

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

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA  
EDICIÓN 2018



TEMA:

Modelo Hidrogeológico Superficial de un campo Geotérmico  
de El Salvador

PRESENTAN:

Metzi Elizabeth Rivera Domínguez

Ismael Ernesto Romero Romero

Queren Abigail Suriano Méndez

ASESOR:

Antonio Matus

Arturo Quezada

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE DE 2018

## Contenido

ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	3
RESUMEN.....	4
INTRODUCCIÓN.....	5
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
2 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	7
3 OBJETIVOS.....	8
3.1 Objetivo General.....	8
3.2 Objetivos Específicos.....	8
4 MARCO TEÓRICO.....	9
4.1 Geología.....	9
4.2 Hidrología.....	9
4.3 Hidrogeología.....	10
4.4 Geofísica.....	14
4.5 Conceptos complementarios.....	16
5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
5.1 Recopilación de la información.....	17
5.2 Procesamiento de la información.....	17
5.3 Análisis de datos.....	17
6 RESULTADOS.....	25
7 CONCLUSIONES.....	39
8 RECOMENDACIONES.....	40
9 AGRADECIMIENTOS.....	41
10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1 Ciclo Hidrológico (León, Montoya y Rivera, 2013) .....	10
Figura 5.1 Cuenca hidrográfica en estudio (límite resaltado en negro). .....	18
Figura 5.2 Localización de pozos geotérmicos en el área de estudio (resaltados en verde). .....	19
Figura 5.3 Localización de pozos domésticos y perforados en el área de estudio (resaltados en amarillo). .....	19
Figura 5.4 Leyenda utilizada en RockWorks® para litología .....	20
Figura 5.5 Localización de sondeos de TDEM en el área de estudio (resaltados en rojo). .....	21
Figura 6.1 Curvas de nivel del terreno y ubicación de puntos (Vista en 2 dimensiones). .....	28
Figura 6.2 Superficie grid del terreno (Vista en 3 dimensiones). .....	29
Figura 6.3 Modelo Litológico (Vista en 3 dimensiones). .....	29
Figura 6.4 Modelo Resistivo en 3D (ver escala de colores en tabla 6.1). .....	30
Figura 6.5 Modelo de Acuífero (Vista en 3 dimensiones). .....	30
Figura 6.6 Perfiles Sur - Norte de Modelo Resistivo y Acuífero, pasando por P-1 y P-10. ....	31
Figura 6.7 Perfiles Oeste – Este de Modelo Resistivo y Acuífero, pasando por P-10 .....	32
Figura 6.8 Perfil Oeste-Este de Modelo Resistivo .....	33
Figura 6.9 Perfiles Suroeste-Noreste de Modelo Resistivo y Acuífero, pasando por PD-33 y P-10 .....	34
Figura 6.10 Perfiles Sur - Norte de Modelo Resistivo y Acuífero, pasando por P-12 y P-10 .....	35
Figura 6.11 Perfiles Oeste – Este de Modelo Resistivo y Acuífero, pasando por P-1 .....	36
Figura 6.12 Perfil en zona Norte orientado Oeste-Este, incluyendo el PD-IJ.....	37
Figura 6.13 Variación de resistividades en profundidad (TDEM 25).....	38

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Rangos de resistividad aproximados para varios tipos de roca, minerales y agua en el área del basamento (adaptado de Telford et.al, 1976) .....	15
Tabla 5.1 Información recopilada .....	17
Tabla 5.2 Coordenadas sondeos TDEM .....	22
Tabla 6.1 Escala de colores para resistividad .....	25

## RESUMEN

El presente documento presenta el modelamiento hidrogeológico de un acuífero superficial ubicado a menos de 200 metros. Para ello fueron utilizados en el análisis datos de pozos existentes y resultados de sondeos TDEM (método electromagnético en el dominio del tiempo). Estos datos fueron procesados principalmente en el software RockWorks®, en el que se correlacionaron datos de litología, resistividad y pérdidas en zonas permeables, para obtener un modelo del acuífero en estudio.

Con el modelo calibrado fue posible determinar que el acuífero se extiende principalmente en la zona Oeste de la respectiva cuenca hidrográfica, mientras que en algunas partes zona Este es probable que no se encuentre. Además, se demostró que probablemente exista otro acuífero menos superficial, separado por una capa de arcilla impermeable del acuífero en estudio

**Palabras clave:** Acuífero, hidrogeología, geociencias, litología, modelo conceptual, software de modelación.

## **INTRODUCCIÓN**

El presente reporte contiene la investigación titulada “Modelo Hidrogeológico Superficial de un Campo Geotérmico de El Salvador”, que se ha desarrollado en el Marco del Diplomado en Geotermia para América Latina, Tercera Edición, 2018 con apoyo de UNU-GTP, NDF, ICEIDA, Universidad de El Salvador y Grupo CEL.

Se considera que los acuíferos en el subsuelo del campo geotérmico en estudio son de real importancia tanto para la población que habita en la zona como para otros actores que intervienen en el territorio, ya que existen acuíferos que son aprovechados para el abastecimiento de agua potable para las comunidades del área de estudio.

En este contexto se considera de especial relevancia, tanto teórica como práctica, el elaborar una propuesta metodológica que permita identificar y caracterizar acuíferos someros en un campo geotérmico, a través de la interpretación de diferentes datos hidrológicos y geofísicos, con el fin de localizarlos en profundidad e identificar sus características principales.

Los datos e información recabada en campo se clasifican en las distintas disciplinas como geología, hidrología y geofísica. Estos datos proporcionaron los suficientes elementos para interpretar las condiciones y características en las que se localiza los acuíferos someros, contribuyendo a un análisis más detallado de la zona en estudio.

Finalmente, los hallazgos obtenidos en esta investigación permiten ordenar una propuesta metodológica para identificar y caracterizar los acuíferos someros en zonas de campos geotérmicos, que puede implementarse en otros casos similares, y así contribuir a la comunidad académica y/o a la geotermia en general.

## 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un acuífero que se encuentra en el subsuelo de un campo geotérmico es de vital importancia en la zona, especialmente aquellos localizados superficialmente, pues son aprovechados para el abastecimiento del recurso hídrico hacia las poblaciones que circundan un determinado campo geotérmico, entre muchos otros usos.

Es reconocido que el agua es vital para los seres humanos, las plantas y los animales, así como para el desarrollo de la agricultura e industria de un país; es así que su escasez o abundancia determinan el potencial productivo de una región. Sin embargo, son los seres humanos quienes más inciden en la calidad y disponibilidad del agua, tanto superficial como subterránea, pues a medida que las poblaciones crecen, la necesidad de abastecimiento es mayor y al mismo tiempo la cantidad apta para el consumo disminuye (UICN, 2005).

Con base en lo anterior, se debe establecer la importancia del recurso hídrico, utilizándolo de forma sostenible, así como la importancia de realizar investigaciones hidrogeológicas, que permitan identificar, delimitar y caracterizar los recursos hídricos superficiales del país, principalmente en zonas con potencial de desarrollo industrial, entre las que se encuentran las de generación de energía geotermoeléctrica. Es de este modo que la investigación denominada “Modelo Hidrogeológico Superficial de un Campo Geotérmico de El Salvador”, con la información hidrogeológica que caracteriza un acuífero, persigue el modelamiento de dicho recurso con el fin que sea de utilidad para las instituciones gubernamentales relacionadas con el abastecimiento y monitoreo del recurso; así como constituir la base para investigaciones posteriores de interés en la zona bajo estudio o sus alrededores.

## 2 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Los mantos acuíferos suplen diferentes demandas que surgen como resultado de los usos del agua, tanto para consumo humano, abastecimiento doméstico, desarrollo turístico, desarrollo industrial, etc. Así, por ejemplo, el desarrollo de un campo geotérmico conlleva actividades las cuales requieren el uso de este vital líquido.

El disponer de un modelo lo más completo posible del recurso hídrico que representan los acuíferos, así como de sus propiedades y características, es de gran importancia para la empresa que realiza el desarrollo geotérmico, así como en general para el país, dado que permite tener una concepción hidrogeológica para la zona de estudio, y también para las instituciones encargadas de su administración en lo correspondiente a desarrollos futuros.

La disponibilidad del recurso hídrico subterráneo recobra relevancia, principalmente porque el agua subterránea representa una fracción importante de la masa de agua dulce presente en las masas continentales; misma que se encuentra almacenada en acuíferos ubicados a diferentes niveles de profundidad que, en función del desarrollo de cada zona en particular, podría llegarse a una sobreexplotación, en los casos donde no se puede tener el control correspondiente.

Con base en lo antes indicado se establece la necesidad de definir y caracterizar por medio de la determinación de un modelo hidrogeológico los acuíferos en un campo geotérmico, a fin de establecer bien sus características.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo General**

Elaborar el modelo hidrogeológico del acuífero superficial en el área de un campo geotérmico en El Salvador.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Analizar los datos de los pozos existentes en el área a evaluar (geología, permeabilidad, profundidad de estratos, etc.), así como los resultados de los estudios de geofísica realizados (TDEM) e información hidrogeológica de la zona.
- Introducir la información en los softwares QGIS® y RockWorks® a fin de modelar tanto en planta como en elevación, en superficie y profundidad, las diferentes características de la zona (cuencas, estratos, distribución de los diversos tipos de aguas, litologías, etc.).
- Definir las estructuras presentes en la zona bajo análisis (acuíferos, capas de suelo y rocas, entre otros), así como las características principales de dichas estructuras (permeabilidad, dimensiones, etc.) hasta 200 m de profundidad.
- Determinar la extensión (en planta y profundidad) y propiedades del acuífero superficial que existe en la zona evaluada.

## 4 MARCO TEÓRICO

Se presentan diferentes conceptos teóricos necesarios para entender el proceso de formación de un acuífero.

### 4.1 Geología

La Geología es una ciencia la cual tiene por objeto investigar la composición, estructura, origen y evolución de la tierra. Su estudio abarca el proceso de la formación de las montañas, las rocas, los minerales, los restos orgánicos fosilizados, etc.

**Litología**, es la parte de la geología que estudia las rocas, especialmente el tamaño de sus granos, y sus características físicas y químicas. Incluye también su composición, su textura, tipo de transporte, así como su composición mineralógica, distribución espacial y material cementante.

### 4.2 Hidrología

Hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos.

La hidrología superficial describe la relación entre las precipitaciones y el escurrimiento, que son de importancia para los diversos usos del agua, ya sea para uso doméstico, agricultura, generación de energía eléctrica, además en el control de inundaciones y drenajes rurales y urbanos. Esta describe la dinámica del flujo del agua en sistemas superficiales (ríos, canales, corrientes, lagos, etc.).

#### 4.2.1 Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico es el fenómeno de circulación global del agua producido fundamentalmente por la energía solar influenciado por las fuerzas de gravedad y la rotación de la Tierra. Este ciclo no tiene principio ni fin y sus diferentes procesos ocurren de forma continua. En la figura 4.1, se muestra esquemáticamente el ciclo hidrológico.

Los principales factores que afectan al ciclo del agua son los factores climáticos; la altura del territorio, el viento, la radiación solar controlando la temperatura y la presión que influyen en la humedad del aire.

El ciclo hidrológico comprende los siguientes procesos:

- **Precipitación**, es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, se define como la deposición de gotas de agua y partículas de hielo que se forman en la atmósfera y regresan a la superficie de la Tierra atraídas por la fuerza gravitacional.

- **Evaporación**, es el proceso por el cual el agua pasa de estado líquido a estado gaseoso, transfiriéndose a la atmósfera.
- **Transpiración**, es el resultado de la respiración de las plantas o paso del agua a través de las raíces hacia las hojas y la atmósfera.
- **Infiltración**, es un proceso por el cual el agua se transfiere desde la superficie del terreno hacia las profundidades, depende de la morfología y composición del terreno, y se puede dar de forma saturada o no saturada.
- **Evapotranspiración**, es la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación.
- **Escorrentamiento superficial**, es el flujo de agua de precipitación en la superficie del terreno por acción de la gravedad, desde las partes altas hacia las más bajas.
- **Escorrentamiento sub-superficial**, es la parte del agua de precipitación que se infiltra y escurre cerca de la superficie del suelo y más o menos paralelamente a él.
- **Escorrentamiento subterráneo**, es la otra parte del agua de precipitación que se infiltra hasta niveles inferiores al freático.

