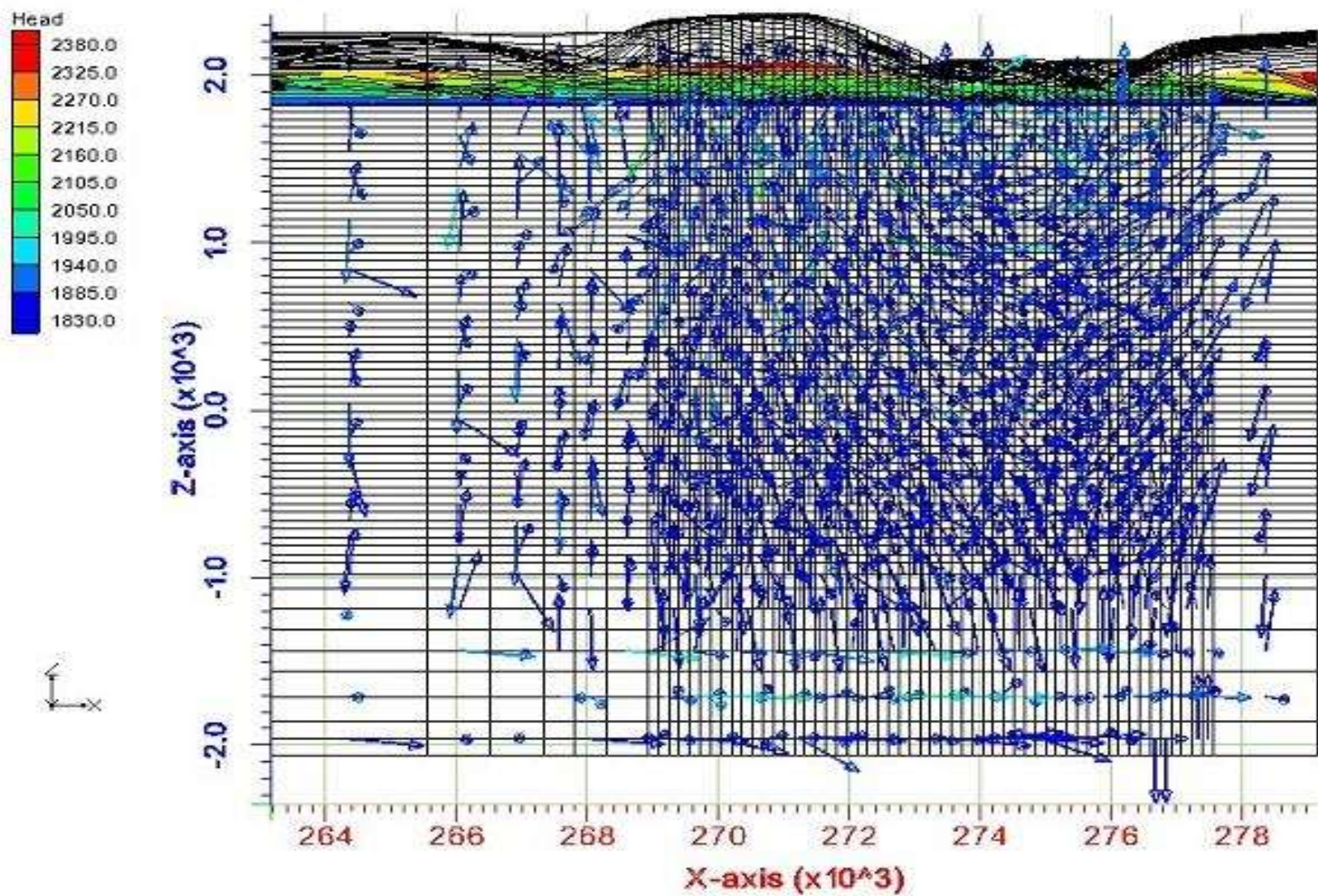


Fig. 19.- Dirección de flujo por medio de vectores de velocidad en el modelo Morelia. Vista de perfil en dirección S-N.

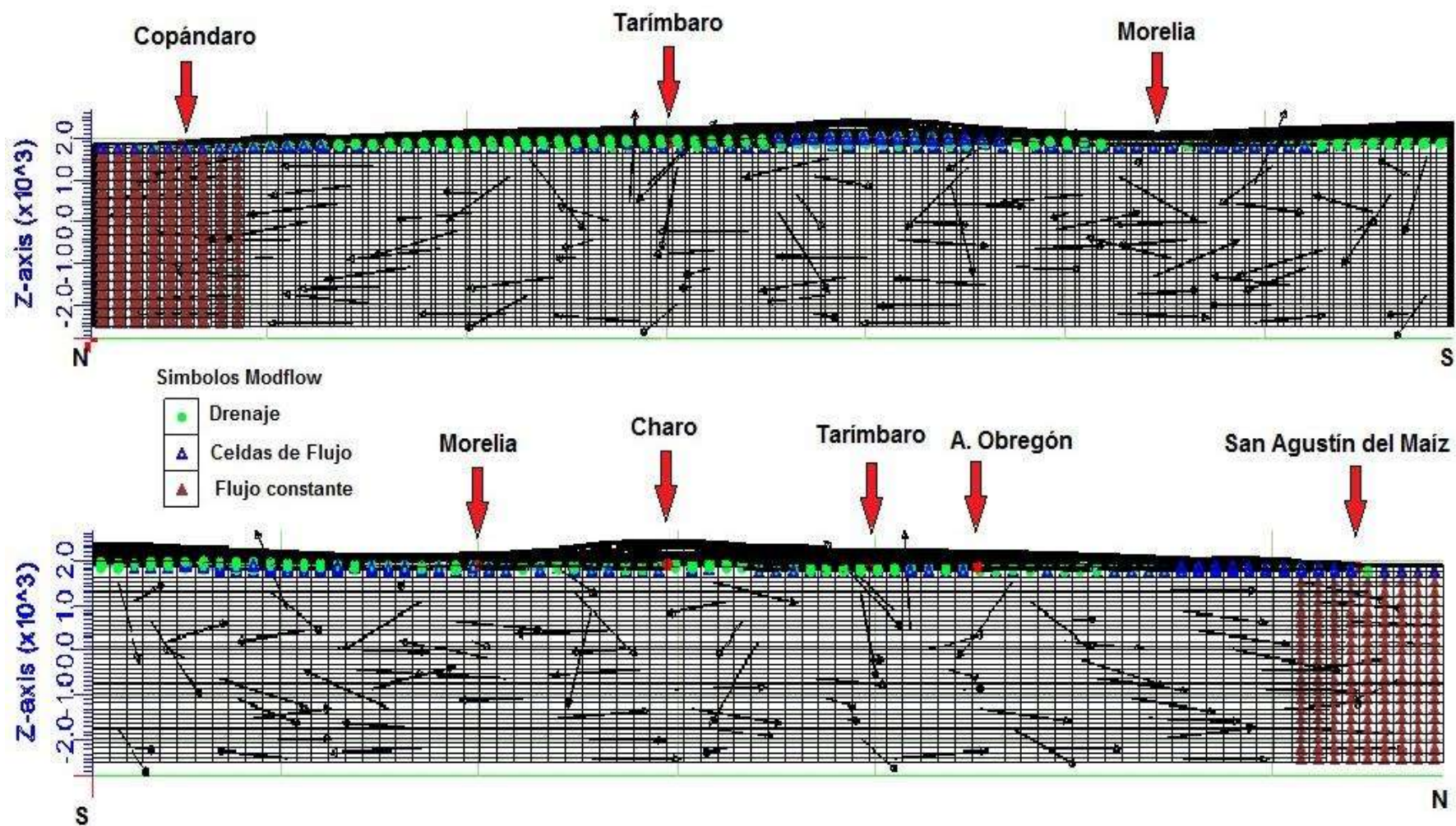


Fig. 20.- Perfiles N-S, S-N de la dirección de flujo en los acuíferos presentes en el Modelo Morelia con vectores de velocidad separados.

Los resultados observados en el Modelo conceptual Morelia realizado en GMS sugieren que lo que se observa en superficie respecto al flujo de agua por la topografía regional es verificado a profundidad al tener una recarga de los acuíferos en dirección de flujo preferencial a los márgenes sur de la ribera del Lago de Cuitzeo (Fig. 20).

Al concluir la simulación en Modflow para el acuífero regional se estableció una predicción de las condiciones de flujo de agua subterránea al acuífero profundo en San Agustín del Maíz. A partir de eso se replanteó la metodología para elaborar un modelo conceptual “local” con dos características muy importantes; primero contar con una malla cuyo número de elementos fuera menor a las treinta mil celdas con el objetivo de que al modelar el flujo de calor en Tough2 no se perdiera información, es decir, que en el proceso de traslación de GMS a Tough2 pudiéramos asegurar (en un sentido computacional) un manejo adecuado para la malla.

El segundo modelo se denominó Cuitzeo (Fig. 21). Se desarrolló con una malla de 20615 celdas activas en cuyo centro se localiza la localidad de San Agustín del Maíz en donde se encuentran las manifestaciones hidrotermales de interés para este trabajo de investigación.

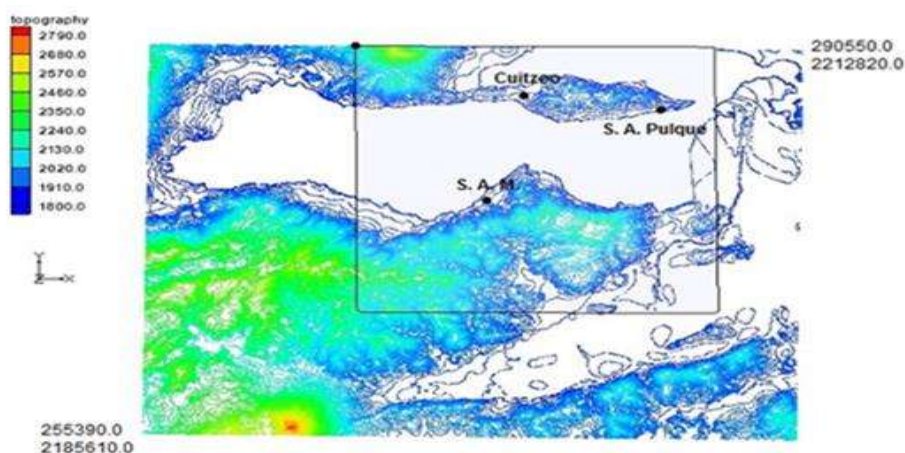


Fig. 21.- Frontera de modelación del acuífero geotérmico en la localidad de San Agustín del Maíz.

El Modelo Cuitzeo se desarrolló en colaboración con Fumagalli (2016) y el proyecto 17 de CEMIE-Geo. Inicialmente se aplicó la misma metodología que en el Modelo Morelia, se analizaron las condiciones locales de flujo en la localidad en base a los resultados obtenidos de Modflow y se aplicó por primera ocasión la subrutina TMT2 utilizando los resultados y la malla elaborada en GMS para resolver de manera transiente la ecuación de calor. La primera modelación se hizo hasta 200 años (Figs. 22, 23 y 24).

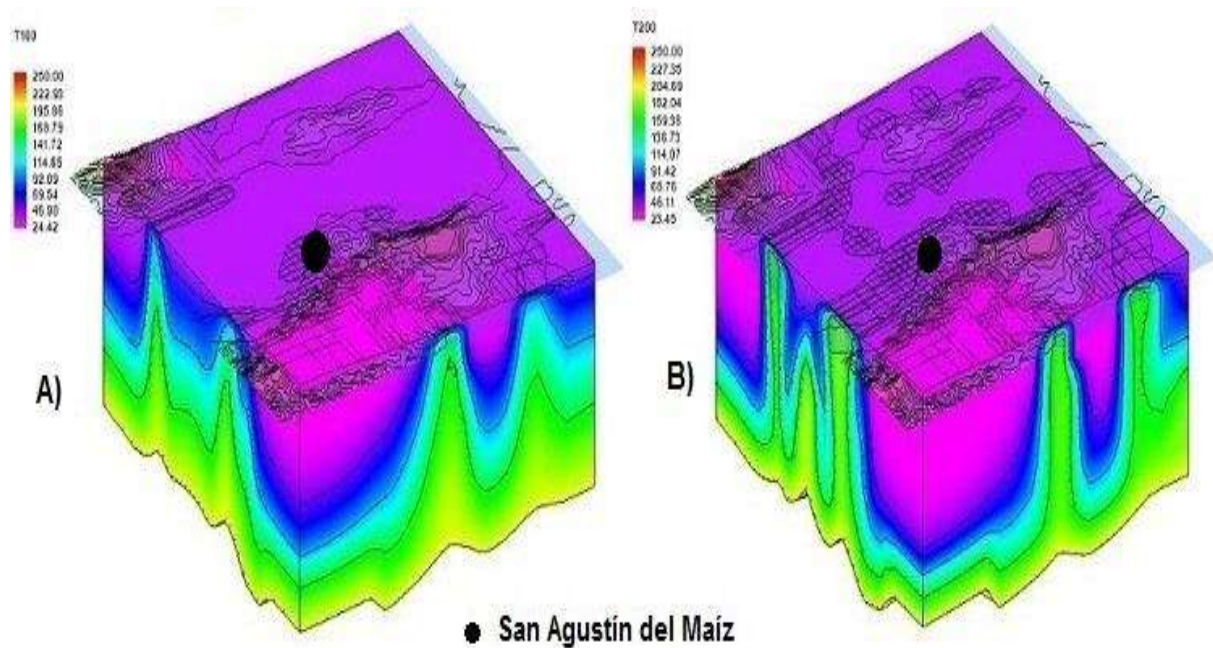


Fig. 22.- Flujo de temperatura encontrado en el modelo Cuitzeo (A) 100 años (B) 200 años (Fumagalli, 2016).

