



CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA E HIDRÁULICA

TESIS

UTILIZACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS PARA ENTENDER EL ROL DE LA
ZONA VADOSA EN EL PROCESO DE RECARGA NATURAL. EL CASO DEL
VALLE DE AGUASCALIENTES.

PRESENTA

Ing. Alfredo Zermeño Villalobos

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON
ESPECIALIDAD EN AMBIENTAL**

TUTOR

Dr. Martín Hernández Marín

COMITÉ TUTORAL

Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez

Mtra. Norma González Cervantes

Aguascalientes, Ags., Mayo de 2016



UNIVERSIDAD AUTONOMA
DE AGUASCALIENTES

Centro de Ciencias del Diseño
y de la Construcción

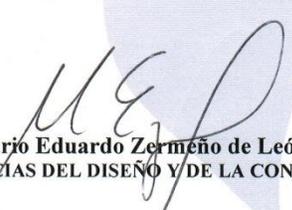
OFICIO No. CCDC-D-158-2016
ASUNTO: Conclusión de Tesis

**DRA. GUADALUPE RUIZ CUELLAR
DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
PRESENTE.**

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: **“Utilización de modelos numéricos para entender el rol de la zona vadosa en el proceso de recarga natural. El caso del Valle de Aguascalientes”**. Presentado por el sustentante: **ING. ALFREDO ZERMEÑO VILLALOBOS** con ID **119266** egresado de la **MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL**, cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que el autor cuenta con el voto aprobatorio correspondiente.

Para efecto de los trámites que al interesado convengan se extiende el presente, reiterándole las consideraciones que el caso amerite.

A T E N T A M E N T E
“SE LUMEN PROFERRE”
Aguascalientes, Ags., a 25 de mayo de 2016


Dr. en Ing. Mario Eduardo Zermeno de León
DECANO DEL C. DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

- c.c.p.- M. en Ing. José Luis López López – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.
- c.c.p.- Dr. Jesús Pacheco Martínez – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil
- c.c.p.- Dr. Martín Hernández Marín – Tutor de Tesis.
- c.c.p.- Ing. Alfredo Zermeno Villalobos – Egresado de la Maestría en Ingeniería Civil.
- c.c.p.- Lic. Delia Guadalupe López Muñoz – Jefe Sección de Certificados y Títulos.
- c.c.p.- Archivo

MEZL/rbv



UNIVERSIDAD AUTONOMA
DE AGUASCALIENTES
FORMATO DE CARTA DE VOTO APROBATORIO

DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS
DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **ALFREDO ZERMEÑO VILLALOBOS** con ID **119266** quien realizó *la tesis* titulada: **UTILIZACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS PARA ENTENDER EL ROL DE LA ZONA VADOSA EN EL PROCESO DE RECARGA NATURAL. EL CASO DEL VALLE DE AGUASCALIENTES**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que **él** pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 25 de Mayo de 2016

Dr. Martín Hernández Marín
Tutor de tesis

Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez
Comité tutorial

Mtra. Norma González Cervantes
Comité tutorial

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría de Investigación y Posgrado
c.c.p.- Jefatura del Depto. de _____
c.c.p.- Consejero Académico
c.c.p.- Minuta Secretario Técnico

V.B.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación fue realizado bajo la supervisión del Dr. Martin Hernandez Marín, a quien me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento, por hacer posible la realización de este estudio. Además, de agradecer su paciencia, tiempo y dedicación que tuvo, para que este trabajo saliera de manera exitosa.

A Lili, mi novia, por ser en muchas ocasiones mi pilar de apoyo, por aclararme las ideas cuando más lo necesitaba, porque sin ella, este trabajo no hubiera visto fin. Por enseñarme a tener paciencia y a disfrutar de los momentos simples de la vida.

A mi mama, por ser el apoyo más importante durante mi educación, que gracias a su esfuerzo y dedicación, hoy soy Ingeniero y estoy terminado mi Maestría. Porque siempre serás un ejemplo para mí.

Al Ing. Juan Antonio Fuentes López por su valiosa colaboración para el desarrollo de este trabajo.

A mi familia, hermanos, profesores y amigos que me han ayudado.

Muchas gracias por su apoyo.

DEDICATORIA

Dedico de manera muy especial a mi abuelita Chuy y mi abuelito Jaime,
y espero que desde donde estén, los siga haciendo sentir como un pavo real.