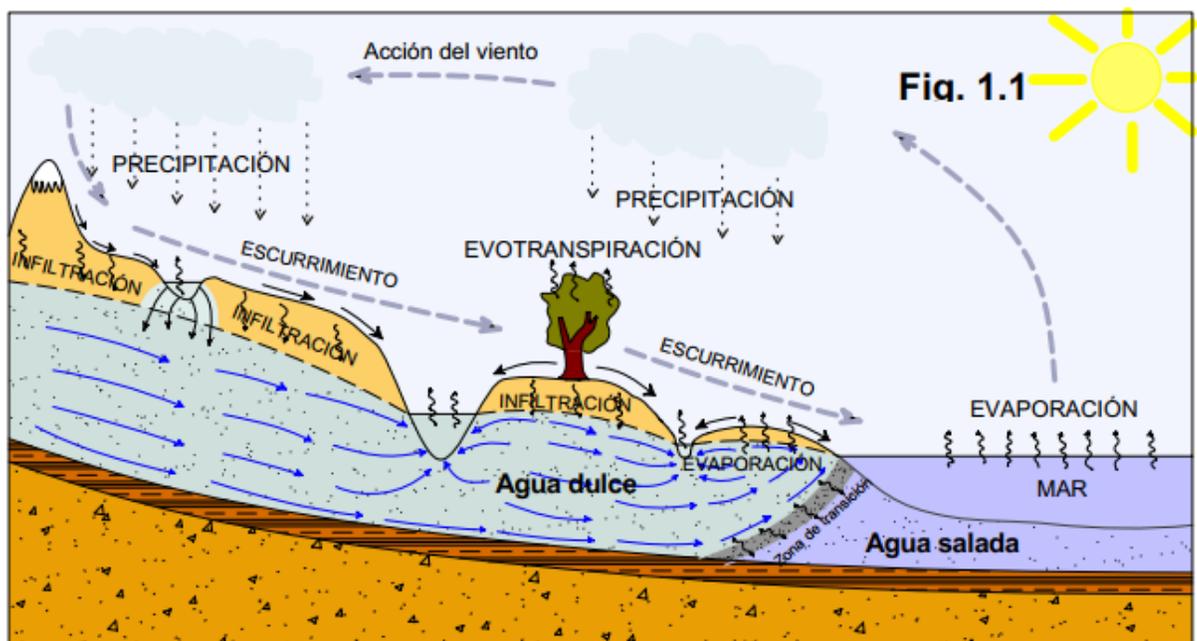


Figura 4.1 Ciclo Hidrológico (León, Montoya y Rivera, 2013)

### 4.3 Hidrogeología

La hidrogeología es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las

condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación.

#### 4.3.1 Acuífero

Las formaciones geológicas más importantes son:

- **Acuífero**, es el estrato o formación geológica que permite la circulación y almacenamiento del agua (gravas, arenas, rocas fracturadas, etc.) por sus poros o grietas, y hace que el hombre pueda aprovecharla para el subvenir a sus necesidades.
- **Acuitardo**, son formaciones capaces de almacenar agua en cantidades apreciables, pero la transmiten muy lentamente. Se suelen denominar formaciones semipermeables (limos, limos arenosos, arenas limosas etc.), sirven como elementos transmisores porque permiten una recarga vertical a través de grandes superficies.
- **Acuícludo**, son aquellas formaciones que pueden almacenar agua en grandes cantidades incluso hasta la saturación y no es posible transmitirla (arcillas, arcillas plásticas, arcillas limosas etc.). Estas formaciones drenan con mucha dificultad, por lo que no es posible su explotación.
- **Acuífugo**, son formaciones que no contienen agua ni la pueden transmitir, como por ejemplo un macizo granítico no alterado, o rocas metamórficas sin meteorización ni fracturación.

Los acuíferos según su textura se clasifican en:

- **Acuíferos Porosos**, son aquellos cuya permeabilidad es debida al espacio de huecos contenidos entre los granos y partículas que conforman la formación. Las características de circulación y almacenamiento del agua son favorecidas cuando los granos están constituidos con material poroso y granulometría homogénea, caso contrario cuando los huecos intergranulares están rellenos con materiales como la arcilla.
- **Acuíferos Fisurados**, son aquellos cuya circulación del agua se produce por grietas y fisuras que pueden ser de origen mecánico ó disolución, el flujo del agua puede ocurrir en distintas direcciones de acuerdo a la dirección de las grietas o fisuras.
- **Acuíferos Cársticos**, son aquellos cuya permeabilidad puede darse por la combinación de formaciones porosas y fisuradas.

Los acuíferos según su presión hidrostática son:

- **Acuíferos Libres o no confinados**, son aquellos en los cuales su superficie libre está en contacto directo con la presión atmosférica y el nivel del agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. El agua que ceden es la que tienen almacenada (de saturación) cuyo volumen es alto en comparación con los otros tipos de acuíferos.

- **Acuífero Colgado**, se da cuando el nivel de agua asciende y existe una formación impermeable con poca extensión lateral, el agua queda atrapada por encima de la capa impermeable formando el acuífero.
- **Acuíferos Cautivos o confinados**, son aquellos en los que el agua de los mismos está sometida a presiones superiores a la atmosférica y ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica que los contiene, saturándola totalmente, están aislados en el subsuelo por capas impermeables, la presión a la que está sometida el agua en su interior se debe al peso de las formaciones por encima al acuífero.
- **Acuíferos Semiconfinados**, son acuíferos similares a los confinados a diferencia de que pueden recibir o perder agua a través del techo y/o la base, debido a que las formaciones superior e inferior no son impermeables.

#### 4.3.2 Parámetros Hidrogeológicos Fundamentales

Los acuíferos poseen cierto funcionamiento y características o parámetros fundamentales que permiten definir o cuantificar su respuesta frente a las acciones exteriores como la recarga, extracciones, etc., y dichos parámetros son:

- **Porosidad**  
Es la relación entre el volumen de huecos (vacíos ocupados por aire y/o agua) y el volumen total de un material, depende de la constitución del material (forma, textura, disposición, distribución del tamaño de los granos que lo conforman y el grado de litificación), y según las características del fluido que se desplace por el material surgen dos tipos:
  - Porosidad total  
Se refiere al volumen total de poros, independientemente si están o no conectados entre sí, es decir; independientemente si el fluido que ocupa el material tiene la capacidad de circular entre ellos.
  - Porosidad eficaz  
Se refiere al volumen de poros conectados por donde el fluido pueda circular, por lo que depende de las características del material y el fluido que se transporta.
- **Permeabilidad**  
Es la capacidad de un material de permitir que el agua lo atraviese y se expresa en unidades de velocidad. La permeabilidad tiene una relación intrínseca con la porosidad efectiva ya que depende de los mismos factores, y puede estar asociada a las características del material y al fluido que escurre, por lo que surgen dos tipos:
  - Permeabilidad efectiva o conductividad hidráulica  
Depende de las características del material y el fluido que lo atraviesa. Es el caudal que es capaz de atravesar una sección unitaria del acuífero, normal al flujo, bajo un gradiente piezométrico unitario.
  - Permeabilidad intrínseca  
Depende de las características internas del medio permeable.

- **Coeficiente de almacenamiento**  
Es la capacidad de un acuífero para ceder el agua. Se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical de sección unitaria y altura igual a la del acuífero saturado, si se produce un descenso de 1 m del nivel piezométrico. Es un parámetro adimensional y alcanza distintos valores según el tipo de formación, en acuíferos libres desde 0.05 hasta 0.3 y en acuíferos confinados desde  $10^{-3}$  hasta  $10^{-5}$ .
- **Transmisividad**  
Es el producto de la conductividad hidráulica por el espesor del acuífero. Se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unitario y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unidad a una temperatura fija determinada. Este parámetro cuantifica la capacidad de un acuífero para transmitir agua, teniendo en cuenta las características del fluido y materiales que conforman el acuífero.

#### 4.3.3 Movimiento del Agua en los Acuíferos

Depende de las características que posee cada formación geológica; sin embargo, en el suelo y subsuelo se pueden diferenciar cuatro zonas principales:

- **Suelo**  
Zona caracterizada por su alta porosidad y materia orgánica, el movimiento del agua está relacionado con el fenómeno de evapotranspiración, depende de la precipitación y de la capacidad de las plantas para almacenar agua, al transcurrir la precipitación el agua que no es interceptada por las plantas circula por la superficie o desciende hacia la zona saturada. Existen presiones negativas debido a la absorción.
- **Zona no saturada**  
El movimiento del agua en ésta es descendente con un recorrido vertical, por efecto de la gravedad, además se da el efecto de aireación y filtrado, al igual que en el suelo pueden darse presiones negativas por efecto de absorción de la formación.
- **Zona capilar**  
La franja o zona capilar es la transición entre la zona no saturada y la zona saturada, en la parte superior posee características similares a la zona no saturada, aunque también puede ocasionar una disminución del flujo descendente por el aire atrapado, en su parte inferior el agua se mueve con características de la zona saturada.
- **Zona saturada**  
En la que los poros del acuífero están totalmente llenos de agua, moviéndose en puntos de mayor a menor energía, es decir; en zonas de mayor a menor nivel piezométrico, sin importar la situación en altura de la formación correspondiente, atendiendo a la energía en cada punto del espacio del acuífero.

#### **4.3.4 Superficie Piezométrica**

Es el lugar geométrico de los puntos que señalan la altura piezométrica de cada una de las porciones de un acuífero referidas a una determinada profundidad. Se les representa mediante líneas de igual altura piezométrica, a estas curvas se les llama isopiezas. Es importante diferenciarla de la superficie freática que es la que define el límite de saturación de un acuífero libre, y coincide con la superficie piezométrica correspondiente a los puntos situados en el límite de saturación.

Las superficies piezométricas de los acuíferos confinados son más elevadas que el techo de los mismos, excepto en las cercanías de captaciones que producen grandes descensos en los niveles de agua. Cuando existen flujos verticales hacen que la superficie piezométrica no sea única, por lo que deben trazarse perfiles verticales para complementar, lo habitual es que la superficie se pueda tomar como única.

#### **4.4 Geofísica**

La geofísica se define como la ciencia que estudia la tierra desde el punto de vista de la física. Estudia específicamente los fenómenos relacionados con la estructura, condiciones físicas e historia evolutiva de la Tierra. Principalmente, se considera una disciplina experimental, pues hace uso de métodos cuantitativos físicos como la física de reflexión y refracción de ondas mecánicas, así como métodos basados en la medida de la intensidad de la gravedad, campos electromagnéticos, magnéticos o eléctricos y de fenómenos radiactivos. Los métodos pueden clasificarse como naturales e inducidos, los primeros aprovechan campos o fenómenos naturales (gravedad, magnetismo terrestre, terremotos, entre otros) mientras que los inducidos son provocados por el hombre (campos eléctricos y fenómenos sísmicos)

##### **4.4.1 Aplicación en hidrogeología**

La prospección geofísica como parte de la investigación hidrogeológica, permite visualizar la geometría del acuífero fisurado, conocer las características del subsuelo: su naturaleza, su estructura y sus respectivos espesores. Es preciso mencionar que esta información se complementa con el estudio geológico e hidrogeológico de la zona en estudio

Para un estudio completo de la hidrogeología en una zona, en relación a la geofísica, resulta necesario hacer en primer lugar una caracterización a nivel regional y luego una caracterización local, es decir más específica dentro de la zona de estudio.

##### **4.4.2 Caracterización a nivel regional**

A nivel regional se aplica la geofísica aerotransportada y la geofísica superficial.