T100

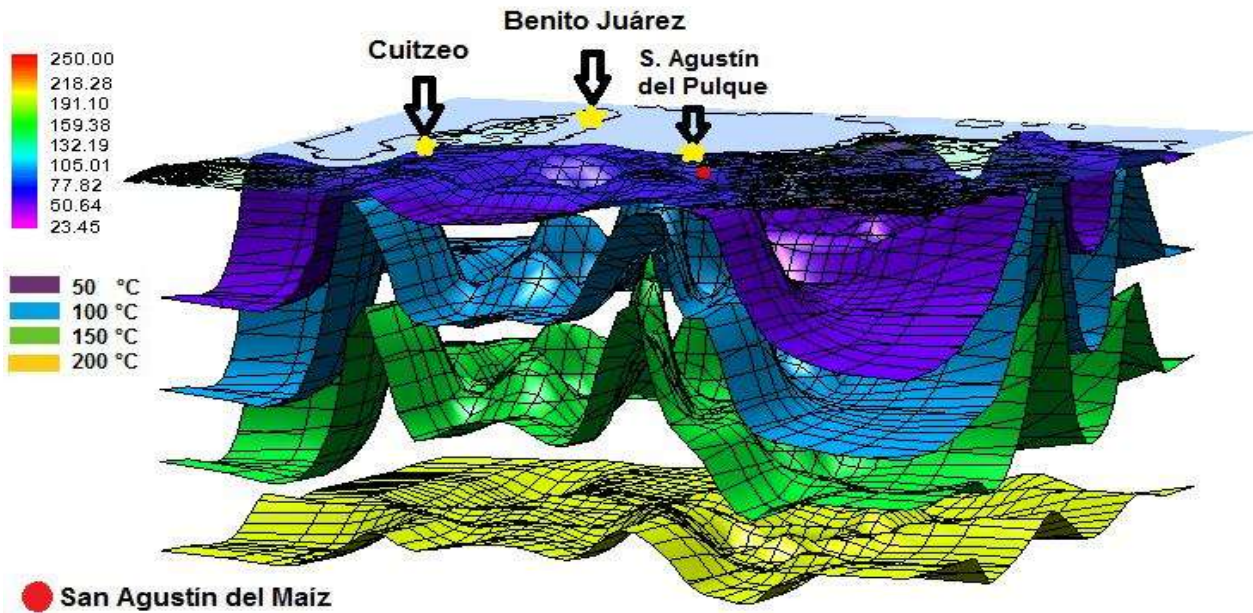


Fig. 23.- Temperatura a 100 años en la localidad de San Agustín del Maíz, resaltando isothermas de 50 a 200°C (editado de Fumagalli, 2016).

T200

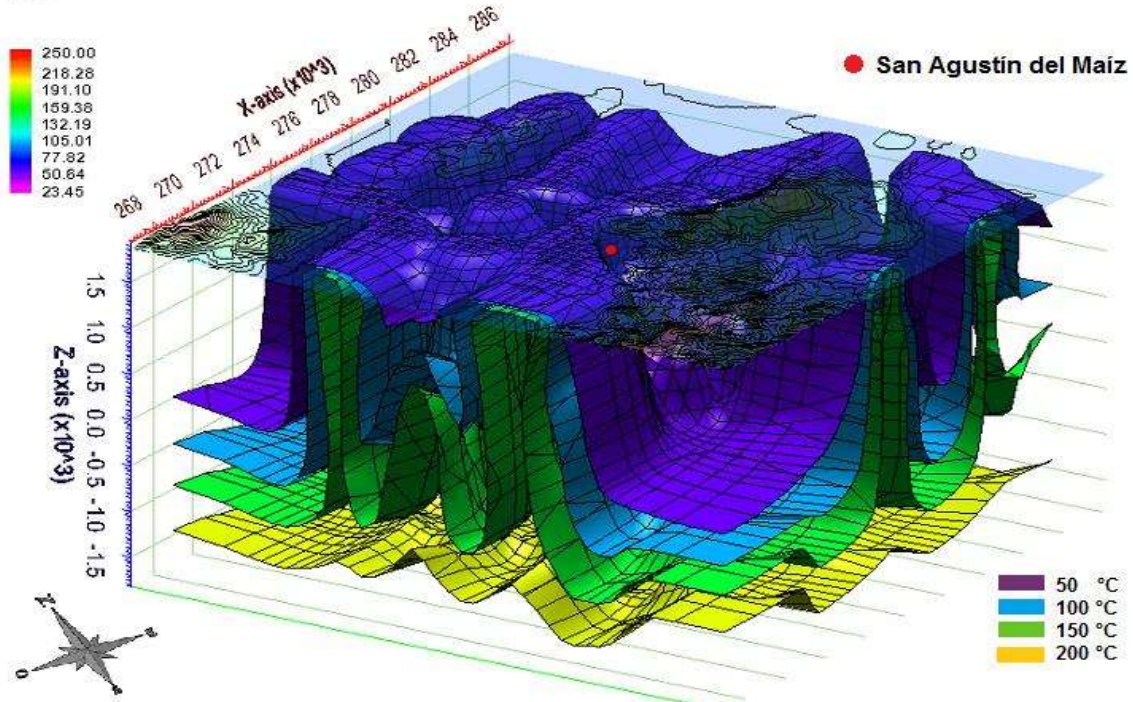


Fig. 24.- Temperatura a 200 años en la localidad de San Agustín del Maíz, resaltando isothermas de 50 a 200°C.

El archivo que se obtuvo de la modelación transiente de 200 años, se utilizó como condición inicial para el siguiente proceso de modelación. Se utilizó Tough2 para modelar el comportamiento del campo en miles de años. Se establecieron soluciones para mil, cinco mil y hasta cuarenta mil años que después del procesamiento correspondiente (T2TM) fueron visualizadas en la malla del Modelo Cuitzeo en GMS.

En base a las soluciones observadas de cinco a cuarenta mil años (Figs. 25 y 26), se eligió la solución a diez mil años (Fig. 27) como condición actual del yacimiento para elaborar un modelo que permita analizar el comportamiento de un campo geotérmico (un pozo productor y uno inyector) si este se pusiera en marcha en la localidad de San Agustín del Maíz.

La condición inicial se eligió de esa forma debido a que las plumas de temperatura (80 y 100°C) se encuentran rodeando la localidad (en las posiciones en las que se reportan manifestaciones hidrotermales en la región), además de que se considera que desde su génesis, el campo geotérmico podría tener una edad aproximada a los 10 mil años, lo cual da una pauta para suponer que es la solución que más se aproxima a las condiciones actuales del yacimiento geotérmico.

De la solución en Tough2 se pueden extraer datos de Presión, Presión capilar, Temperatura y Densidad principalmente; por la naturaleza del proyecto se ha concentrado la atención en los resultados del comportamiento de la Temperatura.

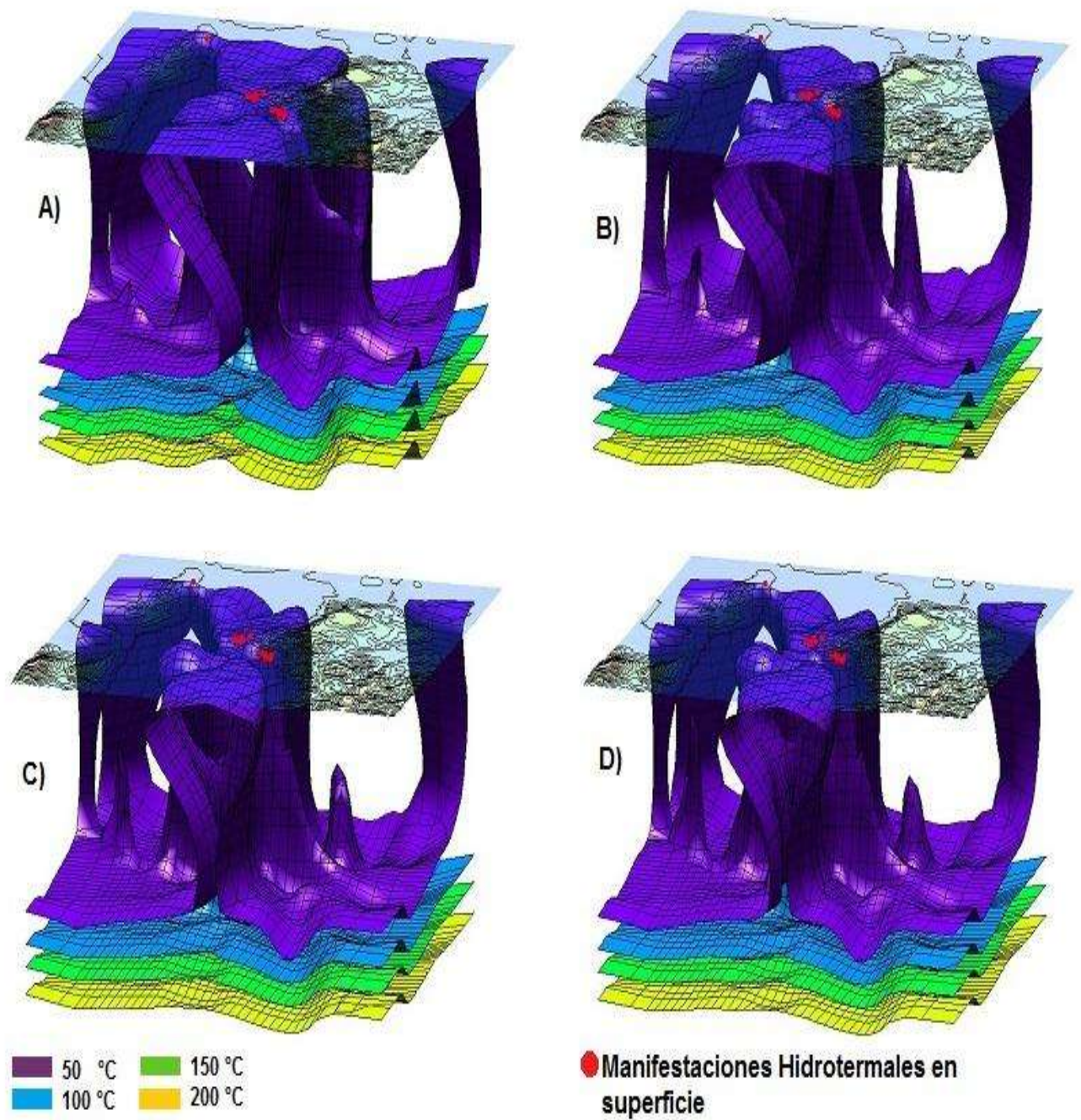


Fig. 25.- Plumas de Temperatura (50, 100, 150 y 200°C) en la región donde se presentan manifestaciones hidrotermales, A) 5000 años, B) 10000 años, C) 15000 años, D) 20000 años.

Modelo Cuitzeo.

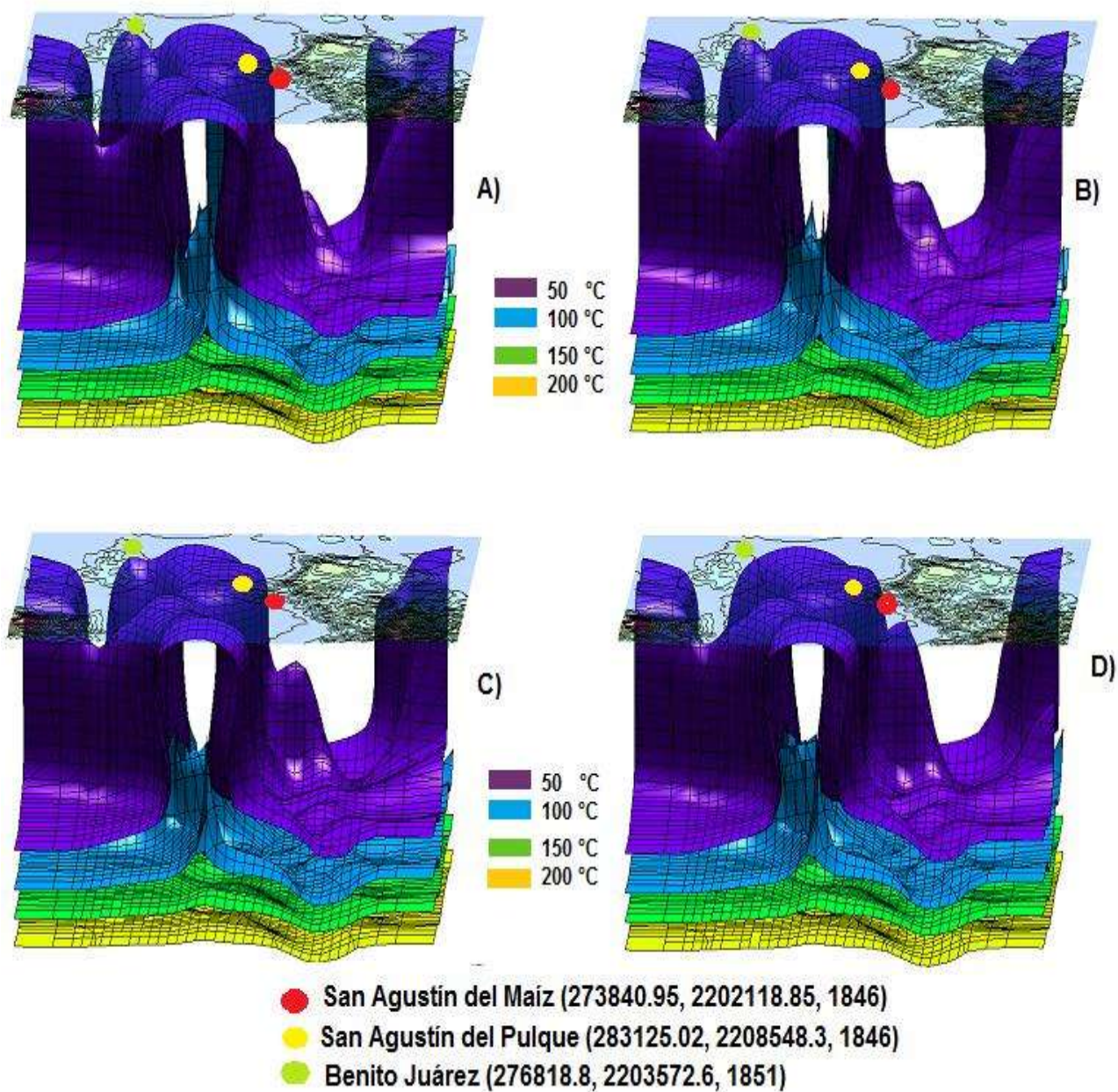


Fig. 26.- Plumas de Temperatura (50, 100, 150 y 200°C) en la región donde se presentan manifestaciones hidrotermales, A) 25000 años, B) 30000 años, C) 35000 años, D) 40000 años. Modelo Cuitzeo.