Índice

RESUMEN	5
ABSTRACT.....	6
CAPITULO I. GENERALIDADES.....	7
1.1 INTRODUCCIÓN.....	7
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	9
1.3 OBJETIVOS.....	10
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	10
1.3.2 <i>Objetivos particulares</i>	10
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 ANTECEDENTES	11
2.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	14
2.2.1 <i>Ubicación</i>	14
2.2.2 <i>Climatología</i>	14
2.2.3 <i>Geomorfología</i>	16
2.2.4 <i>Fisiografía</i>	17
2.2.5 <i>Geología Regional y local</i>	21
2.2.6 <i>Geología estructural</i>	21
2.2.7 <i>Hidrografía</i>	24
2.2.8 <i>Hidrogeología</i>	24
2.3 HIDROGEOLOGÍA DE LA ZONA VADOSA	26
2.3.1 <i>Ecuación de Richards</i>	26
2.3.2 <i>Curvas características de retención de humedad</i>	27
2.4 GEOFÍSICA	29
CAPITULO III. MARCO METODOLÓGICO	32
3.1 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	33
3.2 PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LA ZONA VADOSA	47
3.3 MODELACIÓN DE FLUJO EN LA ZONA VADOSA.....	49
CAPITULO IV. RESULTADOS.....	50
4. 1 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	51
4.2 PARÁMETROS HIDRÁULICOS	56
4.3 SIMULACIONES NUMÉRICAS	57
CAPITULO V. CONCLUSIONES	67
REFERENCIAS.....	68
ANEXOS.....	72

Índice de tablas

Tabla 1 - Estaciones climatológicas de la zona de estudio..... 16

Tabla 2 - Información geográfica resumida de la perforación de pozos utilizados en el análisis. 33

Tabla 3 - Información geográfica de los sondeos eléctricos verticales. 39

Tabla 4 - Porcentajes de granulometría para un suelo superficial de la ciudad de Aguascalientes. 47

Tabla 5 - Gravedad específica para un suelo cercano al rio San Pedro. 48

Tabla 6 - Granulometría para "Tepetates" de municipio de Querétaro (Rosales, 2011). 48

Tabla 7 - Resumen de valores hidráulicos para la zona vadosa en un suelo con menos del 10% de finos (AA, Arenas arcillosas). 56

Tabla 8 - Resumen de valore hidráulicos para la zona vadosa en un suelo con más del 10% de finos (AA, Arenas arcillosas)..... 56

Tabla 9 - Parámetros utilizados para la simulación numérica de la unidad 1..... 57

Tabla 10 - Parámetros hidráulicos utilizados para la simulación numérica de la unidad 2. 58

Tabla 11 - Tiempos máximos de tránsito para diferentes profundidades del nivel freático en la unidad 1 en años..... 59

Tabla 12 - Tiempos máximos de residencia para diferentes profundidades del nivel freático en la unidad 2 en años..... 59

Índice de figuras

Figura 1- Proceso de infiltración sobre una falla. 13

Figura 2– Localización de la zona de estudio. Se enuncian las cabeceras municipales dentro del área de estudio..... 15

Figura 3 - Temperatura de la zona de estudio..... 18

Figura 4 - Precipitación media anual de la zona de estudio..... 19

Figura 5 - Fisiografía de la zona de estudio..... 20

Figura 6 - Fallas y fracturamiento sobre el área de estudio para el año 2010. 23

Figura 7 - Elevación estática para el acuífero del valle de Aguascalientes, año 2015. 25

Figura 8 - Representación gráfica de una curva característica de retención de humedad con el fenómeno de histéresis..... 28

Figura 9 - Resistividad en ohm-metro, para diferentes tipos de suelos (Orellana, 1982).... 30

Figura 10 - Sección de igual resistividad y su interpretación geoelectrica. Tomada de “Geofísica | EPYESA”, (2016)..... 31

Figura 11 - Distribución geoespacial de los pozos con información litológica..... 41

Figura 12 – Distribución geoespacial de los sondeos eléctricos verticales. 42

Figura 13 - Distribución de las secciones para la construcción de la hidroestratigrafía..... 44

Figura 14 - Carta geológica del valle de Aguascalientes. Tomada de Martínez y Mitre (2003)..... 45

Figura 15 - Carta hidrogeológica del estado de Aguascalientes. Tomada de Vázquez (2016) 46