La geofísica aerotransportada resulta ser útil principalmente en área de rocas cristalinas con escasa presencia de obras civiles y su objetivo es detectar grandes lineamientos y estructuras, así como cuerpos conductores hace uso de los métodos

magnético y electromagnético, espectrometría de rayos gamma, y VLF de doble frecuencia

En lo que respecta a la geofísica superficial, esta se puede clasificar en cuatro métodos: sísmicos, gravimétricos, eléctricos y electromagnéticos. A continuación, se explica de forma breve cada uno de ellos:

- Métodos sísmicos: pueden ser de reflexión o refracción
  - Reflexión: proporciona información relacionada con los límites entre unidades litológicas, especialmente en medios sedimentarios. En el caso de rocas cristalinas, donde la cantidad de reflectores es escasa, permite cartografiar reflectores de bajo ángulo dentro del cuerpo rocoso.
  - Refracción: proporciona información de la transmisión de las ondas a través de las formaciones geológicas, por lo que pueden dar una mejor indicación de las propiedades físicas materiales de las rocas implicadas
- Método gravimétrico: evalúa las características del campo gravitatorio del planeta para poder describir el subsuelo en términos de densidad, profundidad y geometría de las rocas, esto es posible mediante el análisis de las anomalías gravimétricas. Los resultados del método gravimétrico usualmente se complementan con los resultados de los métodos sísmicos para definir de forma más completa el subsuelo en cuanto a geometría, geología y densidad
- Métodos eléctricos: consiste en la inyección de corriente eléctrica. Los más usados en hidrogeología son las calicatas eléctricas (CE) y los sondeos eléctricos verticales (SEV) electromagnéticos. Los métodos utilizan la evolución de la resistividad eléctrica a través de la profundidad para definir la composición y ubicación de los sedimentos y el agua subterránea
- Método electromagnético: El método más utilizado para caracterización de acuíferos es el TDEM (método electromagnético en el dominio del tiempo). Este método busca principalmente determinar cambios en la resistividad del subsuelo y a su vez asociar los valores obtenidos con valores típicos de resistividad para diferentes materiales, en la tabla 4.1 se presentan algunos de estos valores usuales

Tabla 4.1 Rangos de resistividad aproximados para varios tipos de roca, minerales y agua en el área del basamento (adaptado de Telford et.al, 1976)

Tipo de Roca	Resistividad ( $\Omega$ -m)
Arcilla y marga	1-67
Capa superficial del suelo	67-100
Suelo arcilloso	100-133
Suelo arenoso	670-1330
Caliza	67-1000
Arenisca	33-6700
Arena y grava	100-180
Esquisto	10-1,000

Tipo de Roca	Resistividad ( $\Omega$ -m)
Granito	25-1,500
Basalto	$10^3$ - $10^6$
Cuarcita	$10^2$ – $2 \times 10^8$
Agua superficial (en roca ígnea)	300-500
Agua de mar	0.20
Agua salina 3%	0.15
Agua salina 20%	0.05
Agua subterránea (en roca ígnea)	30-150

#### 4.4.3 Caracterización a nivel local

Una vez avanzados los estudios regionales se construye un modelo conceptual del área, y se decide con base a los resultados la zona más adecuada para la realización de sondeos mecánicos con el fin de afinar la precisión de las características hidrogeológicas, estructurales y litológicas a través de la testificación geofísica e hidráulica. A través de los sondeos se realizan registros, los cuales pueden clasificarse como eléctricos, radiométricos, acústicos, de media de flujo y de temperatura. Una vez procesados e interpretados los registros obtenidos, será posible realizar un modelo de flujo y transporte con un grado de incertidumbre aceptable para el sistema hidrogeológico en estudio.

### 4.5 Conceptos complementarios

#### 4.5.1 Pozo geotérmico

Los pozos geotérmicos se clasifican según su función, en productores y reinyectores. Los pozos productores tienen el propósito de extraer el vapor del reservorio, para posteriormente ser conducido a la turbina y generar electricidad. En cambio, los reinyectores, conducen el agua residual (salmuera) hacia el reservorio u otras zonas adecuadas para reinyección.

En el proceso de exploración de un campo geotérmico, los pozos que se perforan suelen conocerse como exploratorios, y puede ser someros o profundos, dependiendo de lo indicado por los estudios geocientíficos.

#### 4.5.2 Pozo doméstico

También conocido como pozo de agua, es una obra de captación vertical que permite la extracción del agua freática contenida en los intersticios o las fisuras de una roca del subsuelo (acuífero). El agua puede ser extraída de forma manual (recipiente) o con una bomba, manual o motorizada. Los pozos varían en profundidad en función de las características del subsuelo en la zona, además presentan variación en costo, volúmenes de agua disponible y calidad (pureza del agua). Es importante mencionar, que en este tipo de pozos resulta necesario controlar la calidad del agua periódicamente, sobre todo cuando será utilizada para consumo humano.

## 5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Para alcanzar los objetivos del presente trabajo se recopiló la información necesaria, la cual posteriormente fue procesada y analizada para la obtención de resultados adecuados. Se describen las fases planteadas en los apartados siguientes.

### 5.1 Recopilación de la información

Se gestionó la información necesaria para la ejecución del estudio, la cual fue proporcionada por la empresa concesionaria del campo geotérmico donde se localiza la zona de estudio, la cual se muestra en la tabla 5.1

*Tabla 5.1 Información recopilada*

<b>Información Recopilada</b>
a. Perfiles litológicos de pozos geotérmicos existentes; zonas de pérdidas
b. Resistividad de sondeos aplicando la técnica TDEM en la zona de estudio
c. Registros de perforación pozos superficiales de abastecimiento de agua potable
d. Información de coberturas (archivos formato shape, curvas de nivel).

### 5.2 Procesamiento de la información

Para realizar un procesamiento adecuado, la información debe interpretarse bajo criterios de correlación que simplifiquen o faciliten la integración de la información de cada uno de los componentes disponibles para la presente investigación. Para ello se utilizaron los softwares siguientes:

- ROCKWORKS®: Con el cual se elaboraron un modelo resistivo y un modelo litológico, con el objeto de obtener una mejor visualización de las capas que conforman en profundidad el subsuelo de la zona de estudio (perfiles) y verificar a partir de secciones la litoestratigrafía de pozos para abastecimiento y pozos geotérmicos.
- ARCGIS® y AUTOCAD® CIVIL 3D®: Empleados para la definición gráfica de la información disponible, así como la delimitación de la zona de estudio (cuenca hidrográfica), por medio de la información topográfica dada por las curvas de nivel.

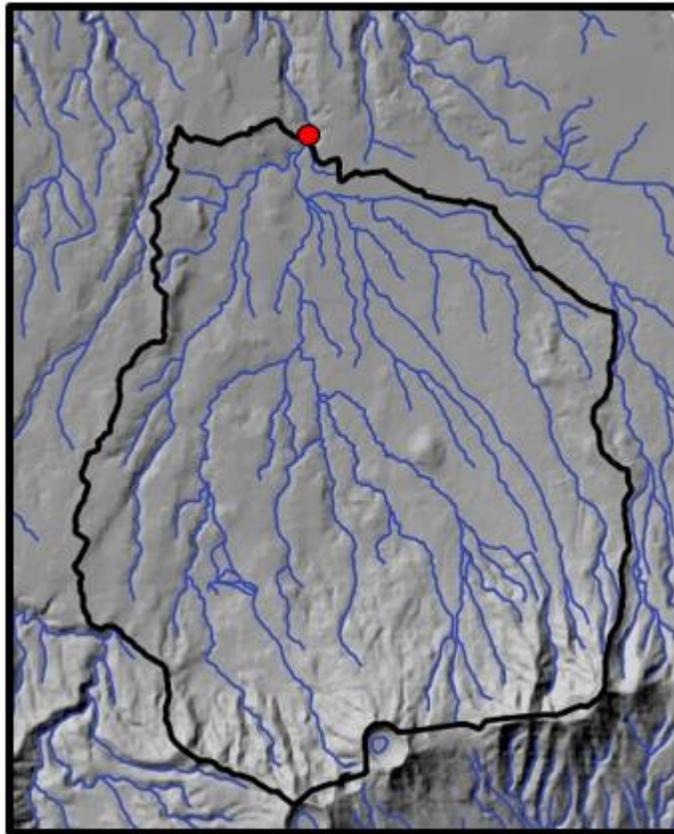
### 5.3 Análisis de datos

A partir de la información disponible para la presente investigación, el análisis se ha realizado con base en las áreas del conocimiento siguientes: hidrología, litología, geofísica y datos en pozos.

### 5.3.1 Hidrología

Dada la importancia de una delimitación del área de estudio desde una perspectiva de hidrología superficial, fue necesario incorporar la definición de la cuenca hidrográfica de la zona de estudio.

La zona de estudio se delimitará por la cuenca mostrada en la figura 5.1, donde se observan la topografía de la zona por medio de las curvas de nivel, así como los diversos ríos que se encuentran en la misma. A partir del comportamiento hidrológico, es posible indicar que los ríos que se empalman en el punto de interés (en rojo) son el Quiroz y el Escalante



*Figura 5.1 Cuenca hidrográfica en estudio (límite resaltado en negro).*

### 5.3.2 Litología

Para el presente estudio fue posible disponer de información sobre perfiles litológicos, tanto la correspondiente a pozos geotérmicos como de abastecimiento de agua potable (domésticos), dicha información fue empleada para el procesamiento y fue ingresada en el software RockWorks® para la generación del modelo. En la figura 5.2 y 5.3 se observan las ubicaciones de dichos pozos, respectivamente. Desafortunadamente no se cuenta con datos litológicos de pozos perforados en la zona de estudio.

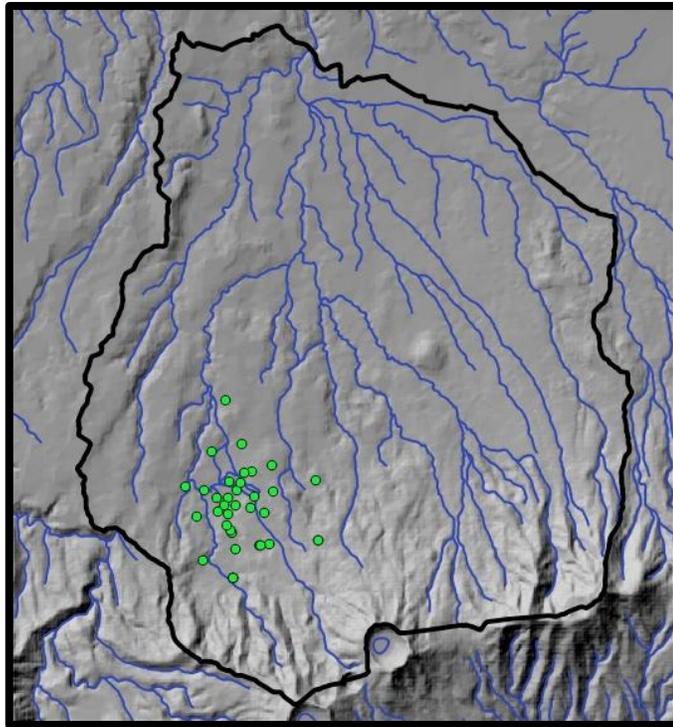


Figura 5.2 Localización de pozos geotérmicos en el área de estudio (resaltados en verde).

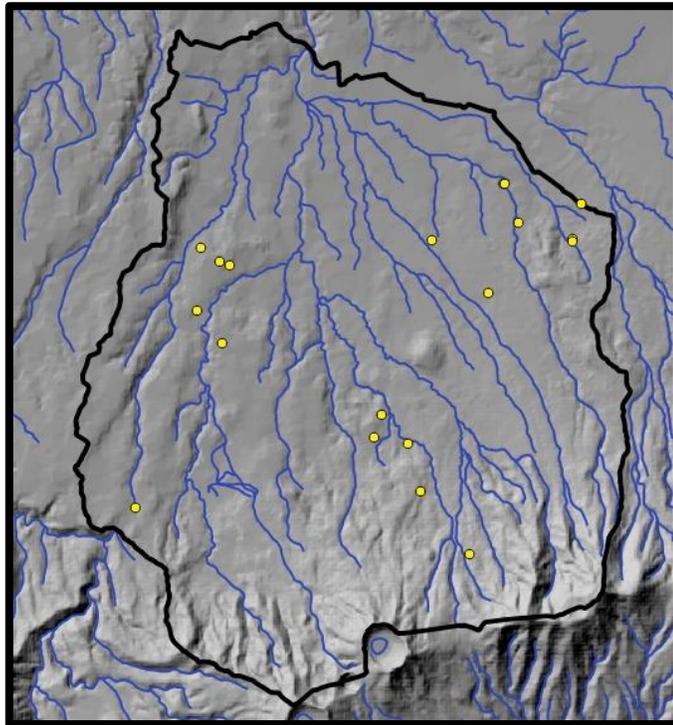


Figura 5.3 Localización de pozos domésticos y perforados en el área de estudio (resaltados en amarillo).