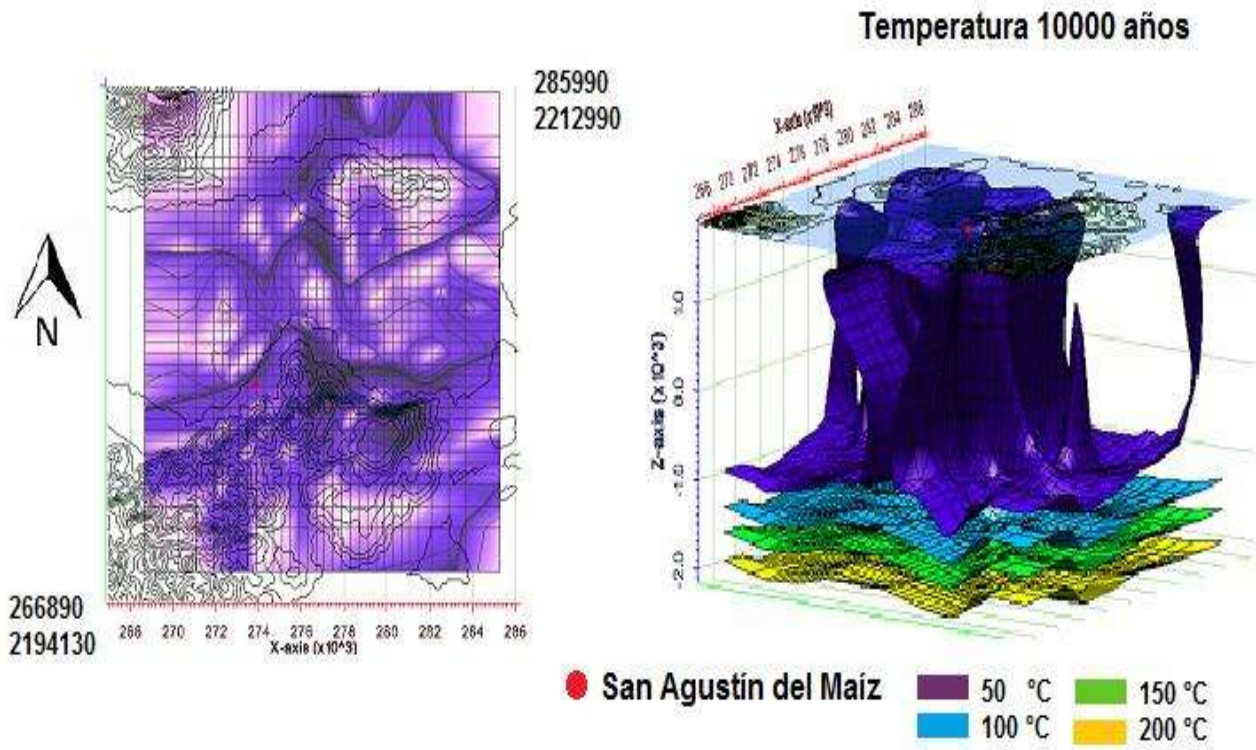


Fig. 27.- Diferentes vistas de la evolución de isotermas de temperatura en San Agustín del Maíz. Diez mil años. La imagen de la izquierda en vista Sur-Norte y la imagen de la derecha en vista oblicua.

Como se mencionó previamente, la modelación de una planta geotérmica se dividió en dos etapas. Inicialmente el pozo inyector y productor se localizaron dentro del Lago de Cuitzeo para hacer estimaciones del cambio de las condiciones de los acuíferos a partir de su funcionamiento y en una posición crítica para su establecimiento. Posteriormente se modeló el comportamiento de los pozos correspondientes pero en una zona en la que proponemos podría desarrollarse la planta geotérmica. Ambos modelos únicamente consideran 9 años de funcionamiento. Cabe señalar que los tiempos de modelación son parámetros que elige el usuario en los archivos de entrada para Tough2 por lo que trabajos futuros pueden simular tiempos mayores de funcionamiento.

Para modelar el funcionamiento de una planta geotérmica fue necesario hacer cambios en los parámetros de entrada para la modelación en Tough2. En lo que respecta a la presión, se bajaron 2 MPa de presión en el pozo productor y se subieron 2 MPa en el pozo de reinyección. El agua de reinyección se mantuvo a temperatura constante a 25°C y se estableció una producción constante de 26 kg/s (equiparable a la producción actual de la Planta Geotérmica de Los Azufres).

En la primera modelación del campo, los pozos de producción y reinyección se localizaron en los puntos 51714 (276090, 2204640) y 51114 (276090, 2207010) respectivamente. Ambos con la localidad de San Agustín del Maíz hacia el SE. Un motivo adicional para la elección de la posición de los pozos fue porque las principales plumas de temperatura que se observan en las gráficas de solución transiente se localizan dentro del Lago de Cuitzeo (incluso después de cuarenta mil años, Fig. 26).

El pozo inyector y productor se ubicaron aproximadamente a 500 m de profundidad. La primera capa de la superficie no es tomada en cuenta debido a la falta de datos de Presión y Temperatura lo que hace no sea tomada en cuenta. Los 500 m de profundidad corresponden a la 5ª capa en profundidad de la malla de modelación.

Las figuras 31-33 muestran los cambios de presión en el tiempo, de acuerdo a la condición inicial de 10 mil años. Como puede observarse las gráficas muestran los cambios por capa, esto se hizo con el objetivo de tener un control de la profundidad a la cual comienzan a tener cambios las condiciones iniciales de presión del yacimiento para poder así hacer predicciones de las posibles afectaciones a los acuíferos superficiales o al acuífero geotérmico de la región.

En lo que respecta al pozo de producción, la modelación después de 9 horas mostró una despresurización del campo principalmente en las capas 5 y 6 de la malla, aproximadamente a una profundidad de 500 a 600 m. Que vuelve a reducirse en la capa 7 y es despreciable en las capas a mayor profundidad. La mayor afectación a las condiciones iniciales de los acuíferos superficiales se presenta después de los primeros 9 meses de funcionamiento del pozo (Fig. 29), ya que la despresurización comienza desde la capa 3, aproximadamente a 300 m de profundidad. La despresurización continúa a profundidad hasta la capa 7.

Cabe señalar que el máximo cambio alrededor del pozo ronda apenas los 0.1 MPa (100000 Pa) y en el acuífero dentro del Lago aproximadamente los 0.02 MPa, que en realidad representan una fracción muy pequeña de presión. La presión del suministro de agua en una red de distribución urbana (Morelia) lleva una presión aproximada de 0.8 MPa (CONAGUA, 2009), lo cual permite hacer un comparativo del máximo valor de despresurización en los acuíferos.

Posterior a los 9 meses de funcionamiento, las condiciones de Presión en el campo alcanzan un tipo de estado estacionario, debido a que los cambios de Presión observados son equiparables a los observados en los primeros años simulados.

Cambio de Presión- 9 horas

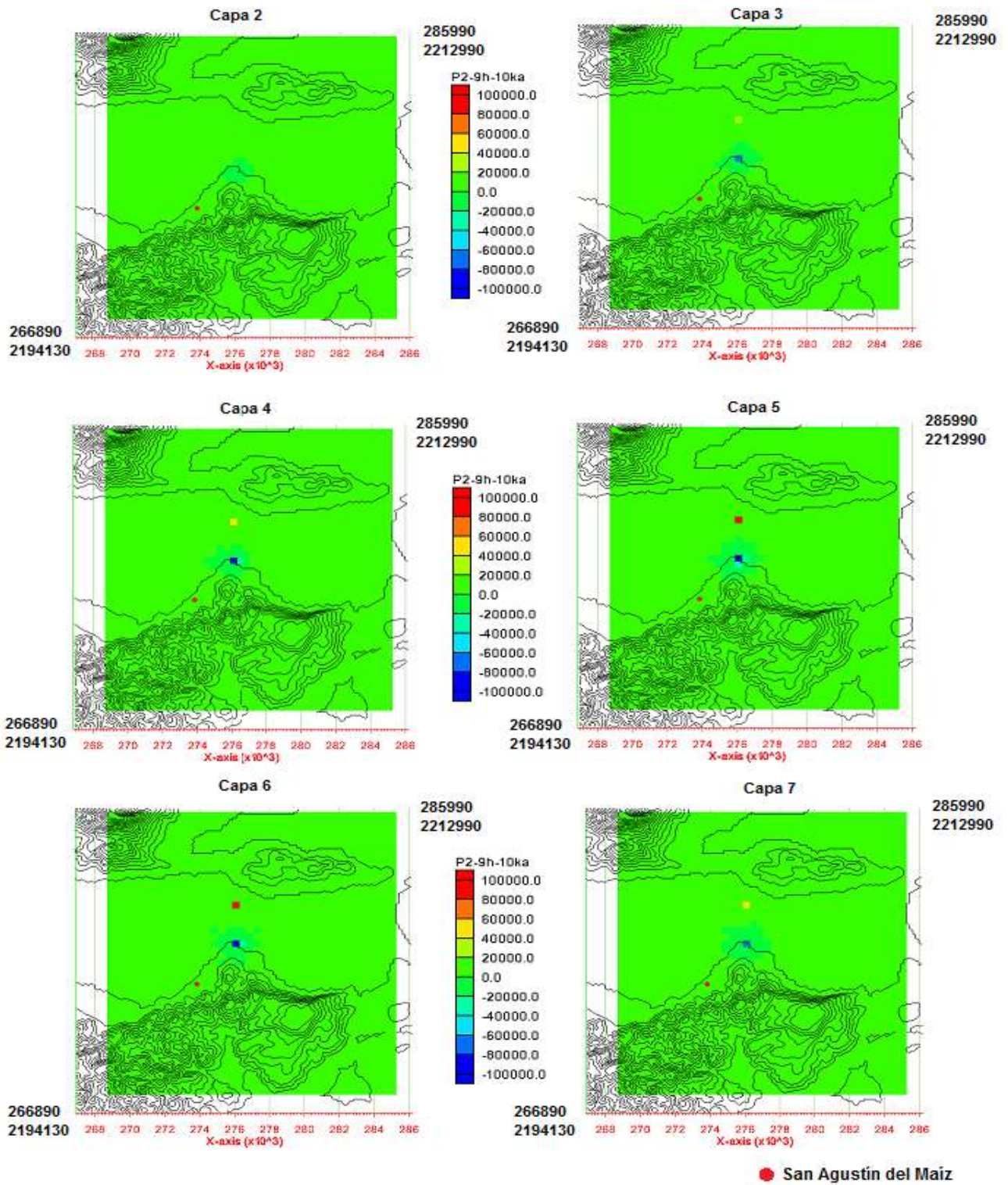


Fig. 28.- Cambio de presión 9 horas – 10 mil años en las diferentes capas de los pozos inyector y productor 1.

Cambio de Presión- 9 meses

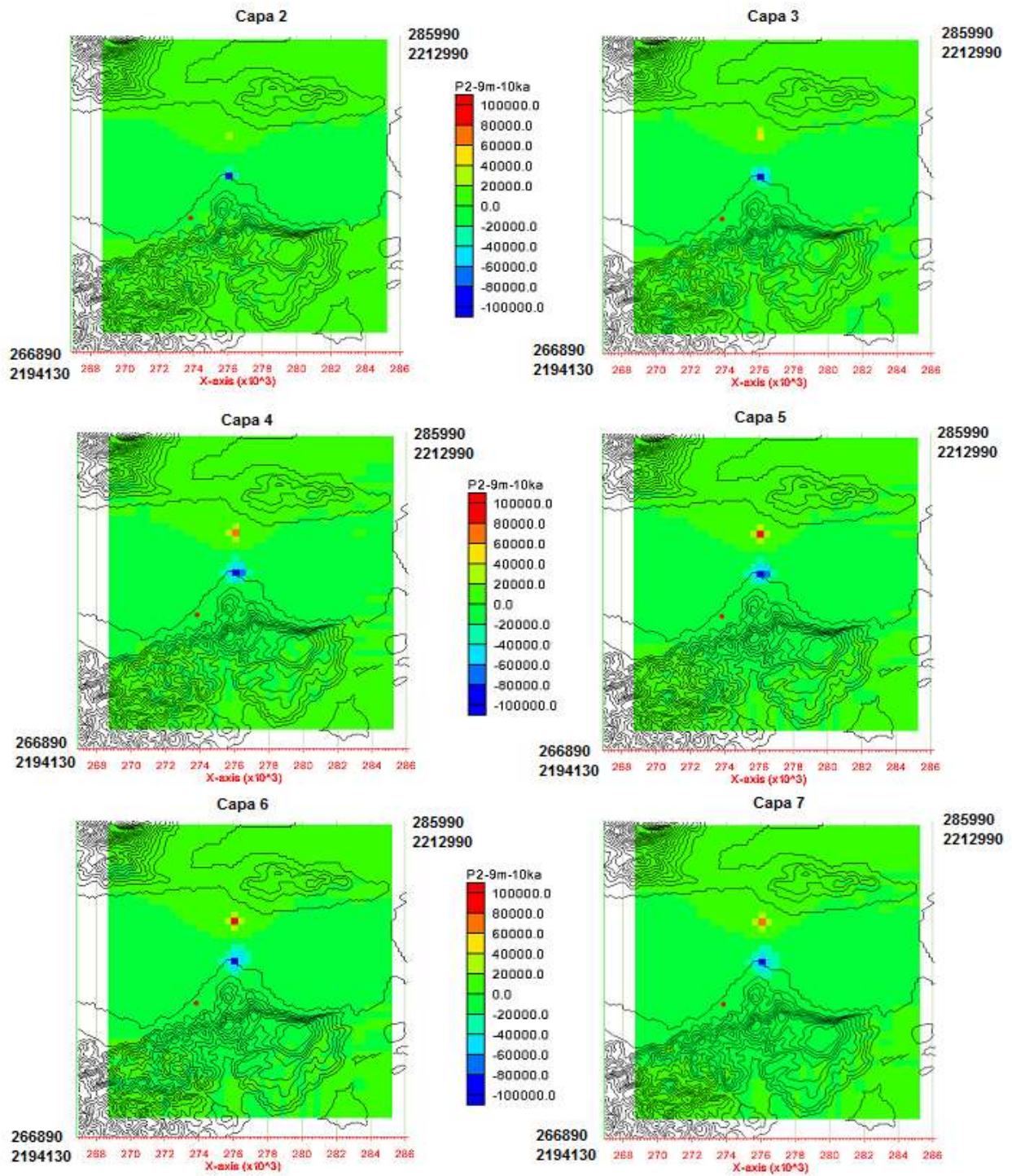


Fig. 29.- Cambio de presión 9 meses – 10 mil años en las diferentes capas de los pozos inyector y productor 1.