Figura 16 - Unidades hidrogeológicas para la zona de estudio por valores de conductividad hidráulica.. 53

Figura 17 - Configuración eléctrica de la sección 8, ubicada al sur de la cabecera municipal de Cosío. El perfil de resistividad superior muestra la sección de resistividad aparente medida en campo, la segunda muestra la resistividad real después del proceso de inversión, Los gráficos muestran la variación de resistividad aparente contra las distancia entre los electrodos. Mientras que las tablas indican la estratigrafía (cada renglón indica un estrato diferente)..... 54

Figura 18 - Sección hidrogeológica conceptual, ubicada al sur de la cabecera municipal de Cosío. En naranja, se muestra la unidad 2, en color melón la unidad 2, en rojo rocas volcánicas y en azul rey el acuífero. 55

Figura 19 - Saturación efectiva para diferentes profundidades del nivel freático. Se muestran 5 de los 8 casos de columnas. a) 50, b) 100, c) 150, d) 200 y e) 250 metros del acuífero, para la unidad 1 en un tiempo de 1 año. La línea blanca indica el nivel freático simulado. El 100 % de saturación efectiva observada sobre dicha líneas se debe al efecto capilar..... 60

Figura 20 - Saturación efectiva para diferentes profundidades del nivel freático. Se muestran 5 de los 8 casos de columnas a) 50, b) 100, c) 150, d) 200 y e) 250 metros del acuífero, para la unidad 2 en un tiempo de 12.273 años. La línea blanca indica el nivel freático simulado. El 100 % de saturación efectiva observada sobre dicha líneas se debe al efecto capilar..... 61

Figura 21 - Valores máximos de tiempos de tránsito, para la unidad 1. En rojo se grafica la función polinómica grado 2. 62

Figura 22 - Valores máximos de tiempos de tránsito, para la unidad 2. En rojo se grafica la función polinómica grado 2. 63

Figura 23 - Modelo digital de elevación con curvas a igual tiempo de tránsito en años. 64

Figura 24 - Localización de los tiempos mínimos de tránsito en años. Arriba, cerca de la cabecera de Cosío. Abajo, al sur de la ciudad de Aguascalientes. 65

Figura 25 - Tiempos máximos de tránsito en años. Arriba, la sierra de Tepezala. Abajo, el norte de la ciudad de Aguascalientes. 66

RESUMEN

La demanda creciente de agua potable ha ocasionado que los países se vean obligados a utilizar sus reservas de aguas subterráneas, disminuyendo los niveles freáticos y aumentando el espesor de la zona vadosa. La zona vadosa es la franja que delimita la superficie y el nivel freático donde ocurren diferentes procesos hidrogeológicos, entre el que destaca el proceso de infiltración. En este trabajo de investigación se dan a conocer los tiempos de tránsito, utilizando la ecuación de Richards en el programa COMSOL Multiphysics, para diferentes espesores hidrogeológicos de la zona vadosa del valle de Aguascalientes, obtenidos del análisis litológico, geológico y geofísico, así como, parámetros de las curvas de retención resultantes del análisis granulométrico por parte del programa ROSETTA. Obteniendo valores máximos en la sierra de Tepezalá con 740 años y al norte de la ciudad de Aguascalientes con 160 años, y mínimos al sur de la cabecera municipal de Cosío con 13 años.

Palabras clave.

Curvas de retención de humedad, ecuación de Richards, valle de Aguascalientes, zona vadosa, recarga de acuíferos.

ABSTRACT

The increasing demand for drinking water has caused countries are forced to use their groundwater reserves, reducing groundwater levels and increasing the thickness of the vadose zone. The vadose zone is the strip that delimits the surface and the water table where different hydrogeological processes, among which stands out the infiltration process occur. In this research disclosed transit times, using the Richards equation in the COMSOL Multiphysics program for different hydrogeological thickness of the vadose zone of the Valley of Aguascalientes, obtained from lithological, geological and geophysical analysis and, parameters curves resulting from particle size analysis by the ROSETTA program retention. Getting maximum values in the Sierra de Tepezalá with 740 years and north of the city of Aguascalientes with 160 years, and minimum at south of the municipal head of Cosío whit 13 years.

Keywords.