La litología de los perfiles analizados ha sido agrupada y/o simplificada como:

- a) Aglomerado
- b) Aluviales
- c) Eluviales
- d) Escoria
- e) Lava andesítica
- f) Lava basáltica
- g) Piroclastos
- h) Pómez
- i) Toba
- j) Toba lítica.

La correspondiente leyenda a cada unidad litológica se muestra en la Figura 5.4

Keyword	Pattern
Aglomerado	
Aluviales	
Eluviales	
Escoria	
Lava andesítica	
Lava basáltica	
Piroclastos	
Pomez	
Toba	
Toba litica	
Undefined	

Figura 5.4 Leyenda utilizada en RockWorks® para litología

A continuación, se enlistan los materiales que fueron agrupados en cada una de las clasificaciones:

- Aglomerado: Aglomerados jóvenes, medios o gruesos media y parcial alteración, pirita, SiO<sub>2</sub> y S, fragmentos gris blanquecinos o rojizos, densidad variable, pirita y sílice también variable.
- Aluviales: Aluviales como Lava y piroclastos.
- Eluviales: Eluviales y piroclastos, intensa alteración
- Escoria: Lava oxidada y escoria
- Lava andesítica: Lavas andesíticas parcialmente alteradas, intensamente alteradas, fracturadas media alteración intensa matriz, pirita sílice, calcita, brecha de falla andesita color gris. Depósitos de sílice y carbonatos. Flujo de lava andesítica basáltica.
- Lava basáltica: Lava basáltica andesítica fracturada, fresca, sana y flujo de lava basáltica. Con permeabilidad secundaria. Con alta alteración hidrotermal minerales de arcilla, carbonatos y pirita.

- Piroclastos: Piroclastos y lavas, finos y escoria, material piroclástico con bloques de lava alterada, pirita, carbonatos. Incremento de alteración hidrotermal.
- Pómez: Pómez
- Toba: Toba café y bloques de lavas, tobas aglomeraticas y fragmentos de lava andesítica media a intensa alteración y toba fina.
- Toba lítica: Toba lítica.

### 5.3.3 Geofísica

Los sondeos de resistividad eléctrica aplicando el Método Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TDEM) utilizados, fueron distribuidos al interior del área en estudio y permiten disponer en general información de la zona de interés, tal como se muestra en la Figura 5.5 y Tabla 5.2

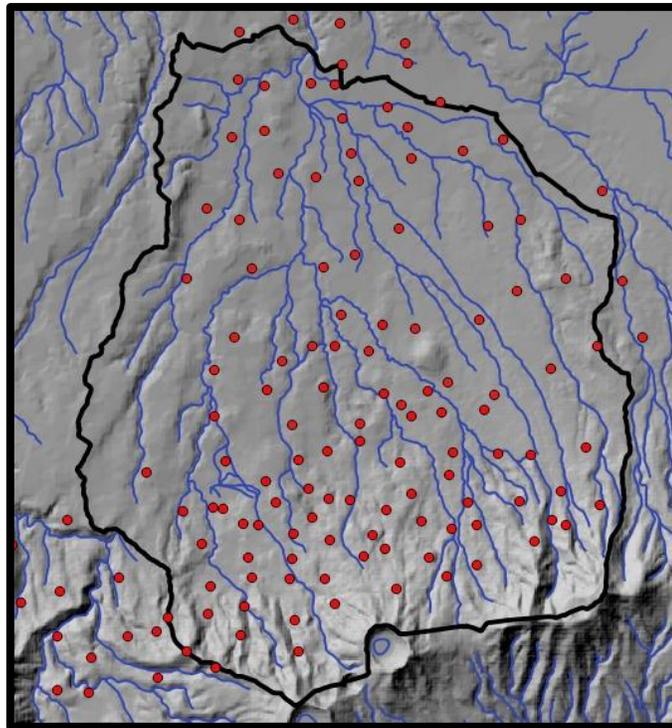


Figura 5.5 Localización de sondeos de TDEM en el área de estudio (resaltados en rojo).

Tabla 5.2 Coordenadas sondeos TDEM

Sondeo	X	Y
R-01	411205	310381
R-03	411568	309763
R-04	412643	310114
R-04b	412353	310134
R-05	412446	309491
R-06	412363	308584
R-07	414085	308616
R-08	413890	309095
R-09	414780	309927
R-10	414617	309523
R-11	415236	308916
R-12	415711	310180
R-13	416285	310049
R-14	416196	309154
R-15	416766	309349
R-16	416764	310109
R-17	417855	309819
R-18	418433	310111
R-18b	418172	310201
R-19	419071	310490
R-20	418824	311574
R-21	418342	310756
R-22	417784	311446
R-23	417150	311470
R-24	416892	312305
R-25	416081	312256
R-26	415514	312180
R-27	415319	311298
R-28	414547	311713
R-29	414373	310581
R-30	416585	310554
R-31	413924	311508
R-32	413393	311360

Sondeo	X	Y
R-33	413323	308314
R-34	411681	308443
R-35	412005	311323
R-36	410518	311103
R-37	411741	308964
R-38	413586	310809
R-39	416315	311499
R-40	417557	310568
R-41	411962	310415
R-41b	411772	310446
R-42	413236	309088
R-43	415527	310706
R-44	415865	309503
R-45	415017	309663
R-46	413280	309474
R-47	413304	309947
R-48	413640	310250
R-49	413969	310623
R-50	415058	310391
R-51	412506	309122
R-52	412770	310946
R-53	413978	309829
R-54	412308	308036
R-55	416244	311056
R-56	410921	308369
R-57	413402	307725
R-58	412958	310538
mt01	411804	312173
mt02	412791	312677
mt03	413872	312716
mt04	414974	313915
mt15	411275	307715
mt21	414074	313493

Sondeo	X	Y
mt22	415011	312601
mt23	415823	312662
TDEM07	413631	318486
TDEM08	412244	318561
TDEM09	412145	317455
TDEM10	412751	317579
TDEM11	414211	317820
TDEM12	415067	318029
TDEM14	417253	317423
TDEM15	416505	317189
TDEM16	415532	317057
TDEM17	414516	316639
TDEM18	413730	316706
TDEM19	412271	315900
TDEM20	411654	316105
TDEM21	411280	314781
TDEM22	412520	314968
TDEM23	413871	314991
TDEM24	414445	315229
TDEM25	415284	315739
TDEM26	416971	315789
TDEM27	417593	315888

Sondeo	X	Y
TDEM30	418436	314776
TDEM31	417502	314558
TDEM32	416803	314013
TDEM33	415584	313836
TDEM34	414709	313406
TDEM35	413647	313498
TDEM36	413076	313230
TDEM37	411812	313049
TDEM38	412180	313681
TDEM40	419020	313499
TDEM41	418148	313081
TDEM42	417090	312574
TDEM43	416208	312823
TDEM44	415333	312380
TDEM45	414543	312035
TDEM46	413276	312000
TDEM47	413016	316782
TDEM48	414386	317159
TDEM50	414087	318450
TDEM51	415456	317644
TDEM52	412754	318427
TDEM53	414201	314096

En la Figura 5.5, se observa la localización de 69 puntos de sondeos TDEM, los cuales, a través de su procesamiento, permiten conocer las diversas capas que definen en profundidad la variación de resistividad. La información geofísica fue procesada en el software RockWorks®, a partir de lo cual es posible definir las características y definición de la profundidad de acuíferos presentes. Para la identificación de acuíferos se ha asociado a ellos el rango preliminar de resistividades entre valores de 30 y 40  $\Omega$  -m, sin embargo, dicho rango será calibrado al correlacionar datos de pérdidas en pozos asociadas con zonas permeables junto con los valores correspondientes de resistividades. Además, se correlacionarán las zonas permeables verificadas en los pozos perforados en estudio junto con las respectivas resistividades. Por lo tanto, este rango preliminar puede modificarse al analizar los datos antes mencionados. En la siguiente sección se amplía más el método a seguir tomando en cuenta datos de pérdidas en pozos, así como los datos de niveles freáticos en pozos perforados.

#### 5.3.4 Datos de pozos

Como se mencionó anteriormente en el presente trabajo de investigación, fue posible obtener datos relevantes de pozos geotérmicos y domésticos respecto a litología. Sin embargo, también se contó con información relacionada con las

pérdidas parciales y totales registradas en la perforación de los pozos ubicados en el campo geotérmico.

Específicamente, en los pozos geotérmicos P-1 y P-10 se ha confirmado mediante registros, que las pérdidas existentes corresponden a la existencia de zonas permeables. Por lo tanto, estos datos se utilizarán para calibrar el modelo resistivo y así determinar el rango de resistividades correspondientes al acuífero superficial existente en el campo geotérmico en estudio.

Otros datos que serán utilizados para la calibración del modelo resistivo serán los datos de niveles freáticos de los pozos de abastecimiento ubicados dentro de la cuenca hidrográfica definida previamente. A continuación, se enlistan los pozos considerados para la calibración: PD-CP, PD-33, PD-MIRA, PD-AT, PD-30, PD-AND1, PD-IJ, PD-EM, PD-GRANJA, PD-16, PD-17, PD-26, AND1 y AND2.

## 6 RESULTADOS

En la Figura 6.1 se muestran las curvas de nivel generadas por el software RockWorks®, a partir de la triangulación aplicada a las coordenadas de los pozos y de los sondeos TDEM. Una vista en 3D de la superficie modelada se muestra en la Figura 6.2

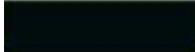
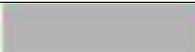
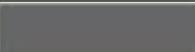
A partir de los datos referentes a litología fue posible obtener un modelo litológico de la región en estudio, el modelo resultante es mostrado en la figura 6.3 donde puede observarse la presencia predominante de lava andesítica en las profundidades más superficiales y de aglomerado en profundidades mayores. Como se verá un poco más adelante en el capítulo, este modelo fue utilizado para establecer una correlación de la litología con la resistividad y las pérdidas relacionadas a zonas permeables.

Otro de los modelos realizados en el software fueron los modelos resistivos y de acuífero, mostrados en las figuras 6.4 y 6.5 correspondientemente. Para definir los datos de entrada en el modelo del acuífero se tomaron en cuenta aquellas pérdidas relacionadas con zonas permeables donde existe presencia de flujo de agua, de esta forma el software pudo generar con estos datos las interpolaciones y cálculos necesarios para deducir en zonas donde no existen pozos, la extensión del acuífero.

Los modelos previamente mencionados fueron combinados, para ser sometidos a una revisión y posterior calibración. En el caso del modelo resistivo se definió a partir de las pérdidas existentes en los pozos P-1, P-10 y los niveles freáticos de los pozos domésticos mencionados en la sección 5.4, que el rango de resistividades asociadas con el acuífero superficial en la zona de estudio corresponde a valores de 15 – 20  $\Omega$ -m. Esto puede observarse, por ejemplo, en la figura 6.6, donde se presentan los pozos P-1 y P-10; en dicha figura se aprecia en el perfil resistivo que la capa más superficial, correspondiente a 15 – 20  $\Omega$ -m (color azul), tiene coincidencia con los valores de pérdidas correspondientes mostrados en el perfil del acuífero generado por el software, y por lo tanto se tienen los modelos calibrados para realizar más análisis a partir de la elaboración de otros perfiles en la zona. En la tabla 6.1 se muestra la escala de colores final utilizada para representar las resistividades, tomando en cuenta la calibración antes mencionada.