Cambio de Presión-9 años

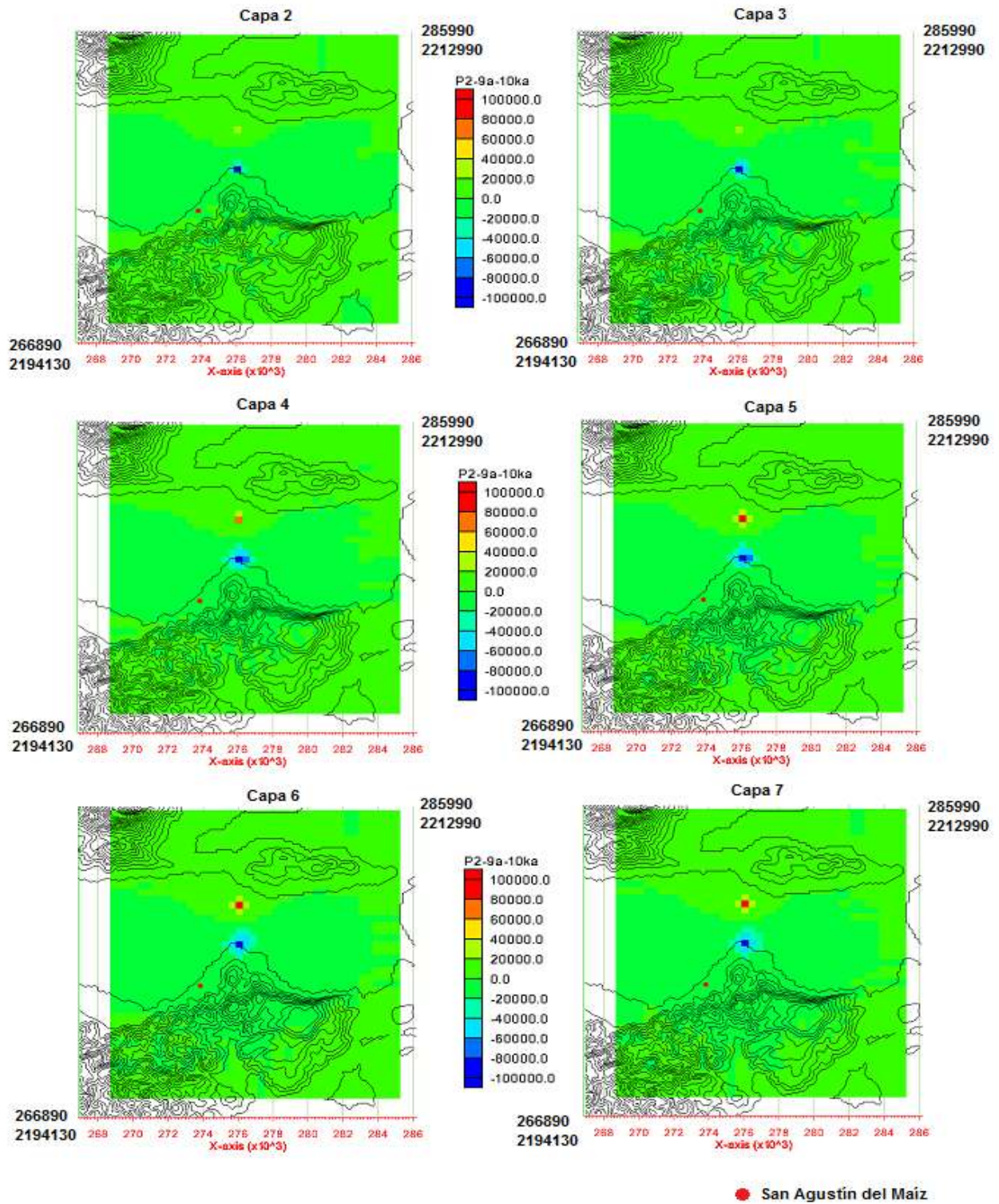


Fig. 30.- Cambio de presión 9 años – 10 mil años en las diferentes capas de los pozos inyector y productor 1.

En lo que respecta a la temperatura, el cambio ha sido despreciable. Se observa un enfriamiento en el pozo de reinyección debido a la temperatura a la que se hizo en el modelo (25°C), con un cambio máximo aproximado de 75°C alrededor de dicho pozo durante los 9 años de funcionamiento del campo en lo que podría ser el acuífero geotérmico a 500 m de profundidad. Los cambios de temperatura en las capas superiores son mínimos (Figs. 31-33).

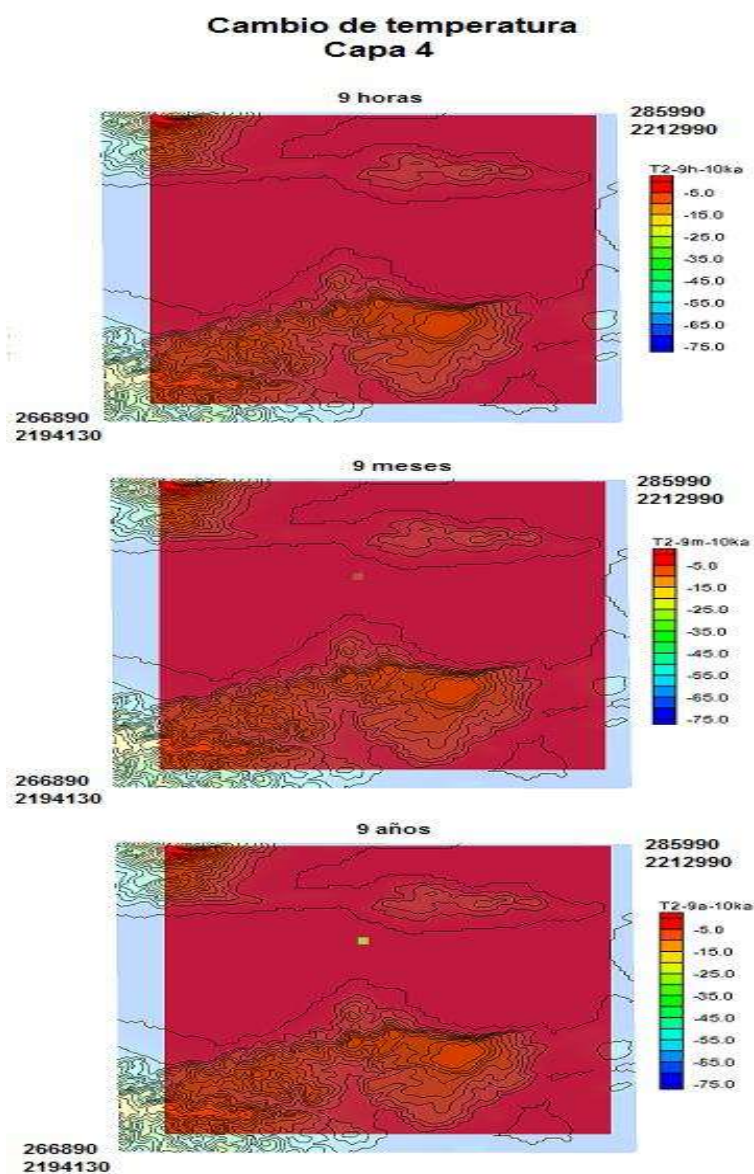


Fig. 31.- Cambio de temperatura en la capa 4 (400 m de profundidad).

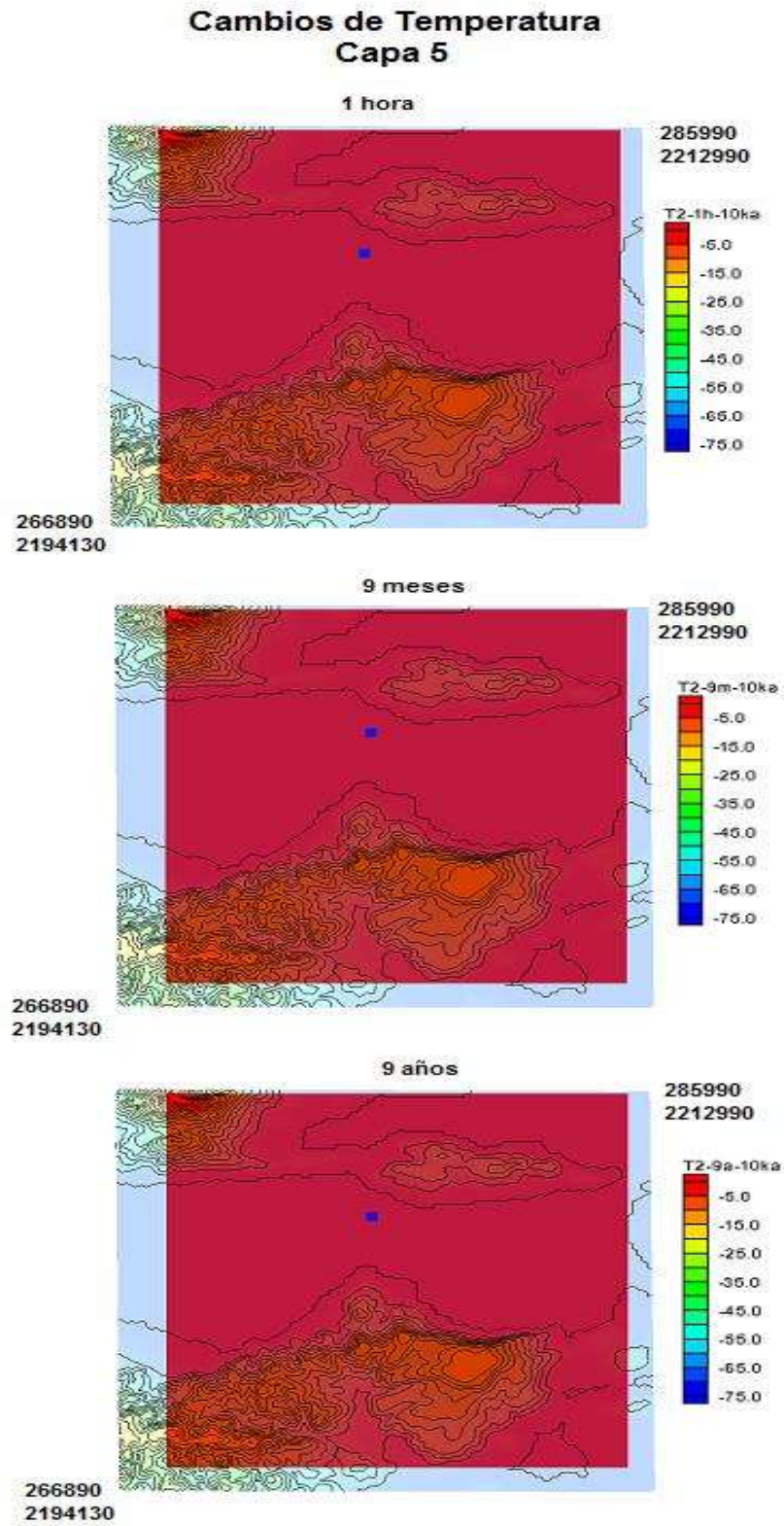


Fig. 32.- Cambio de temperatura en la capa 5 (500 m de profundidad).

Cambio de temperatura Capa 6

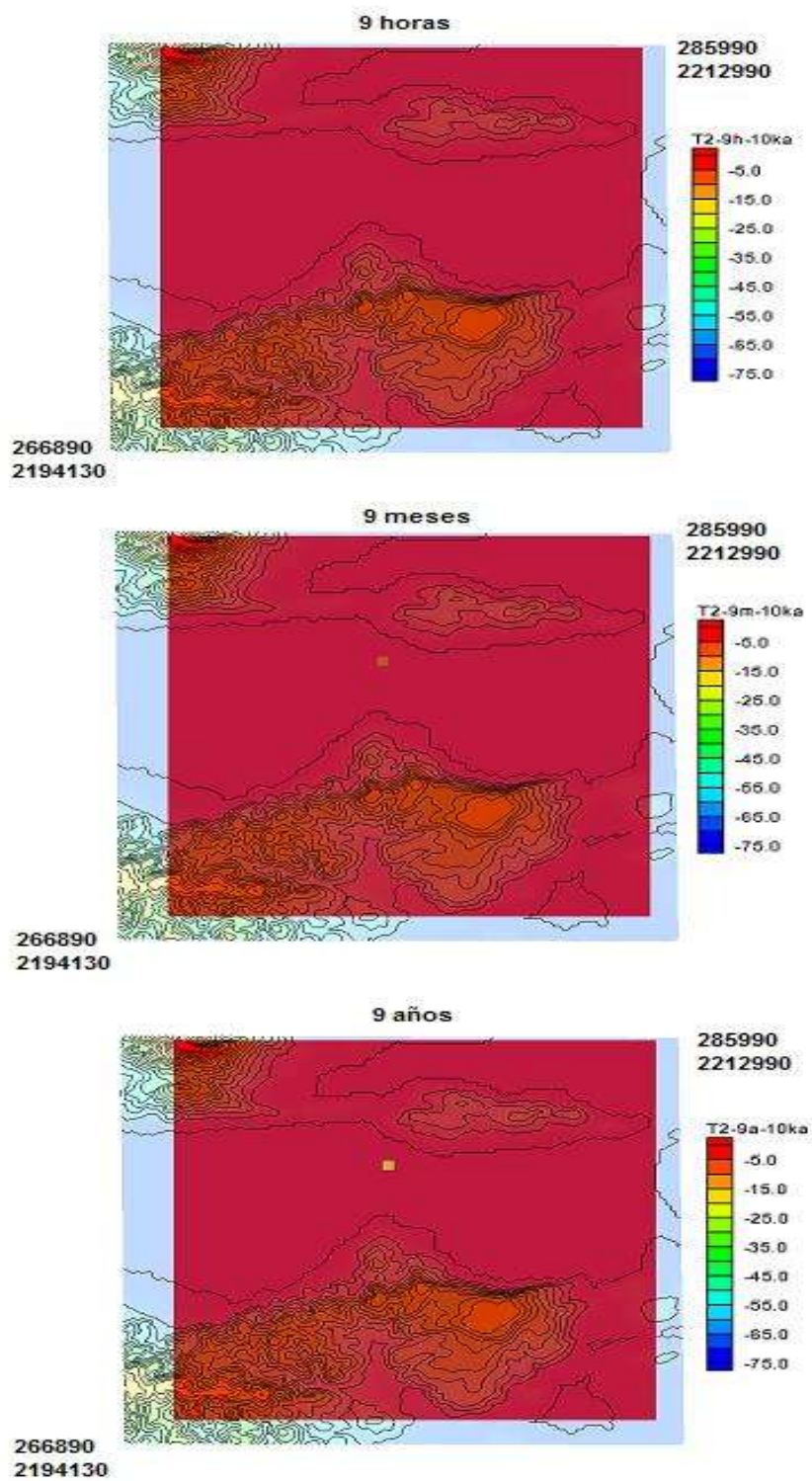


Fig. 33.- Cambio de temperatura en la capa 6 (600 m de profundidad).