Moisture retention curves, Richards equation, Aguascalientes valley, vadose zone, groundwater recharge.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPITULO I. Generalidades

1.1 Introducción

En la actualidad la demanda creciente de agua potable ha ocasionado que los países se vean obligados a utilizar sus reservas de aguas subterráneas, en este aspecto se destacan las poblaciones que se encuentran establecidas en zonas áridas o semiáridas, ya que son áreas que carecen de agua superficial en cantidades suficientes para satisfacer sus necesidades, provocando que la principal fuente de abastecimiento sea a partir de los mantos acuíferos locales (Pizarro, 2012). En México, el 50 por ciento del territorio nacional está ocupado por condiciones de clima árido o semiárido, y donde la única fuente de agua permanente es la subterránea, misma que además sustenta poco más de la tercera parte de la superficie total irrigada en el país y de suministrar agua a alrededor de 90 millones de habitantes, de los cuales 25 millones pertenecen a prácticamente toda la población rural del país (CONAGUA, 2012).

Debido al aprovechamiento sin control del agua subterránea del país, 162 acuíferos fueron dictaminados por la CONAGUA (2012) como sin disponibilidad. De entre ellos, se encuentra el acuífero del valle de Aguascalientes. Este acuífero en particular, ha sido declarado en veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo desde 1963 (DOF, 1963). La sobreexplotación del acuífero que se ocurre cuando se extrae más agua de la que se recarga, ya se ha visto reflejada en daños ambientales como lo son la desaparición de manantiales, humedales, la reducción de caudales base de ríos, la eliminación de vegetación nativa y la pérdida de ecosistemas.

Es por esto que desde hace algunos años, y debido a la creciente demanda del agua subterránea y a la incertidumbre en las estimaciones de recarga, está surgiendo la necesidad de realizar estudios para evaluar e identificar posibles zonas de recarga (Guerrero, comunicación escrita, Rodríguez, comunicación escrita, INAGUA, 2010). Generalmente los resultados de estos estudios se centran en el volumen de agua filtrado hacia el nivel freático, dejando de lado el proceso de transporte sobre la zona vadosa y el tiempo necesario para que el agua infiltrada llegue al acuífero. La zona vadosa, también conocida como zona no saturada o zona de aireación, es la zona delimitada por la superficie topográfica y el nivel

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

freático (o zona saturada), la cual dentro del marco hidrogeológico es la franja donde se llevan a cabo dos de los procesos hidrológicos más importantes: la infiltración y evapotranspiración (Hernández, 2001). Con el objetivo de entender la importancia de la zona vadosa en el proceso de recarga natural, estudios se han dedicado a comprender la física dominante en el proceso de transporte, como es el caso de la ecuación de Richard y las curvas de retención (Rijtema y Wassink, 1969, van Genuchten y Nielsen, 1985). Por otra parte, debido a la complejidad de los sistemas de transporte dentro de la zona vadosa, es necesario recurrir a la utilización de modelos numéricos para resolver el problema antes mencionado.

Así pues, como ya se mencionó, el acuífero del valle de Aguascalientes se encuentra en sobreexplotación, debido a que se extraen más de 247 millones de metros cúbicos del volumen disponible, ocasionando que el agua subterránea se extraiga a mayor profundidad y en consecuencia aumentando el espesor de la zona vadosa, además de generar problemas como fallas y agrietamientos por todo el valle (Pacheco et al., 2013). Con base a estos antecedentes, es de vital importancia no solo conocer el volumen infiltrado, sino también, conocer el tiempo de residencia que toma viajar por el espesor de la zona vadosa. Además, es importante establecer la trayectoria del agua por dicha zona vadosa, por la que la presente investigación se utilizará simulaciones numéricas mediante el programa de elementos finitos COMSOL Multiphysics. Para este fin se aplicará la ecuación de Richard para comprender el sistema de transporte sobre la zona vadosa y como es que ésta última influye en el proceso de recarga natural, empleando información de las propiedades del suelo no saturado, secciones hidroestratigráficas conceptuales creadas a partir de datos litológicos y estudios eléctricos.

1.2 Justificación

En la actualidad el valle de Aguascalientes sufre un descenso progresivo de los niveles de agua en el acuífero, lo anterior debido a la asociación de diferentes factores, como la creciente demanda del líquido por la sociedad para diferentes actividades, las condiciones geográficas y climatológicas, la cantidad y disponibilidad de agua por precipitaciones, ocasionando como ya se mencionó un abatimiento irreversible de los niveles de agua en los acuífero del valle.