*Tabla 6.1 Escala de colores para resistividad*

Escala de color	Rango de resistividad ( $\Omega$ -m)
	0-2
	2-4
	4-5
	5-6

Escala de color	Rango de resistividad ( $\Omega$ -m)
	6-8
	8-10
	10-12
	12-15
	15-20
	20-30
	30-35
	35-40
	40-60
	60-100
	100-500
	500-1,000
	1,000-3,000
	3,000-6,000

Vale la pena aclarar, que en la figura 6.6 se observa el trazo en perfil de la superficie (*grid*) calculada por el software RockWorks®, sin embargo, como se nota la superficie no coincide con la elevación del collar del pozo. Esto se debe en buena parte, a que el programa no utiliza un Sistema de Información Geográfica (*GIS*) para crear superficies de una región geográfica, sino que por medio del método de triangulación genera la superficie con las coordenadas introducidas para cada pozo, por lo tanto, no es exacto en cuanto a calcular la superficie requerida. Sin embargo, es posible verificar la validez de los resultados obtenidos al medir la diferencia de niveles que existe entre el pozo P-10 y la *grid* creada, en nuestro caso este valor corresponde a un desfase de 23 m entre ambos niveles. Por lo tanto, al desplazar este valor el pozo P-10, para que coincida con la *grid*, se verificó que la profundidad de las pérdidas reales asociadas con el acuífero existente es igual al valor obtenido en el modelo. Respecto al pozo P-1, este sí coincidió su nivel de collar con el nivel de la *grid* y por lo tanto no fue necesario realizar el ajuste realizado para el pozo P-10.

Respecto a la extensión del acuífero en estudio, puede observarse en la figura 6.7 que su extensión principalmente está en la zona Oeste de la cuenca hidrográfica. Pues los valores de resistividades van en un aumento conforme se analizan algunas

zonas ubicadas en el Este. Esto puede comprobarse al extender más hacia el Este el perfil de la figura 6.7, en la figura 6.8 puede verificarse que esta zona presenta resistividades altas. Por otro lado, al trazarse perfiles en la zona Oeste de la cuenca, tal como se muestra en las figuras 6.9 y 6.10, se aprecia la presencia del rango de resistividades asociadas al acuífero; en la figura 6.9 se muestran un perfil con orientación NE-SO donde resulta evidente su delimitación, este comportamiento resulta similar en la figura 6.10 con un perfil trazado en dirección N-S.

Por otra parte, en la figura 6.11 se observa un perfil oeste-este donde se incluye el pozo P-1. En dicho perfil se puede observar una capa con resistividad entre 10 - 15  $\Omega$ -m (color azul negro), que separa dos capas de resistividades asociadas con el acuífero superficial (color azul); al correlacionar estos datos con la litología presente en esa zona, se observa que corresponde a una lava andesítica. Sin embargo, en la columna litológica de este pozo, se verifica que, en el intervalo de profundidades, comprendidos dentro de esta zona con resistividades entre 10 - 15  $\Omega$ -m, se tiene una lava andesítica con alteración intensa. Esta información hace posible deducir que probablemente se trate de una capa arcillosa impermeable, capaz de separar dos acuíferos diferentes. Por lo tanto, es probable la existencia de un segundo acuífero superficial, más profundo al que se está analizando en el presente estudio.

Un análisis más detallado del área en estudio podría realizarse si se revisa de forma individual cada uno de los sondeos TDEM. Por ejemplo, en la figura 6.12 se observa que esta zona ha sido modelada por el software con una resistividad alta (100-500  $\Omega$ -m), sin embargo, al analizar el sondeo TDEM25 en la figura 6.13, se observa que a 124.36m hay un cambio de resistividad de 63.5 a 15.56  $\Omega$ -m. Este último valor coincide con el rango asociado en el presente trabajo para el acuífero en estudio, además el sondeo TDEM25 se encuentra cercano al pozo PD-IJ como se aprecia en la figura 6.12, existiendo una correlación entre el nivel de agua del pozo PD-IJ y el nivel donde se produce el cambio de resistividad de acuerdo con el sondeo TDEM25.

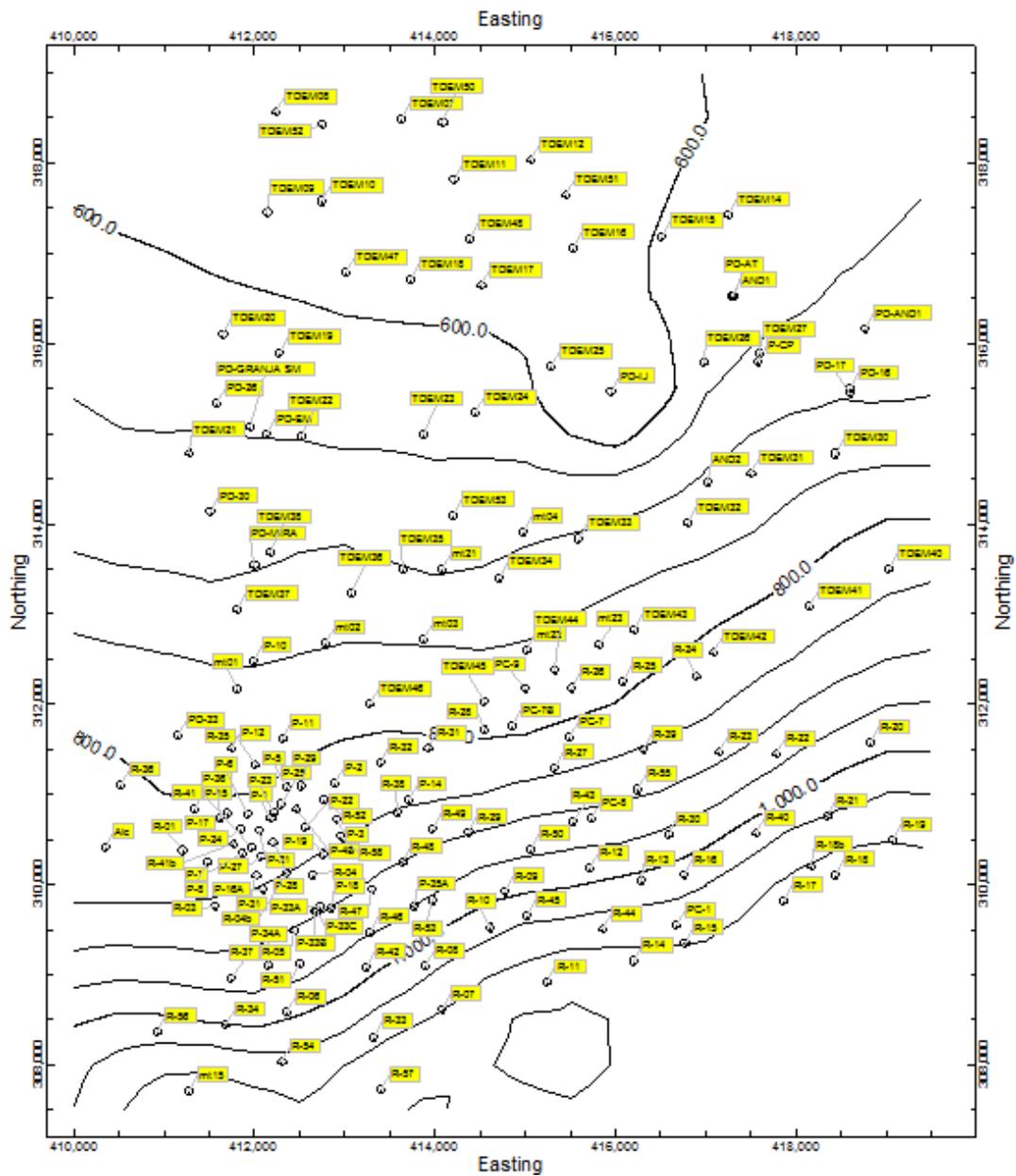


Figura 6.1 Curvas de nivel del terreno y ubicación de puntos (Vista en 2 dimensiones).

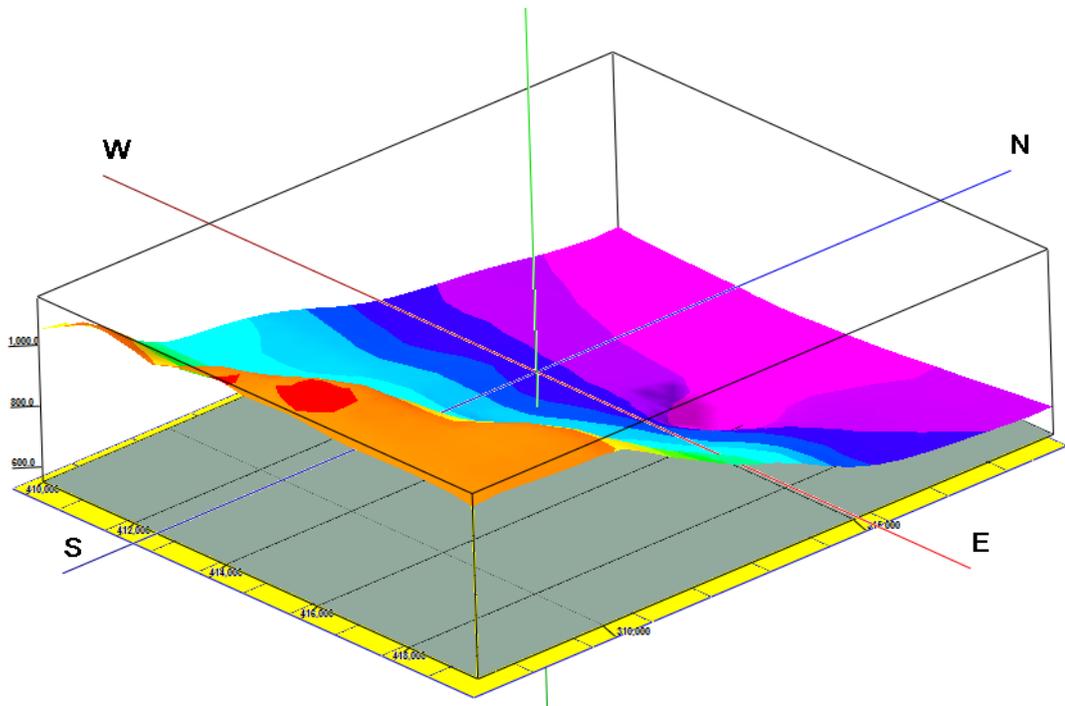


Figura 6.2 Superficie grid del terreno (Vista en 3 dimensiones).

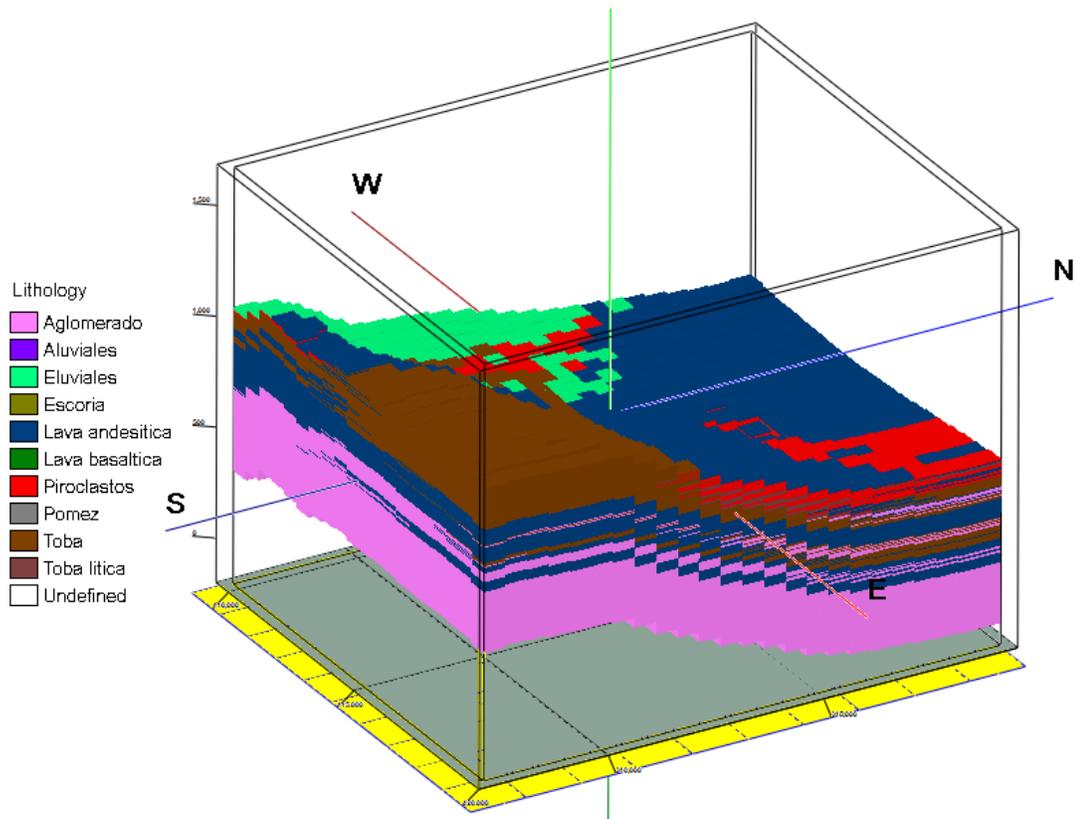


Figura 6.3 Modelo Litológico (Vista en 3 dimensiones).