Haciendo un analisis de los datos de flujo obtenidos en los pozos de inyección y producción (Tablas 13 y 14), se tiene un total de 9.6×10^6 Watt (de la suma de fluido obtenido en producción y reinyección), lo que corresponde a 9.6 MW, esto al extraer y reinyectar 26 kg/s de fluido.

De acuerdo con Sanchez Peña (2012), un hogar en una comunidad rural mexicana en el año 2008 gastó en promedio 1500 MJ por trimestre de energía eléctrica, de acuerdo con esto, la producción que se ha simulado en San Agustín podría dar electricidad a 23 casa habitación de la comunidad.

Tabla 13.- Datos de flujo en el pozo de producción simulación 1. Celda 51714.

Pozo de Producción 9 años				
Conexiones		Flujo correspondiente		
Elemento 1	Elemento 2	Flujo (W)	Flujo(NaCl) (kg/s)	Flujo (CO2) (kg/s)
41714	51714	-2023740	-5.258E-05	-5.258E-05
51714	61714	5976910	0.00014024	0.00014024
51713	51714	-598000	-1.538E-05	-1.538E-05
51714	51715	875382	2.0059E-05	2.0059E-05
51614	51714	-912478	-2.078E-05	-2.078E-05
51714	51814	494927	1.3651E-05	1.3651E-05
	Total	1.09E+07	2.63E-04	2.63E-04

Tabla 14.- Datos de flujo en el pozo de reinyección simulación 1. Celda 51114.

Pozo de reinyección a 9 años				
Conexiones		Flujos		
Elemento 1	Elemento 2	Flujo (W)	Flujo (NaCl) (kg/s)	Flujo (CO2) (kg/s)
41114	51114	631326	8.82E-05	8.8201E-05
51114	61114	-470626	-7.459E-05	-7.459E-05
51113	51114	54512.8	7.476E-06	7.4761E-06
51114	51115	-12883.3	-3.47E-06	-3.47E-06
51014	51114	66223.9	8.0486E-06	8.0487E-06
51114	51214	-47535.1	-7.062E-06	-7.062E-06
	Total	-1.28E+06	-1.89E-04	-1.89E-04

Para la segunda simulación se modificaron las posiciones de los pozos productor (274870, 2203470) e inyector (274830, 2205880) a las celdas 62011 y 61411 respectivamente. Además se aumento la profundidad de los pozos a 600 m. esta posición se eligio arbitrariamente considerando la cercania del pozo productor con las manifestaciones hidrotermales de San Agustín del Maíz, esto sin descuidar la colocación de dichos pozos fuera de la localidad antes señalada. Los resultados obtenidos presentaron una variación respecto a la observada en la primera simulación. El cambio de Presión y Temperatura en el tiempo alcanzan rapidamente un estado de equilibrio por lo que de manera automática el software no arroja resultados adicionales, es decir, la despresurización del campo presenta variaciones durante las primeras horas (Fig. 34) de la simulación transiente pero una vez transcurridos 8 dias (Figs. 35 y 36) alcanza un estado de equilibrio por lo que el cambio de Presion y Temperatura se considera despreciable (Tablas 15-18 y Figs. 37-40). Es importante señalar que a diferencia de la simulación anterior, los cambios de Presión observados en las zonas dentro del lago y en las capas más superficiales de los acuíferos son menores. La zona de despresurización disminuye considerablemente (Fig. 36).

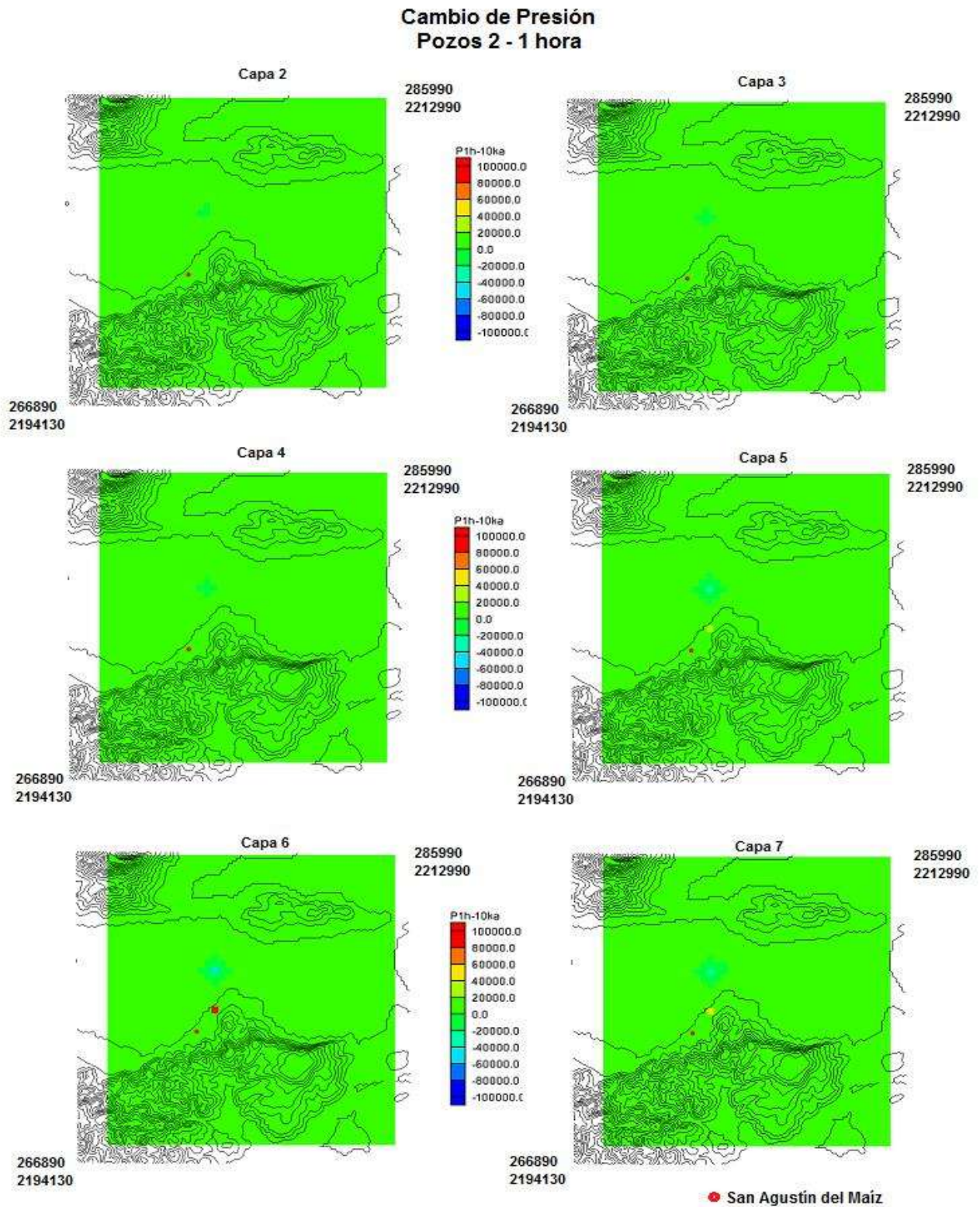


Fig. 34.- Cambio de presión 1 hora – 10 mil años en las diferentes capas de los pozos inyector y productor posición 2.

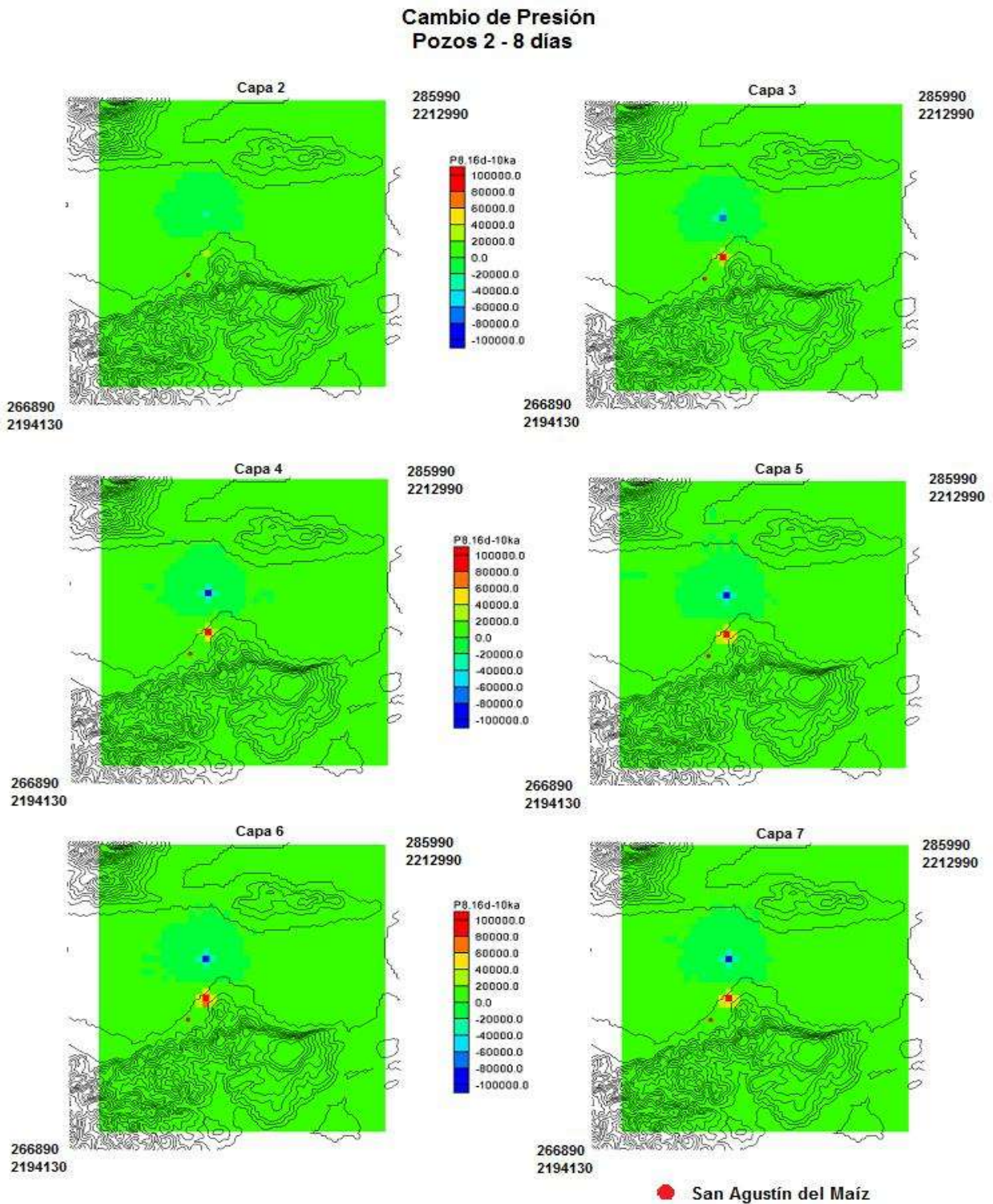


Fig. 35.- Cambio de presión 8 días – 10 mil años en las diferentes capas de los pozos inyector y productor posición 2.

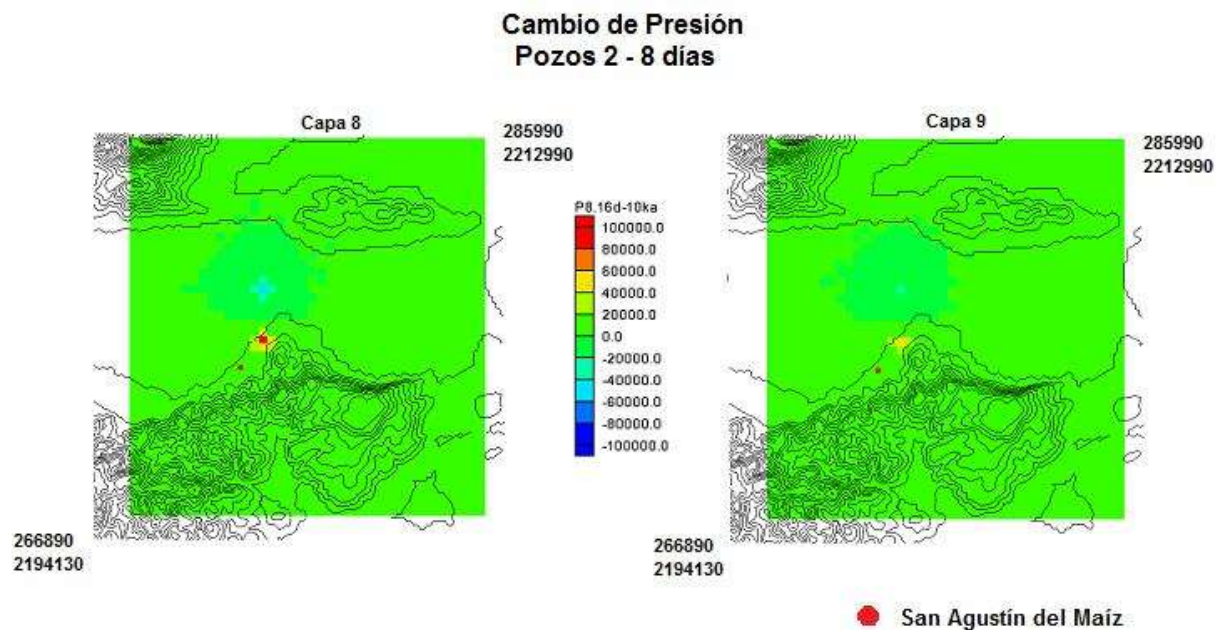


Fig. 36.- Cambio de presión 8 días – 10 mil años en las capas 8 (800 m de profundidad) y 9 (900 m de profundidad) de los pozos inyector y productor posición 2.