Así también, la comprensión de los mecanismos de flujo y transporte hidrogeológicos que tienen lugar en el valle de Aguascalientes con el objetivo de comprender el proceso de infiltración es limitada, ya que pocos estudios en general han sido desarrollados con ese objetivo. Cabe destacar la poca diversidad de investigaciones sobre la zona vadosa, no solo en el proceso de recarga de acuíferos sino también en estudios de contaminación y en procesos de fracturamiento y subsidencia.

En promedio, el acuífero del valle de Aguascalientes cuenta con un espesor no saturado de 120 metros, constituidos principalmente por depósitos aluviales y rocas sedimentarias de grado de consolidación (litificación) variable, entre las que destacan gravas, arenas, conglomerados, areniscas y calizas, convirtiéndolo en una zona relevante para problemas hidrogeológicos.

El método que se empleará en este trabajo para comprender los mecanismos de flujos y transporte de agua a través de la zona vadosa dentro del valle es multifacético, aunque se enfatiza la aplicación de modelos numéricos utilizando la ecuación de Richard para determinar el movimiento del agua a través del espesor no saturado. Se incluirán la construcción de secciones hidroestratigráficas conceptuales, con orientación este-oeste, y distribuidas transversalmente a lo largo del valle. Estas secciones han sido establecidas a partir de datos litológicos y sondeos eléctricos verticales en diferentes puntos del valle. Finalmente y para obtener parámetros hidráulicos necesarios para las simulaciones numéricas, se aplicó el programa ROSETTA, mismo que permite estimar dichos parámetros a partir de datos (o información) granulométricos

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Entender la participación de la zona vadosa en el proceso de recarga natural vertical dentro del valle de Aguascalientes mediante simulaciones numéricas, utilizando la ecuación de Richard dentro del programa COMSOL Multiphysics, así como el programa ROSETTA.

1.3.2 Objetivos particulares

- Establecer la hidrostratigrafía de varias secciones a lo largo del valle a partir de información de pozos, perfiles eléctricos y estudios geológicos anteriores.
- Con base en la información obtenida y mediante el uso del programa ROSETTA, establecer los parámetros hidrogeológicos del valle, indispensables para la aplicación de la ecuación de Richards.
- Mediante la utilización de simulaciones numéricas, determinar tiempos de infiltración en para diferentes profundidades y tipo de suelo.
- Determinar ecuaciones para los diferentes tipos de suelos.
- Realizar un modelo digital de elevación de tiempos de recarga, a partir de las ecuaciones determinadas de las simulaciones numéricas.

CAPITULO II. Marco teórico

2.1 Antecedentes

Se describe como recarga al proceso cuando el agua meteórica se infiltra hacia las reservas de agua subterránea, destacando como principales modificadores de infiltración al tipo de superficie, la precipitación, el coeficiente de escurrimiento y de infiltración.

Como Guerrero (comunicación escrita) lo plantea, conocer el volumen de infiltración en regiones de alta demanda es primordial, sin embargo conocer el tiempo de tránsito desde que el agua meteórica entra en la zona vadosa y llega a las reservas de agua subterránea es uno de los factores más importantes y complicados de entender en la actualidad, debido a que esta zona controla los flujos de agua, materia y energía entre la atmosfera, la superficie terrestre y las reservas de agua subterránea. Por lo tanto, conocer el tiempo de recorrido, se ha vuelto un requisito para la cuantificación de la infiltración (Mattern y Vanclooster, 2010).

El espesor de la zona vadosa juega un papel crítico en el proceso de recarga vertical de agua subterránea (Huo et. al., 2014), ya que un amplio conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos son llevados a cabo en este espesor de suelo no saturado, interrumpiendo el proceso de infiltración. Además sus propiedades físicas, las químicas y biológicas de la zona vadosa son variables que controlan las características del flujo subsuperficial, haciendo que este pueda ser no lineal, dependiendo del grado de saturación del suelo que a su vez es controlado por la precipitación. Actualmente la precipitación no es el único detonante de la infiltración, ya que existen otros factores antropogénicos, como lo son las fugas en las redes de agua potable, donde como ejemplo, en el municipio de Aguascalientes más del 30% del volumen extraído es perdido por deficiencias en la red (PROACTIVA MEDIO AMBIENTE, 2012). Sin embargo, es importante mencionar que otros factores de recarga antropogénica como lo son las fugas de drenaje y el retorno de riego, representan procesos de infiltración que pueden aportar contaminantes hacia el acuífero. El tema de la contaminación de acuíferos ha sido unos de los detonantes del estudio de la zona vadosa, por lo que autores como Hernández (2001) han denominado a la zona vadosa como la planta natural de tratamiento de agua, ayudando a disminuir la concentración de contaminantes desde la superficie hasta la zona saturada o el encapsulamiento de ciertos