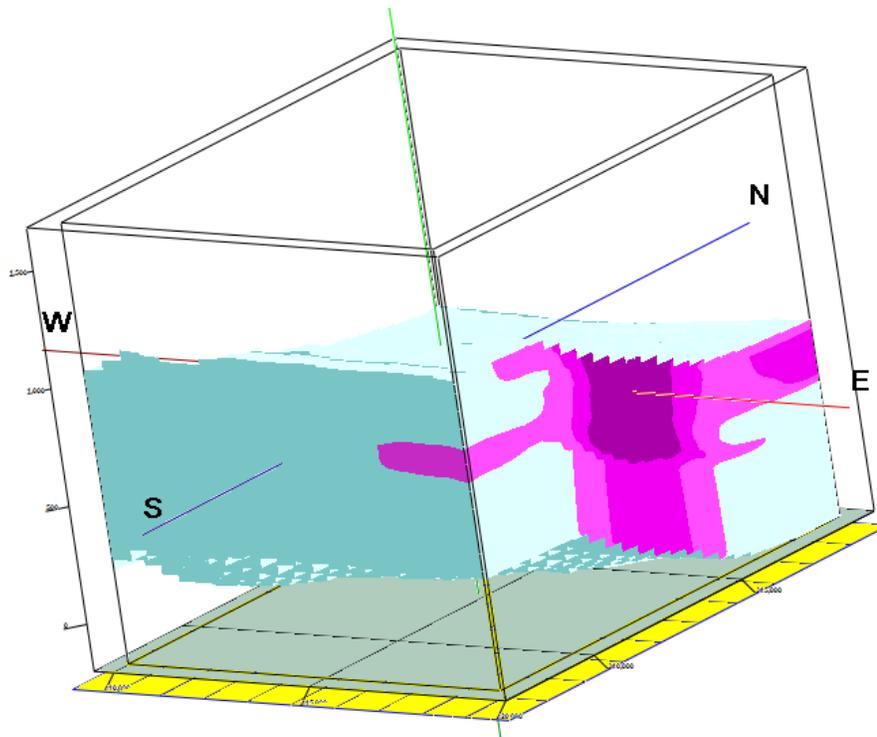


Figura 6.4 Modelo Resistivo en 3D (ver escala de colores en tabla 6.1).

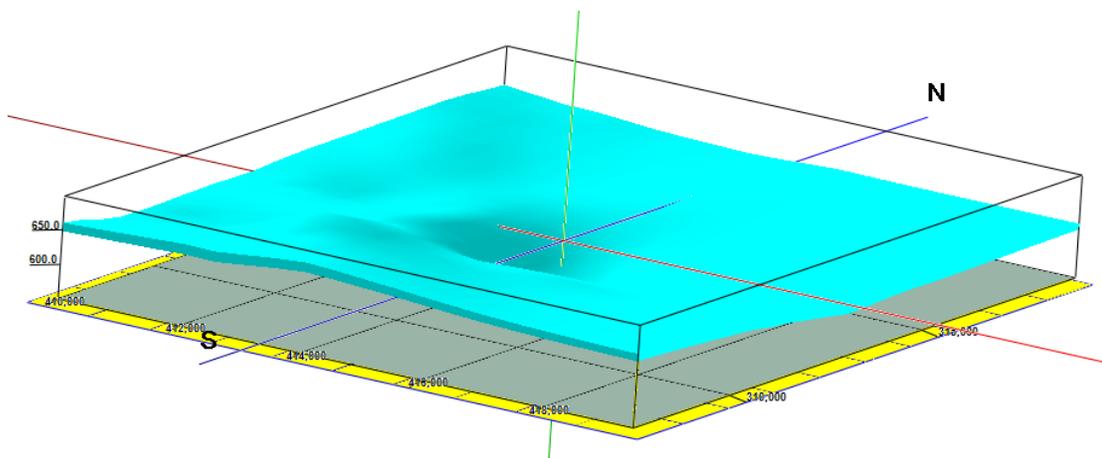


Figura 6.5 Modelo de Acuífero (Vista en 3 dimensiones).



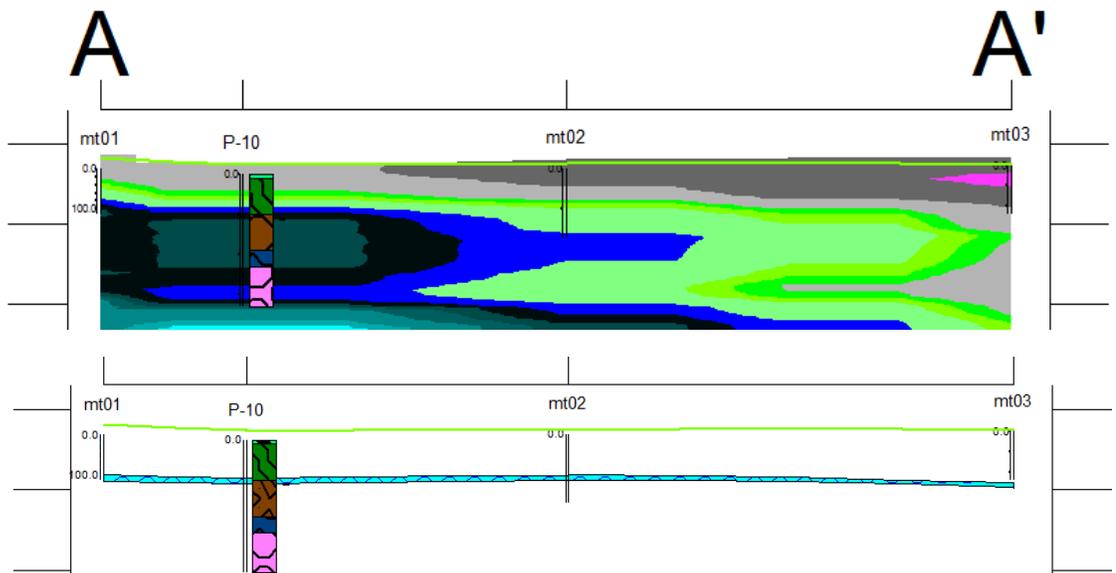
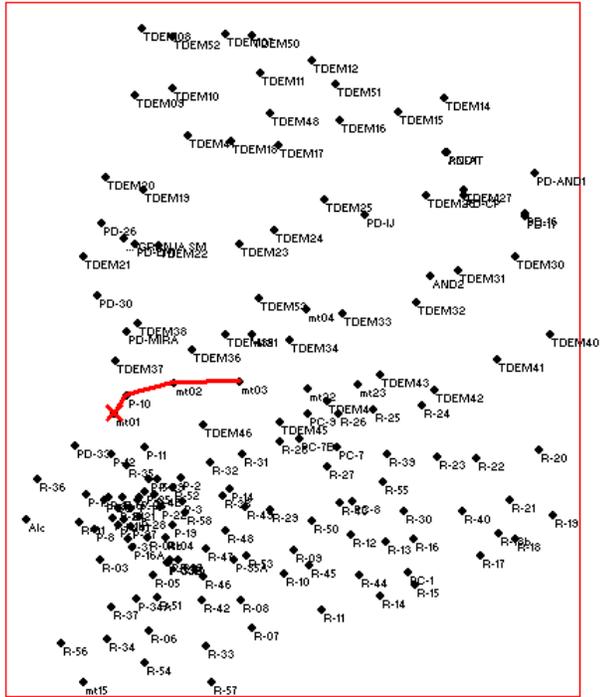


Figura 6.7 Perfiles Oeste – Este de Modelo Resistivo y Acuífero, pasando por P-10

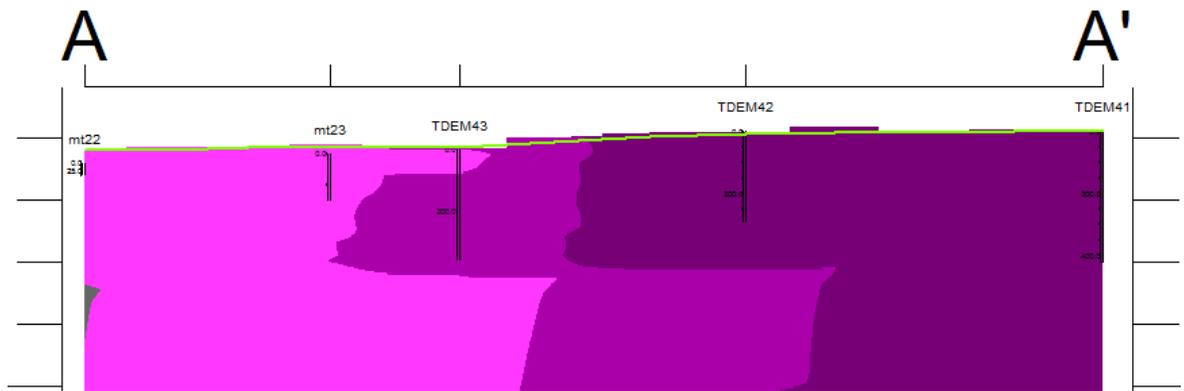
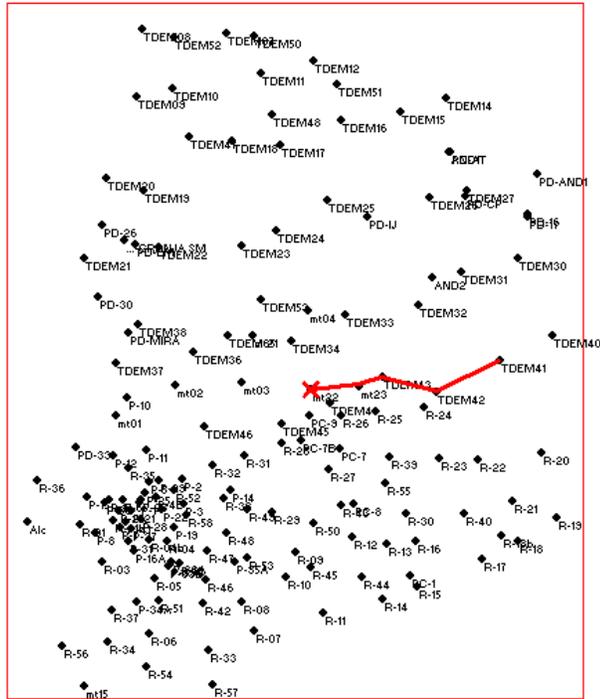