En lo que respecta a temperatura, al igual que en las simulaciones previas, el cambio es despreciable en el tiempo de simulación para la producción e inyección del fluido geotérmico (Figs. 38 y 40). Pese a que el rendimiento de generación de energía eléctrica es menor en la segunda simulación (Tablas 17 y 18), la localización de pozos presenta rápidamente una estabilidad del campo, que asemeja un estado estacionario para la presión y temperatura del yacimiento, lo cual indica que los cambios observados se mantienen constantes en el tiempo y que la afectación a los acuíferos superficial y geotérmico es considerablemente pequeña.

Realizando un análisis entre los datos de flujo después de 9 años de funcionamiento en ambos pozos (Tablas 15-18) se obtuvo un flujo de 7.8×10^6 Watt para la generación de energía eléctrica, lo que es equivalente a 3.9×10^5 MW, esto al extraer y reinyectar 26 kg/s de fluido,

lo cual podría generar energía eléctrica para aproximadamente 11 casas habitación o algunos locales comerciales.

Tabla 15.- Datos de flujo en celda de producción 61411. Condicion inicial a 10 mil años.

Condiciones iniciales en celda de producción 10 mil años				
Conexiones		Flujos		
Elemento 1	Elemento 2	Flujo (W)	Flujo (NaCl) (kg/s)	Flujo (CO2) (kg/s)
	Total	-3686.2	4.27E-10	4.46E-10
51411	61411	740052	1.6466E-05	1.6466E-05
61411	61412	55553.7	1.1612E-06	1.1612E-06
61411	61511	-27209.9	-5.897E-07	-5.897E-07
61411	71411	789415	1.753E-05	1.753E-05
61311	61411	15715.8	3.8019E-07	3.802E-07
61410	61411	58304.8	1.2558E-06	1.2558E-06

Tabla 16.- Datos de flujo en celda de reinyección 62011. Condicion inicial a 10 mil años.

Condiciones iniciales en celda de reinyección 10 mil años				
Conexiones		Flujos		
Elemento 1	Elemento 2	Flujo (W)	Flujo (NaCl) (kg/s)	Flujo (CO2) (kg/s)
	Total	7.40E+02	1.20E-11	7.00E-12
52011	62011	-1.42E+05	-1.20E-05	-1.20E-05
62011	62012	7.78E+03	7.41E-07	7.41E-07
62011	62111	1.26E+04	1.27E-06	1.27E-06
62011	72011	-1.59E+05	-1.28E-05	-1.28E-05
61911	62011	-1.36E+03	4.98E-07	4.98E-07
62010	62011	5.86E+03	6.62E-07	6.62E-07

Tabla 17.- Datos de Flujo en celda de producción 61411. Estado estacionario.

Celda de producción. Estado estacionario				
Conexiones		Flujos		
Elemento 1	Elemento 2	Flujo (W)	Flujo (NaCl) (kg/s)	Flujo (CO2) (kg/s)
	Total	-1.10E+07	-0.0002495	-0.0002495
51411	61411	-2.88E+06	-6.763E-05	-6.764E-05
61411	61412	8.09E+05	1.7417E-05	1.7417E-05
61411	61511	6.09E+05	1.4364E-05	1.4364E-05
61411	71411	5.43E+06	0.00012147	0.00012147
61410	61411	-5.18E+05	-1.297E-05	-1.297E-05
61311	61411	-7.10E+05	-1.56E-05	-1.56E-05

Tabla 18.- Datos de Flujo en celda de reinyección 62011. Estado estacionario.

Celda de inyección. Estado estacionario				
Conexiones		Flujos		
Elemento 1	Elemento 2	Flujo (W)	Flujo (NaCl) (kg/s)	Flujo (CO2) (kg/s)
	Total	3157692	0.00024822	0.00024823
52011	62011	1072400	8.376E-05	8.3761E-05
62011	62012	-172072	-1.343E-05	-1.343E-05
62011	62111	-161332	-1.255E-05	-1.255E-05
62011	72011	-1369720	-0.0001077	-0.0001077
61911	62011	190370	1.5531E-05	1.5531E-05
62010	62011	191798	1.524E-05	0.00001524

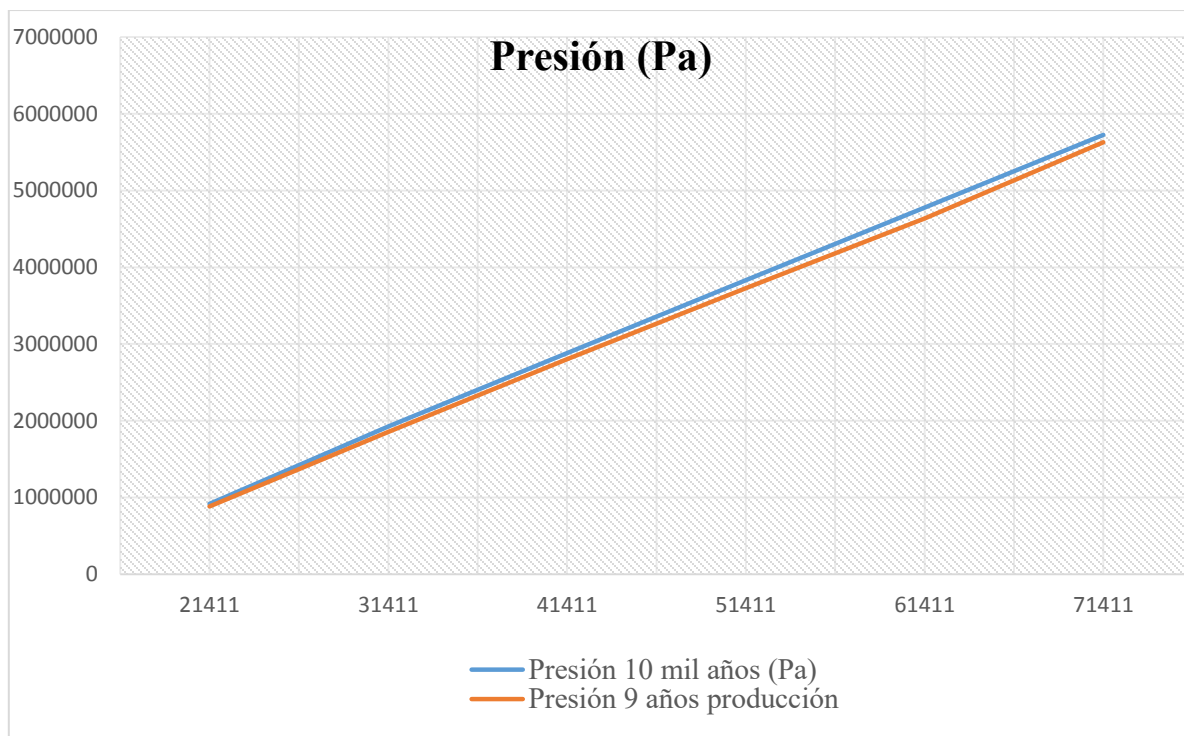


Fig. 37.- Comparativo de presión (Pa) en celda de producción. 9 años – 10 mil años.

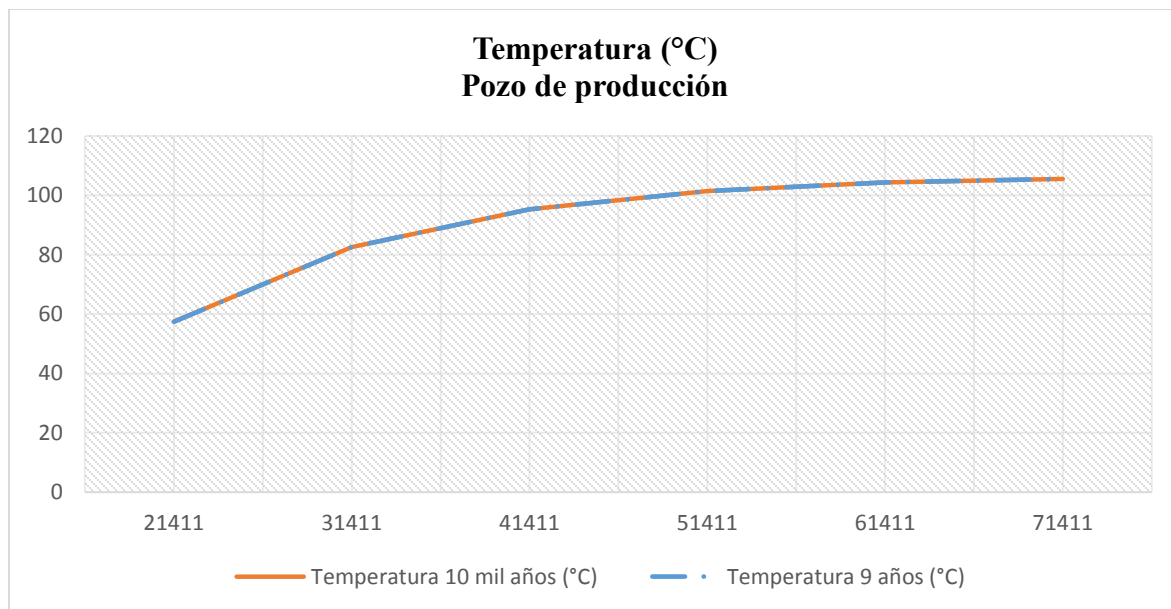


Fig. 38.- Comparativo de Temperatura (°C) en celda de producción. 9 años – 10 mil años.

En el pozo de reinyección se observa un aumento en la presión de los puntos involucrados en el pozo. Esto es normal al llevar a cabo la reinyección de fluido geotermico en el yacimiento (Fig. 39).

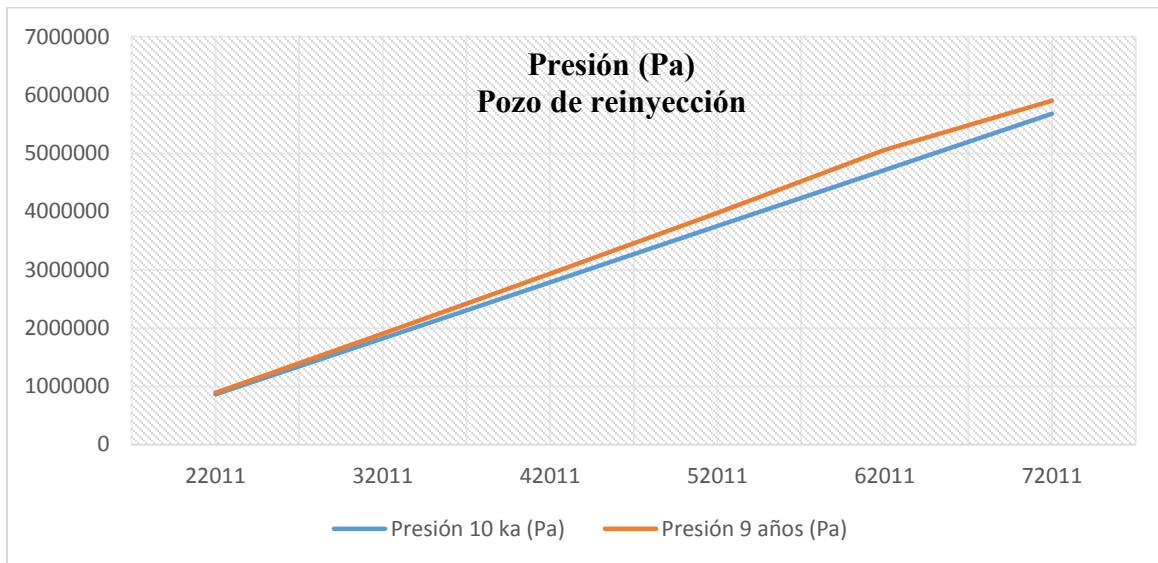


Fig. 39.- Comparativo de presión (Pa) en celda de reinyección. 9 años – 10 mil años.

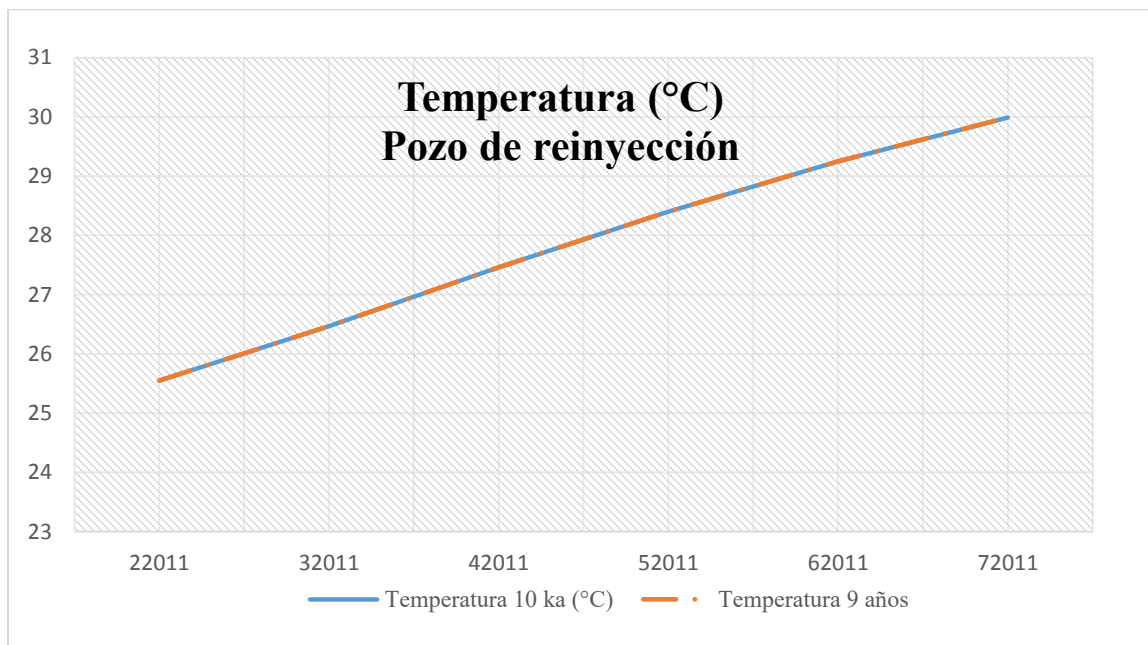


Fig. 40.- Comparativo de Temperatura (°C) en celda de reinyección. 9 años – 10 mil años.

Capítulo VII

Discusión

Para la elaboración del modelo numérico conceptual se utilizó una base de datos extensa conjuntando estudios geológico-geofísicos de alta confiabilidad para la región de San Agustín del Maíz por medio de la elaboración de perfiles estratigráficos en campo y un procesamiento computacional en el software GMS haciendo uso de su plataforma interna Modflow, para concluir con la elaboración de dos modelos conceptuales, uno regional y otro centrado en las manifestaciones hidrotermales observadas en el norte del estado de Michoacán. En dichos modelos se observó el potencial hidráulico de la zona y se realizó una caracterización del flujo preferencial de los acuíferos superficiales y geotérmicos.

Pese a la falta de una base de datos con las características físico-químicas del agua en dicha región, se realizó una interpretación de datos físicos en la bibliografía y una aproximación de acuerdo a las características de las rocas encontradas en campo, con base en eso se elaboró una simulación transiente de la ecuación general de flujo 3D llegando a la visualización del comportamiento del gradiente geotérmico transiente en las zonas aledañas a las manifestaciones hidrotermales localizadas en superficie que sirvió como base para la modelación de un campo geotérmico con un pozo reinector y un pozo productor en funcionamiento. Inicialmente en una zona de alta vulnerabilidad para los acuíferos y posteriormente para una zona en la que consideramos no afectaría su establecimiento.

Es necesario señalar que las diferentes simulaciones tuvieron deficiencias técnicas particulares y con ello quedaron aspectos que requieren refinación en trabajos de investigación posteriores. Los aspectos que deben ser considerados son los siguientes:

- Los datos de porosidad y permeabilidad de las rocas fueron extraídos de la bibliografía al no existir datos precisos de los materiales que se localizan a profundidad en el acuífero geotérmico de San Agustín del Maíz, esta aproximación podría ser causa de un error involuntario cuya cuantificación resulta imposible con los datos con los que se cuenta.
- Se utilizaron datos de precipitación y evaporación del año 2008. La falta de actualización en la base de datos para la elaboración del modelo conceptual podría ser otra causa posible de error en la solución que se propone en este trabajo de modelación.
- Para la simulación del campo geotérmico los datos de Salinidad y Dióxido de Carbono se mantuvieron constantes a lo largo de las simulaciones correspondientes y con valores relativamente bajos.

Con base en estas observaciones se presentan las siguientes recomendaciones para trabajos futuros en la modelación numérica del campo geotérmico de San Agustín del Maíz:

- En el modelo Morelia se analizaron parcialmente las condiciones actuales del acuífero en el municipio de Tarímbaro. El municipio ha sufrido grandes cambios en su uso de suelo y organización territorial en los últimos años y muy probablemente también sus acuíferos por la sobre explotación de agua en la región. En trabajos futuros, con una base de datos actualizada y con un objetivo de investigación diferente se podría hacer uso de GMS para hacer un modelo conceptual centrado en el

municipio con el objetivo de analizar el comportamiento de los conos de abatimiento regionales.

- Realizar un análisis de datos de recarga de los acuíferos en Copándaro, Cuitzeo y Tarímbaro y un inventario de puntos de agua subterránea actual es recomendado para trabajos de modelación futuros, así como el análisis o realización de pruebas de bombeo para rectificar potencial hidráulico en los acuíferos antes mencionados.
- Elaboración de un estudio isotópico de las aguas subterráneas en los acuíferos geotérmicos de la zona para cuantificar edad del agua y su caracterización química para corroborar la dirección de flujo en dirección al Lago de Cuitzeo.
- Se requiere una relación actualizada de parámetros físicos en el acuífero: permeabilidad vertical y horizontal, porosidad y espesores de cada capa de rocas en el acuífero.
- Rectificación de condiciones iniciales y de frontera para las diferentes mallas de modelación.
- Modelaciones con mayor cantidad de pozos de inyección y producción, así como en lapsos de tiempo más amplios.
- Modificación de las condiciones de Salinidad y Dióxido de Carbono en las condiciones iniciales de simulación del campo geotérmico.
- Una reestructuración metodológica de simulación para evitar pérdida de información o complicaciones en el manejo de datos de mallado por el uso de varias subrutinas computacionales por falta de compatibilidad directa entre GMS y Tough2.

Capítulo VIII

Conclusiones

La simulación del potencial hidráulico en el modelo Morelia permitió rectificar una recarga constante en el tiempo en dirección a los acuíferos geotérmicos con dirección Sur-Norte, lo cual sugiere que a profundidad existe un flujo constante del recurso hídrico y una recarga satisfactoria de los acuíferos superficial y geotérmico en las zonas donde se observan las manifestaciones hidrotermales en superficie. El flujo preferencial en los acuíferos es en dirección a la ribera S-SE del Lago de Cuitzeo, recibiendo contribuciones superficiales y subterráneas de la sierra de Mil cumbres y Sierra de San Andrés. De acuerdo a lo observado en los modelos conceptuales, todos los acuíferos en los municipios aledaños a Cuitzeo, tanto en Michoacán como en los márgenes sur del estado de Guanajuato realizan aportes al acuífero profundo en las zonas aledañas al Lago de Cuitzeo.

La simulación transiente centrada en el acuífero geotérmico de San Agustín del Maíz permitió observar que el flujo de calor en las zonas con manifestaciones hidrotermales identificadas en superficie se mantiene en el tiempo, incluso hasta 30 mil años posteriores a lo que se considera la condición actual del yacimiento geotérmico, garantizando fluidos a altas temperaturas en dichos acuíferos.

Con la posición de los sistemas de fallas, que de forma muy básica se establecieron en el modelo conceptual, suponemos que los sistemas de fallas regionales delimitan los acuíferos geotérmicos y muestran una posible correlación directa con el comportamiento del flujo de calor subterráneo y superficial en la zona. Sin embargo, la carencia de datos y de herramientas de cómputo para la correcta estructura de los sistemas de fallas en GMS imposibilitó una

interpretación detallada de la influencia de los sistemas de fallas E-O, NE-SO, NS de la región.

Si se pone en marcha una planta geotérmica, la localización de pozos de producción e inyección a 500-600 m de profundidad no representan un riesgo ambiental para los acuíferos de consumo humano ni para los acuíferos profundos. El cambio de presión es mínimo y tiende a estabilizarse en el tiempo. El mayor riesgo se presenta en las primeras horas de funcionamiento, posteriormente hay una tendencia hacia un estado estacionario de presión y temperatura lo cual, bajo los parámetros y condiciones de simulación, garantizan la factibilidad de desarrollar un campo de explotación de energía geotérmica en las zonas aledañas a San Agustín del Maíz. El flujo geotérmico y de recarga es idóneo además para dicho establecimiento.

El uso de los software GMS-Tough2 representa una aplicación novedosa en hidrogeología. Los alcances de dichos software representan una estructura de simulación sin precedentes. Resulta fundamental desarrollar simulaciones posteriores para verificar el comportamiento del campo geotérmico para pozos a mayor profundidad y observar si el flujo de producción-extracción garantiza mejores panoramas bajo dichas condiciones. De igual modo es de vital importancia rectificar parámetros físicos de los materiales en campo por medio de una perforación profunda para hacer un análisis que permita hacer una aproximación más eficiente del proceso de modelación numérica y llevar a cabo estudios técnicos de la compatibilidad entre ambos software para garantizar un uso más eficiente de dichas herramientas eliminando problemas de compatibilidad de la malla entre GMS y Tough2 y el uso de varias subrutinas entre ambos.

Bibliografía

- Alfaro R., Martínez V., Segovia N., Peña P., López M. B. E., Armienta M. A., Rangel J., Seidel J. L., 2002.** Radon Behavior in springs and Wells around Cuitzeo Lake, Lerma River basin, Mexico. *Geofísica Internacional*. Vol. 41, numero 004. Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 439-445.
- Amador A., Granados López E., Mendoza M., 2011.** Three approaches to the assessment of spatio-temporal distribution of the water balance: the case of the Cuitzeo basin, Michoacán Mexico. *Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. Universidad Nacional Autónoma de México. ISSN 0188-4611. Núm. 76, 2011, pp. 34-55.
- Anderson M. P., Woessner W., 1992.** Applied groundwater Modeling: Simulation of flow and advective transport. Editorial Academic Press. United Kingdom.
- Armas Vargas F. J., 2010.** Modelación y simulación hidrodinámica del sistema acuífero Zamora, en Michoacán México. Tesis de maestría en Cs. De la tierra. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Artinaid, 2013.** Arte en tecnología a tu servicio. Disponible en <http://www.artinaid.com/2013/04/tipos-de-acuiferos/>. Página consultada el 15 de mayo de 2015.
- Asociación Geotérmica Mexicana, AGM 2013.** *Recursos Geotérmicos*. Disponible en www.geotermia.org.mx. Página consultada el 3 de mayo de 2015.
- Avila Olivera J. A., Garduño Monroy V. H., 2007.** Análisis del abatimiento de los niveles freáticos del sistema acuífero de Morelia. *Ciencia Nicolaita* No. 43. Pp. 105-122. Morelia, Michoacán. México.
- Avila Villegas A. Y., 2013.** Modelado matemático y numérico de un domo de sal profundo con invasión de salmuera geotérmica en un reservorio de aceite del Golfo de México. Tesis de licenciatura. Facultad de ciencias Físico-matemáticas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Báez C., 2016.** Desarrollan software para optimizar generación de energía geotérmica. Disponible en: <http://conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/energia/5654-desarrollan-software-para-optimizar-la-generacion-de-energia-geotermica>. Página consultada el 13 de febrero de 2017.
- Bauer Ephrussi M., García Colín L., 2012.** *Energía en México, realidades y opiniones*. Publicaciones del programa universitario de energía, UNAM. México, 2012.
- Bear J., Beljin M. S., Ross R. R., 1992.** Fundamentals of Ground-water modeling. Environmental Protection Agency. United States.
- Borgia A., Cattaneo L., Marconi D., Delcroix C., Rossi E. L., Clemente G., Amoroso C. G., Lo Re F., Tozzato E., 2011.** Using a MODFLOW grid, generated with GMS, to solve a transport problem with TOUGH2 in complex geological environments: The intertidal deposits of the Venetian Lagoon. *Computers & Geosciences* 37 (2011). Pp. 783–790.
- Castañón Enrique, 2015.** Cromatografía de fluidos supercríticos; lidiando con la química. Disponible en <https://lidiadonlaquimica.wordpress.com/2015/08/17/cromatografia-de-fluidos-supercriticos/>. Página consultada el 23 de enero de 2017.

- Cedillo F., Silva R., Vargas H., 1981.** Estudio geohidrológico Los azufres-Cuitzeo, estado de Michoacán. Comisión Federal de Electricidad, gerencia de proyectos geotérmicos. México. Inédito.
- CONAGUA, 2009.** Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro, Estado de Michoacán. Comisión Nacional del Agua. México, DF. 2009.
- Congreso de la unión, 2014.** Ley de Aguas Nacionales. Disponible en http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/5784/1/ley_de_aguas_nacionales.pdf. Página consultada el 19 de enero de 2016.
- Congreso de la unión B, 2014.** Ley de Energía Geotérmica. Disponible en http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LEG_110814.pdf. Página consultada el 19 de enero de 2016.
- Correa González A., Sánchez Quispe S., Hernández M., 2012.** Modelación hidrológica distribuida incluyendo aspectos medioambientales. XXII congreso nacional de hidráulica Acapulco, Guerrero, México, noviembre 2012.
- DOE, 2013.** Departamento de Energía de los Estados Unidos. Disponible en <http://energy.gov/eere/articles/geothermal-energy-glance-back-and-leap-forward>.
- Falcón E., 2014.** Comienza actividades el centro mexicano de innovación en energía Geotérmica. Disponible en <http://todos.cicese.mx/sitio/noticia.php?n=369#>. VxUB6PI97IU. Página consultada el 18 de abril de 2016.
- Ferrari L., 2000.** Avances en el conocimiento de la faja volcánica transmexicana durante la última década. Boletín de la sociedad geológica mexicana. V. LIII, pp. 84-92.
- Fumagalli L., 2016.** Modelling the evolution of medium enthalpy geothermal system, the case of Cuitzeo lake, Michoacan, Mexico. Università degli Studi di Milano.
- Kruseman G. P. & Ridder N. A., 1994.** Analysis and Evaluation of pumping test data. Second edition. International institute for Land Reclamation and Improvement. 47th publication.
- García Gutiérrez A., 2015.** Usos y beneficios de la energía geotérmica. Disponible en: <http://www.geotermia.org.mx/geotermia/Seminario/4-Usos-AGG.pdf>, consultado el 8 de abril de 2016.
- Garduño-Monroy V. H., Arreygue-Rocha E., Israde-Alcántara I., Rodríguez-Torres G., 2001.** Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 18, núm. 1, 2001, p. 37-54.
- Garduño Monroy V. H., Giordano N., Avila Olivera J. A., Hernández Madrigal V. M., Sámano A. y Díaz J. E., 2014.** Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia, Michoacán, para una correcta planificación del territorio. Urbanización, sociedad y ambiente, experiencias en ciudades medias. CIGA-UNAM, INEC-SEMARNAT. Morelia, Michoacán.
- Garduño Monroy V. H., Jiménez Haro A., Samper A., Mazzoldi A., Guevara Aldoy J. A., Trujillo Hernandez N., Bernejo G., Olvera E., Rentería A. V., Maciel Rivera A., Gómez Cortes J. J., 2014.** Estudio de fracturamiento-fallamiento y campo de deformación actual, apoyados con sísmica y tomografía en los campos geotérmicos del sur de Cuitzeo-Michoacán, México. Proyecto estratégico. Centro de innovación en energía geotérmica. Inédito.