Figura 6.8 Perfil Oeste-Este de Modelo Resistivo

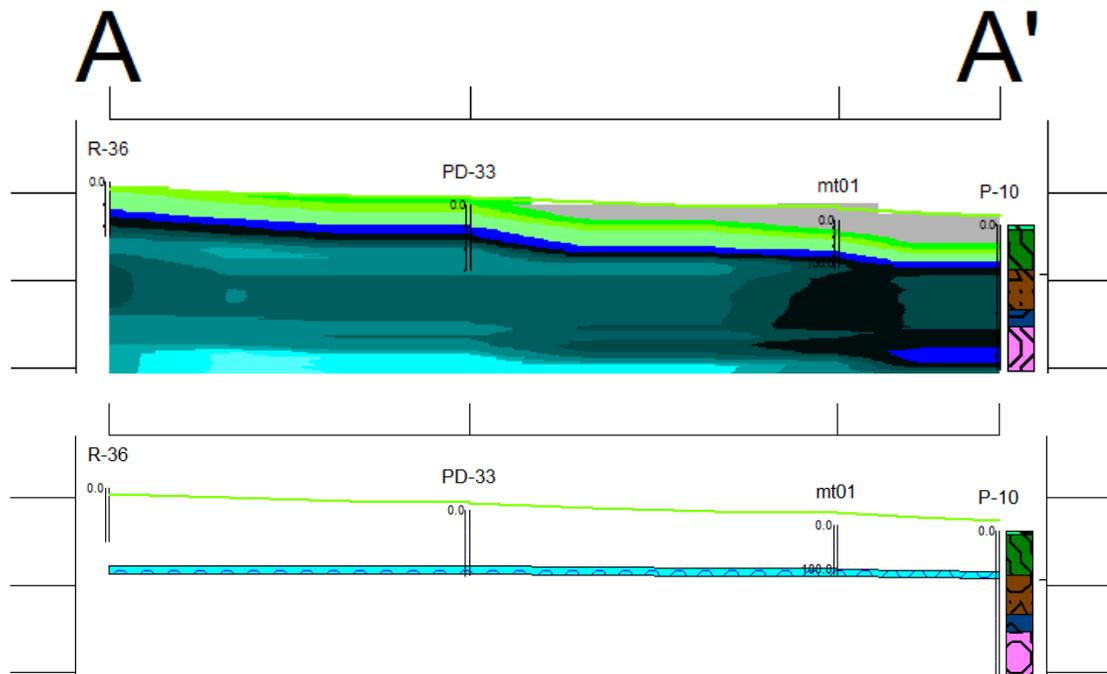
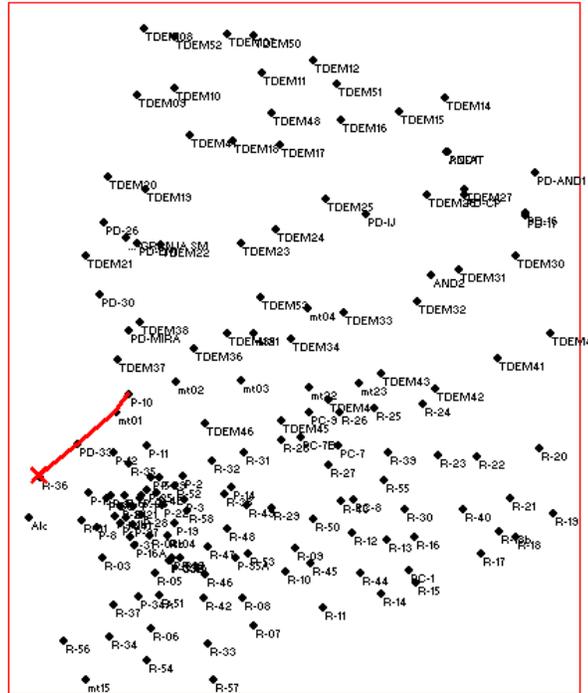


Figura 6.9 Perfiles Suroeste-Noreste de Modelo Resistivo y Acuífero, pasando por PD-33 y P-10

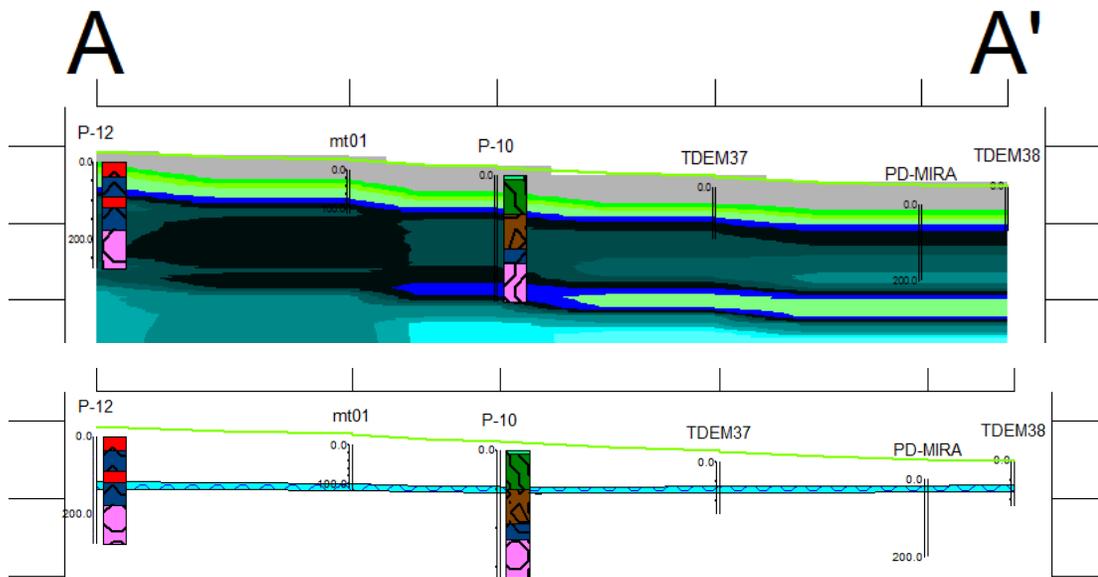
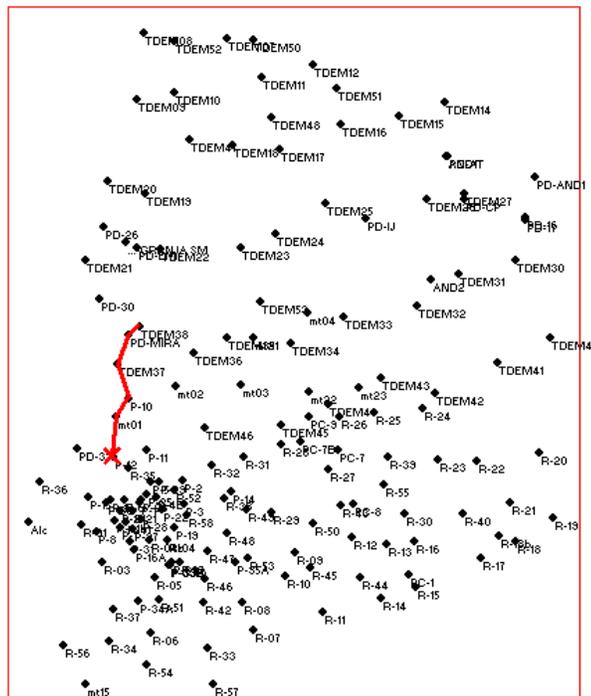


Figura 6.10 Perfiles Sur - Norte de Modelo Resistivo y Acuífero, pasando por P-12 y P-10

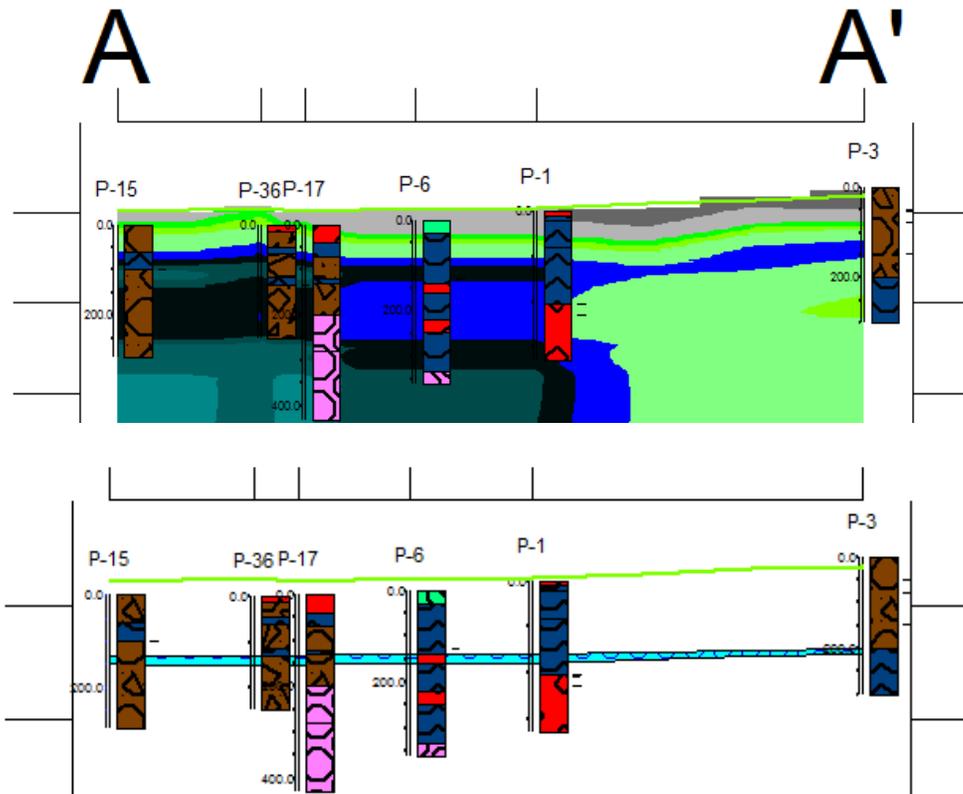
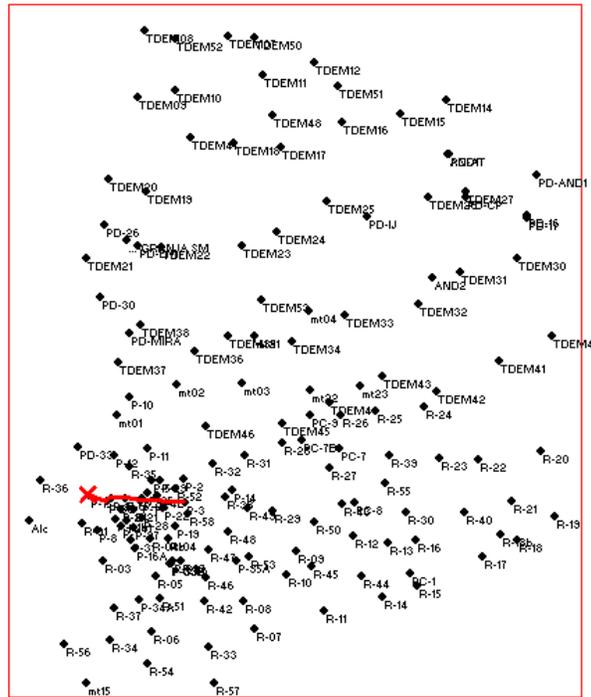


Figura 6.11 Perfiles Oeste – Este de Modelo Resistivo y Acuífero, pasando por P-1