- Geotermia Online, 2016.** Sistemas geotérmicos mejorados. Disponible en: <http://geotermiaonline.com/sistemas-geotermicos-mejorados-egs/>. Página consultada el 2 de febrero de 2017.
- Gómez H., 2016.** Geomorfología aplicada. Ingenieros de caminos, canales y puertos. Universidad de Coruña España, campus Elviña. Disponible en http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/113/pdfs/TEMA%209-1%20geomorfologia.pdf. Página consultada el 12 de abril de 2016.
- Gómez Vasconcelos M. G., Garduño Monroy V. H., Israde Alcántara I., Macías J. L., Layer P. W., 2012.** Origen y evolución geológica de la cuenca del lago de Cuitzeo. Unión Geofísica Mexicana.
- González Castro R., Hernández Bedolla J., Domínguez Sánchez C., 2012.** Metodología para la determinación de la demanda agrícola futura con efecto de cambio climático. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, Guerrero, México.
- González E., González Ruiz L., 2015.** Generalidades de la energía geotérmica y su estado actual en México. GEOMINCO S. A. de C. V.
- Green Facts, 2013.** World Geothermal Energy. Disponible en: www.greenfacts.org/en/geothermalenergy/index.htm. Página consultada el 14 de enero de 2017.
- Hammons T. J., 2004.** Geothermal Power Generation Worldwide: Global Perspective, Technology, Field Experience, and Research and Development. Electric Power Components and Systems No. 32. Pp. 529–553, 2004.
- Hill, M. C., 1990.** Preconditioned conjugate-gradient 2 (PCG2), a computer program for solving groundwater flow equations. U. S. Geological Survey. Denver Colorado. Pp. 43.
- Hiriart Le Bert, 2011.** Evaluación de la Energía Geotérmica en México. Comisión Reguladora de Energía. Disponible en: www.cre.gob.mx/documento/2026.pdf. Página consultada el 16 de enero de 2017.
- Hoffmann K., Chiang S., 2000.** Computational Fluid Dynamics. Engineering Education System. Wichita Kansas, U.S.A.
- Israde I., Velázquez R., Lozano S., Bischoff J., Domínguez G., Garduño V. H., 2010.** Evolución paleolimnológica del lago de Cuitzeo, Michoacán durante el Pleistoceno-Holoceno. Boletín de la sociedad geológica mexicana. Vol. 62, núm. 3, 2010. Pp. 345-357.
- Klaus-Jürgen Bathe, 2007.** Finite Elements Procedure. Prentice Hall. Upper Saddle River New Jersey, U.S.A., Vol. 3.
- Lesser y asociados, 2000.** Seguimiento del estudio hidrogeológico y modelo matemático del Acuífero del valle de Cuitzeo, Gto. Comisión estatal del agua de Guanajuato, 2000.
- Llopis Trillo G., Angulo V. R., 2006.** Guía de la energía geotérmica. Dirección general de la industria, energía y minas. Consejería de economía y consumo. Comunidad de Madrid. Disponible en: <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-de-la-energia-geotermica.pdf>
- Luna Andrade M. A., 2011.** Aplicación de un modelo de flujo de agua subterránea a la

- Evaluación de la recarga del acuífero en el valle de León, Gto. Tesis de licenciatura en Ciencias Físico-Matemáticas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 2011.
- Medina L., Cabrera A., 2011.** Revisión del mapa de suelos de la cuenca del lago de Cuitzeo Michoacán, México. Secretaria del medio ambiente y recursos naturales.
- Medina Ortega P., 2010.** Modelación matemática del acuífero Ciudad Hidalgo – Tuxpan, Edo. Michoacán. Tesis de Licenciatura. Ingeniería en Geología. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Medina Vega V. H., 2008.** Estudio geológico, geofísico e hidrogeoquímica para generar un modelo conceptual del Acuífero de Cuitzeo, Michoacán, México. Tesis de maestría. Maestría en Geociencias y Planificación del territorio. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Molina, 2002.** Energía Geotérmica. Disponible en:
http://www.geociencias.unam.mx/~rmolina/Diplomado/yacimientos/yacimientos_8.html.
 Página consultada el 3 de febrero de 2017.
- Núñez, M. J. L., 2001.** Aplicación de los modelos matemáticos de flujo y transporte de contaminantes para el diseño de sistemas de remediación. Instituto Geológico y Minero de España.
- Olvera G. E., Nájera Blas S., Garduño Monroy V. H., 2016.** Revisión de los Escenarios Estructurales favorables para la ubicación de un sistema geotérmico y su aplicación a casos de estudio. Memorias del XXIII Congreso anual de la Asociación Geotérmica Mexicana. Morelia, Michoacán.
- Ordoñez Gálvez J. J., 2011.** Contribuyendo al desarrollo de una cultura del Agua y la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Sociedad geográfica de Lima Peru. 1ª edición. ISBN 978-9972-602-78-8. Pp. 7-17.
- Ortiz Rivera A., Mendoza Cantú M., Bravo Espinoza M., 2010.** Implementación del modelo hidrológico SWAT: modelación y simulación multitemporal de la variación de escurrimiento en la cuenca del lago de Cuitzeo. Tesis de Maestría en Geografía Ambiental. Centro de investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pearson, 2010.** Centrales de Energía Geotérmica. Disponible en:
<http://www.mailxmail.com/curso-centrales-energia-geotermica-1-2/energia-geotermica-tipos-yacimientos>.
 Página consultada el 2 de febrero de 2017.
- Pemex, 2014.** Reservas de hidrocarburos. Disponible en
http://www.pemex.com/ayuda/preguntas_frecuentes/Paginas/reservas_hidrocarburos.aspx,
 página consultada el 13 de febrero de 2017.
- Prado Rentería X., 2008.** Autogestión de un territorio subordinado: el manejo de agua en Tarímbaro, Michoacán. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo, 2008.
- Pruess K., Oldenburg C., Moridis G., 2012.** Tough2 User's guide, version 2. Earth Sciences Division. Lawrence Berkeley National Laboratory. University of California.
- Razo N., 2007.** Caracterización y posibles aplicaciones de los yacimientos de diatomitas de la región de Cuitzeo, Michoacán. Tesis de maestría. Geociencias y planificación del territorio. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 2007.

- Rodríguez Castro J. A., Silva Corona J. J., García Acevedo R., Ruiz Chavez R., 2012.** Contribuciones para el desarrollo sostenible de la cuenca del lago de Cuitzeo Michoacán: Disponibilidad de las aguas subterráneas en el valle Morelia-Queréndaro. Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Investigaciones en geografía ambiental. Pp. 25-32.
- Sánchez F. J., 2012.** Hidráulica subterránea; principios básicos. Universidad de Salamanca, España. Disponible en: http://ocw.usal.es/ciencias-experimentales/hidrologia/contenidos/09.Hidraulica_Subterranea.pdf. Página consultada el 6 de mayo de 2016.
- Santoyo-Gutiérrez E., Torres-Alvarado I., 2010.** Escenario Futuro de Explotación de la Energía Geotérmica: Hacia un desarrollo Sustentable. Revista Digital Universitaria. Volumen 11 Número 10 • ISSN: 1067-6079. Pp. 7-11.
- Segovia N., Barragán R. M., Tello Enrique, Alfaro R., Mena M., 2005.** Geochemical Characteristics and ^{222}Rn Measurements at Cuitzeo Basin (Mexico) Thermal Springs and Artesian Wells. Proceedings World Geothermal Congress. Antalya, Turkey. 2005.
- Silva C. J. J. & Steinich B., 2003.** Implicaciones de la geología estructural en el Sistema acuífero del valle Morelia-Queréndaro, Michoacán. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <http://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos01-3/GEOH01-3.pdf>.
- Tinoco J. A., 2005.** Modelo matemático del acuífero profundo del valle de México, usando diferencias finitas y superficies finitas integradas: Simulación numérica usando MODFLOW. Tesis de licenciatura en Ciencias Físico-Matemáticas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 2005.
- Trujillo-Hernández, 2017.** “Estudio geológico-estructural, geoquímico y mineralógico de las secuencias volcánicas de la porción suroeste del Lago de Cuitzeo, Michoacán., ligadas a la zona geotérmica de San Agustín del Maíz”. Tesis de Maestría. Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2017.
- Universia, 2011.** En 20 años México agotara sus reservas de Petróleo: UAM. Disponible en <http://noticias.universia.net.mx/en-portada/noticia/2011/01/20/782210/20-anos-mexico-agotara-reservas-petroleo-uam.html>. Página consultada el 13 de febrero de 2017.
- Vargas Ledezma, H., 1985.** Sinopsis de estudio Geohidrológico Los Azufres-Cuitzeo, Estado de Michoacán. Reporte GG 1/85. Comisión Federal de Electricidad, gerencia de proyectos Geotermoeléctricos, departamento de exploración. México. Inédito.
- Velez-Otalvaro M. V., 1999.** Hidráulica de aguas subterráneas. 2ª edición. Universidad Nacional de Colombia. Pp. 45-65.
- Velez-Otalvaro M. V., 2014.** Métodos para determinar la recarga en acuíferos. Universidad de Medellín Colombia. Disponible en <http://www.bdigital.unal.edu.co/4442/1/EA3760>. Página visitada el 14 de abril de 2016.

Anexo A:

Ejemplo de código de entrada para Tough2

Cuitzeo - IC

```

ROCKS----1----*----2----*----3----*----4----*----5----*----6----*----7----*----8
SEDIM  2   2400.   .30  1.E-23  1.E-23  3.E-10  3.20  1000.
          0.25
      1     0.01   0.01   1.    1.
      1     1.e5   0.009   1.
ANDES   2   2750.   .10  1.E-23  1.E-23  3.E-10  3.20  1000.
          0.25
      1     0.01   0.01   1.    1.
      1     1.e5   0.009   1.
TIGNI   2   2750.   .10  1.E-23  1.E-23  3.E-10  3.20  1000.
          0.25
      1     0.01   0.01   1.    1.
      1     1.e5   0.009   1.
OANDE   2   2750.   .05  1.E-23  1.E-23  3.E-10  3.20  1000.
          0.25
      1     0.01   0.05   1.    1.
      1     1.e5   0.009   1.
RSAND   2   2750.   .10  1.E-23  1.E-23  3.E-10  3.20  1000.
          0.25
      1     0.01   0.02   1.    1.
      1     1.e5   0.009   1.
MFLIS   2   2750.   .01  1.E-23  1.E-23  3.E-10  3.20  1000.
          0.25
      1     0.01   0.01   1.    1.
      1     1.e5   0.009   1.
GRANI   2   2750.   .005 1.E-23  1.E-23  3.E-10  3.20  1000.
          0.25
      1     0.01   0.01   1.    1.
      1     1.e5   0.009   1.
INTRU   2   2750.   .05  1.E-23  1.E-23  3.E-10  3.20  1000.
          0.25
      1     0.01   0.01   1.    1.
      1     1.e5   0.009   1.
FAULT   2   2750.   .10  1.E-23  1.E-23  3.E-10  3.20  1000.
          0.25
      1     0.01   0.01   1.    1.
      1     1.e5   0.009   1.

MULTI---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8

```

```

3 3 3 6
START---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
---*---1 MOP: 123456789*123456789*1234 ---*---5---*---6---*---7---*---8
PARAM---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
39999 9999100030000020000400023000
.31E20 -1. 0.3154E15 9.81
1.E+5
1.E-8 1.E-00
0.2105389420140E+08 0.00001000000000E+00 0.00001000000000E+00
0.15000000000000E+03

SOLVR---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
3 Z1 O0 4.0e-1 1.0e-7
SELEC...2...3...4...5...6...7...8...9...10...11...12...13...14...15...16
1 9
1.e0 .1 1.0 1.53 8.0 0.15e-5

ENDCY---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8

```

Anexo B:
Ejemplo de código de entrada para Tough2, simulación 2 de pozo
inyector y productor

Cuitzeo - Run

```
ROCKS-----1----*----2----*----3----*----4----*----5----*----6----*----7----*----8
SEDIM  2    2400.    .30  1.E-15  1.E-15  3.E-15  3.20  1000.
          0.25
      1      0.01    0.01    1.    1.
      1      1.e5    0.009    1.
ANDES  2    2750.    .10  6.E-14  6.E-14  6.E-14  3.20  1000.
          0.25
      1      0.01    0.01    1.    1.
      1      1.e5    0.009    1.
TIGNI  2    2750.    .10  3.E-14  3.E-14  3.E-14  3.20  1000.
          0.25
      1      0.01    0.01    1.    1.
      1      1.e5    0.009    1.
OANDE  2    2750.    .05  4.E-14  4.E-14  4.E-14  3.20  1000.
          0.25
      1      0.01    0.05    1.    1.
      1      1.e5    0.009    1.
RSAND  2    2750.    .10  2.E-15  2.E-15  2.E-15  3.20  1000.
          0.25
      1      0.01    0.02    1.    1.
      1      1.e5    0.009    1.
MFLIS  2    2750.    .01  1.E-16  1.E-16  1.E-16  3.20  1000.
          0.25
      1      0.01    0.01    1.    1.
      1      1.e5    0.009    1.

GRANI  2    2750.    .005  1.E-20  1.E-20  1.E-20  3.20  1000.
          0.25
      1      0.01    0.01    1.    1.
      1      1.e5    0.009    1.
INTRU  2    2750.    .05  1.E-14  1.E-14  1.E-14  3.20  1000.
          0.25
      1      0.01    0.01    1.    1.
      1      1.e5    0.009    1.
FAULT  2    2750.    .10  1.E-14  1.E-14  1.E-14  3.20  1000.
          0.25
      1      0.01    0.01    1.    1.
      1      1.e5    0.009    1.
```

```

MULTI---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
      3  4  3  6
START---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
---*---1 MOP: 123456789*123456789*1234 ---*---5---*---6---*---7---*---8
PARAM---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
      39999  9999100030000020000400023000
          3.2400E04   -1. 0.3600E04           9.81
          1.E+2      1.E-5  1.E-00
      0.2105389420140E+08  10.500000000000E+00  0.240000000000E+03
SOLVR---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
3 Z1  O0  4.0e-1  1.0e-7
SELEC....2....3....4....5....6....7....8....9...10...11...12...13...14...15...16
      1                      9
      1.e0      .1      1.0  1.53      8.0  0.15e-5
TIMES---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
      8  8
      3.6000E03 7.2000E03 1.0800E04 1.4400E04 1.8000E04 2.1600E04 2.5200E04 2.8800E04

GENER---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
61411PRD01           1  MASS      25.
62011INJ01           1  COM1      25.

ENDCY---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8

```