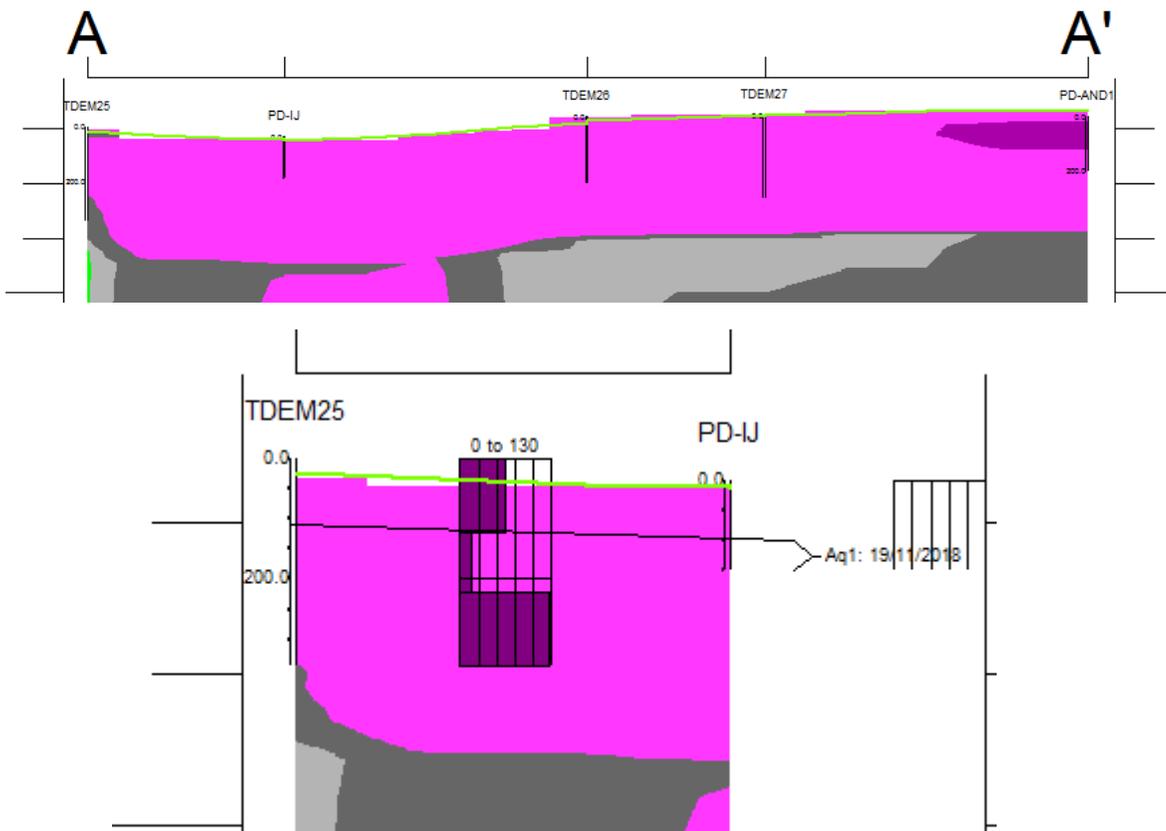
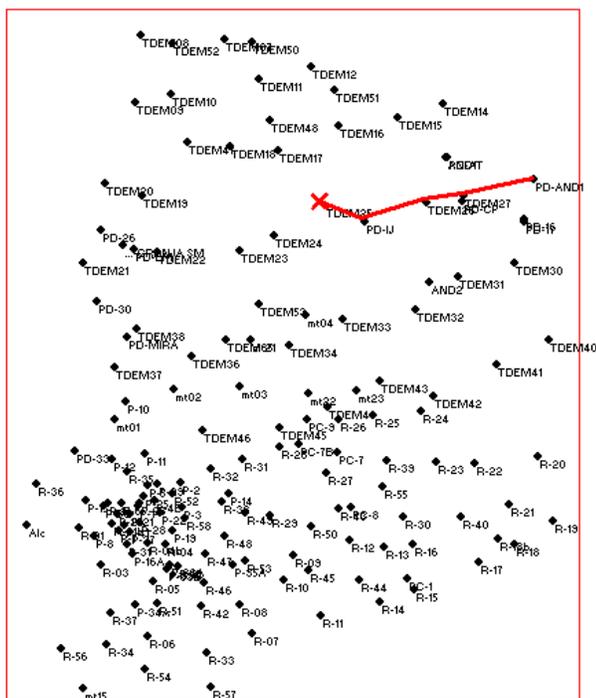


Figura 6.12 Perfil en zona Norte orientado Oeste-Este, incluyendo el PD-IJ

# TDEM25

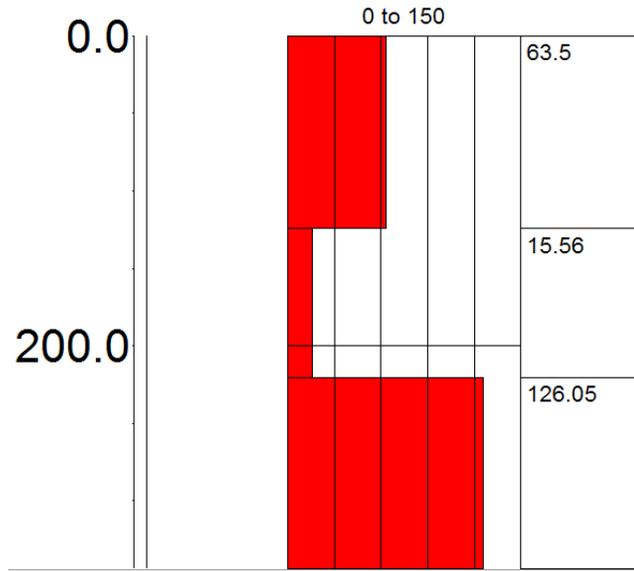


Figura 6.13 Variación de resistividades en profundidad (TDEM 25)

## 7 CONCLUSIONES

- El rango de resistividades correspondientes al acuífero superficial definido en el presente estudio se encuentra entre 15 – 20  $\Omega$ -m. Aunque estos valores resulten ser bajos en comparación con los valores aceptados por alguna bibliografía referente al tema, estos valores han sido comprobados mediante dos formas: 1) al correlacionar los valores de resistividad en la zona con las pérdidas totales y/o parciales obtenidas en el momento de perforar pozos geotérmicos; y 2) al correlacionar resistividades con los niveles freáticos en los pozos perforados.
- A partir del análisis realizado en las cercanías del pozo P-1, resulta ser probable la existencia de un segundo acuífero a una mayor profundidad, específicamente a 160 m respecto al nivel de collar del pozo P-1
- El acuífero superficial en estudio parece no extenderse en la zona Este de la cuenca delimitada, pues no existe información de pérdidas en la zona asociadas con zonas permeables, que pueda correlacionarse con resistividades. Además, altas resistividades predominan en esta zona, lo cual podría confirmar que el acuífero superficial únicamente se extiende en la parte oeste de la cuenca.
- Un análisis más completo se puede realizar cuando se tienen zonas de alta resistividad, mediante el gráfico de resistividad individual en el sondeo TDEM, tal como se mostró en las figuras 6.12 y 6.13. Sin embargo, lleva demasiado tiempo, ya que es necesario hacerlo uno a uno y correlacionarlo con las pérdidas en los pozos perforados.

## 8 RECOMENDACIONES

- Para modelar la superficie del terreno natural de un área en la que se hará un modelo hidrogeológico, podría ser más exacto realizar el modelo con un software que incluya un sistema de información geográfica (GIS). De esta forma es más probable que los niveles de collar de los pozos coincidan con la superficie modelada por el software.
- Continuar el estudio de la hidrogeología en la zona, específicamente con el propósito de corroborar con otros datos la existencia del segundo acuífero superficial encontrado en la zona Oeste para posteriormente realizar su correspondiente modelado.
- El modelo hidrogeológico de acuífero puede ser calibrado con mayor exactitud, cuando se tienen datos completos de pérdidas en pozos perforados, es decir en los que se haya discriminado zonas permeables que aporten un flujo de agua, de las zonas donde únicamente existen fracturas pero que no tienen relación con la existencia de un acuífero. Además, el modelo será más realista al estar distribuidos los pozos de forma uniforme en la región geográfica a analizar, pues será posible capturar en mayor grado las particularidades que tenga el acuífero en cuestión.
- Incorporar datos de geoquímica existentes en el área de estudio, puede contribuir a correlacionar de forma más objetiva los datos de resistividad, pérdidas y litología. De esta forma será posible definir de mejor forma la distribución de un acuífero en determinada región.

## 9 AGRADECIMIENTOS

Principalmente a Dios, por la vida, la guía y bendiciones brindadas.

A mi papá y mamá, este triunfo es compartido con ellos, ya que siempre son mi apoyo.

A mis hermanos, por su apoyo y ánimos.

A mi novio, por el apoyo incondicional y comprensión en cada proyecto.

A las organizaciones internacionales, LaGeo S.A. de C.V., la Universidad de El Salvador y todas las personas que hicieron posible la realización del Diplomado en Geotermia para América Latina, edición 2018, por la oportunidad de capacitarme y cursar tan importante área de estudio que sin duda me será de ayuda en el ámbito profesional y laboral.

A los docentes del Diplomado, por su tiempo, sus enseñanzas, entrega y dedicación en cada una de las etapas del Diplomado.

A mis asesores del presente trabajo: Ing. Antonio Matus e Ing. Arturo Quezada, por su tiempo, dedicación y entrega para transmitir sus conocimientos necesarios para la realización de este trabajo.

A mis compañeros Queren e Ismael, por el apoyo, amistad y los buenos momentos que compartimos.

Finalmente, a todos mis compañeros del diplomado por el tiempo y experiencias compartidas.

*Metzi Rivera Domínguez*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres y hermanos, por su apoyo.

Agradezco la oportunidad que la Universidad de El Salvador y LaGeo me brindo para poder participar en el Diplomado en Geotermia para América Latina, Edición 2018 y seguir creciendo personalmente.

Agradezco a mis asesores Ing. Antonio Matus e Ing. Arturo Quezada, que son personas entregadas al conocimiento científico, y que a través de su paciencia y buena voluntad, me guiaron para la satisfactoria consecución de la investigación.

A Metzi y Queren, muchas gracias por haberme permitido trabajar con ustedes, pero sobre todo agradezco las risas y los momentos compartidos.

Finalmente, agradezco a mis compañeros extranjeros y nacionales por las experiencias compartidas.

*Ismael Romero Romero*

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarme la capacidad y la fortaleza en todo momento.

Mis padres y mi hermano por su amor, paciencia y apoyo incondicional.

Al Ing. Arturo Quezada e Ing. Antonio Matus por su valiosa ayuda en el desarrollo del presente trabajo. El tiempo y la paciencia que nos tuvieron son cosas que valoro de forma muy especial.

A la Universidad de El Salvador, LaGeo S.A de C.V y las organizaciones internacionales por permitirme la oportunidad de estar en este diplomado, sé que fue una oportunidad única en la vida que sin duda me será de utilidad en mi vida profesional.

A mis profesores en el transcurso de este diplomado de los que aprendí mucho más de lo que esperaba, gracias por compartir sin egoísmo sus conocimientos.

Mis amigos, Gaby y William, por su apoyo y palabras de ánimo en los momentos difíciles.

Mis compañeros y amigos, Metzi e Ismael, por acompañarme en esta etapa de mi vida, han sido muchos los buenos momentos que compartimos juntos

Mis compañeros en el transcurso del diplomado por el tiempo y las experiencias transmitidas

*Queren Suriano Méndez*

## 10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez-Fernández, Ceferino; Fernández Uría, Antonio; Gimeno, María Victoria; Nieto López-Guerrero, Pedro; Porras Martín, Jorge (1985). Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. Instituto Geológico y Minero de España (I.G.M.E.)
- Ascencio Eduardo, Campos Glenda y Muñoz Tania (2017). Metodología para la Identificación y Caracterización de Acuíferos Superficiales en un Campo Geotérmico de El Salvador. Diplomado en Geotermia Para América Latina Edición 2017.
- Falcon, Moreno y Combina (2015). Evaluación de la Aguas Termales en el área de Santa Teresita, Provincia de La Rioja, Argentina. Serie correlación geológica 31 (1)
- Hem. J.D. (1971). Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. Geol. Surv. Water-Supp. Paper 1473. US. Gov. Print. Off. Washington.
- León Delgado, Montoya López y Rivera Galdámez (2013). Caracterización hidrogeológica de la zona sur del municipio de Chalatenango, limítrofe con el embalse Cerrón Grande. Universidad de El Salvador.
- Ramírez Martín, Carlos E. y Rodríguez Donatien, Ariagna (2009=). Sistema para la Identificación de Aguas en Pozos Petroleros (SIAPP). Ciudad de La Habana: Universidad de las Ciencias Informáticas. Facultad 9.
- Telford NW, Geldart LP, Sheriff RS, Keys DA (1976) Applied geophysics. Cambridge University Press, London