contaminante. En cambio en sus investigaciones, otros autores como Zhang et al., (2013), no encontraron relación entre el espesor de la zona vadosa y la disminución de nitratos (agente contaminante). Es importante mencionar que la función de planta de tratamiento de la zona vadosa, está condicionada directamente al tipo de suelo y vegetación que se encuentre.

Una de las características principales a conocer de la zona vadosa es el tipo de geología con la que está conformada, puesto que las propiedades hidráulicas de cada tipo de suelo o rocas, condicionan la velocidad de infiltración y el tiempo de tránsito, mientras que las propiedades mecánicas podrían estar condicionando la propagación de fallas lo que se traduciría en un consecuente aumento en la conductividad hidráulica. Por lo que tener una idea clara del tipo de material es de suma importancia para el estudio de cualquier tipo sobre la zona vadosa.

En relación a los estudios hidráulicos realizados sobre la zona vadosa en el valle de Aguascalientes, la información es escasa. En diferentes trabajos realizados por empresas privadas se mencionan algunas de esas características, aunque quizás podría considerarse que éstas no son tomadas con la importancia que merecen. Esto se podría deber a que dichos trabajos fueron realizados con el propósito de conocer las condiciones exclusivamente del acuífero o zona saturada. Por lo tanto parámetros hidráulicos importantes de la zona vadosa aún son desconocidos o discutibles, por lo que es necesario modelar a partir de trabajos realizados en otros sitios, tomando como referencia datos del acuífero (CONAGUA, 2009).

Con respecto a la correlación entre la zona vadosa, fallas y subsidencia, investigaciones recientes describen a la primera como una zona mecánicamente frágil debido a sus condiciones hidrodinámicas, por lo que se suele concluir que la zona vadosa tiende a condicionar la aparición de fallas y propagación de las ya existentes (Hernández y Burbey, 2010, Budhu y Adiyaman, 2012). En Aguascalientes por ejemplo, los primeros reportes de fallas y subsidencia datan del año 1981 (Aranda, 1989), esto debido a daños presentados en construcciones principalmente en las zonas cercanas a los baños de Ojocaliente, debido a que por esta región se encuentra una de las fallas que delimitan el graben (Aranda y Aranda, 1986, Aranda, 1989) o semigraben (Nieto-Samaniego et al., 2005). Además desde entonces ya se consideraba a las fallas como posibles puntos de recarga hacia

el acuífero, ya fuese con agua meteórica o con agua contaminada por actividades antropogénicas. Cabe señalar que desde el año 1981 el incremento de las zonas de fallas dentro del valle de Aguascalientes se ha visto relacionado con el incremento del agua extraída del acuífero y por lo tanto el aumento del espesor de la zona vadosa. La figura 1, muestra el proceso de infiltración a través de una falla ligada a la subsidencia diferencial. Proceso se observó al norte del municipio de Aguascalientes.



Figura 1- Proceso de infiltración sobre una falla.

2.2 Descripción de la zona de estudio

2.2.1 Ubicación

El área de estudio que comprende esta investigación corresponde a parte de la cuenca del valle de Aguascalientes, dentro del estado de Aguascalientes. Esta zona abarca parte de los municipios de Cosío, Tepezalá, Rincón de Romos, Pabellón de Arteaga, San Francisco de los Romo, Jesús María y Aguascalientes, con una extensión promedio de 89 km de longitud en su orientación Norte-Sur y un promedio de 23 km de ancho, con un área total de 1, 657 km² (Figura 2).

2.2.2 Climatología

El área de estudio se caracteriza por su aridez, efecto que conlleva con una serie de resultantes que se manifiestan en el tipo de vegetación o falta de humedad en el suelo, esto debido a la escasa precipitación y a la alta evapotranspiración, aunando una mala distribución en la superficie del valle, de las corrientes superficiales perennes.

Se analizó la información de 21 estaciones ubicadas dentro del área de estudio, todas ellas administradas por la Comisión Nacional del Agua (Tabla 1).

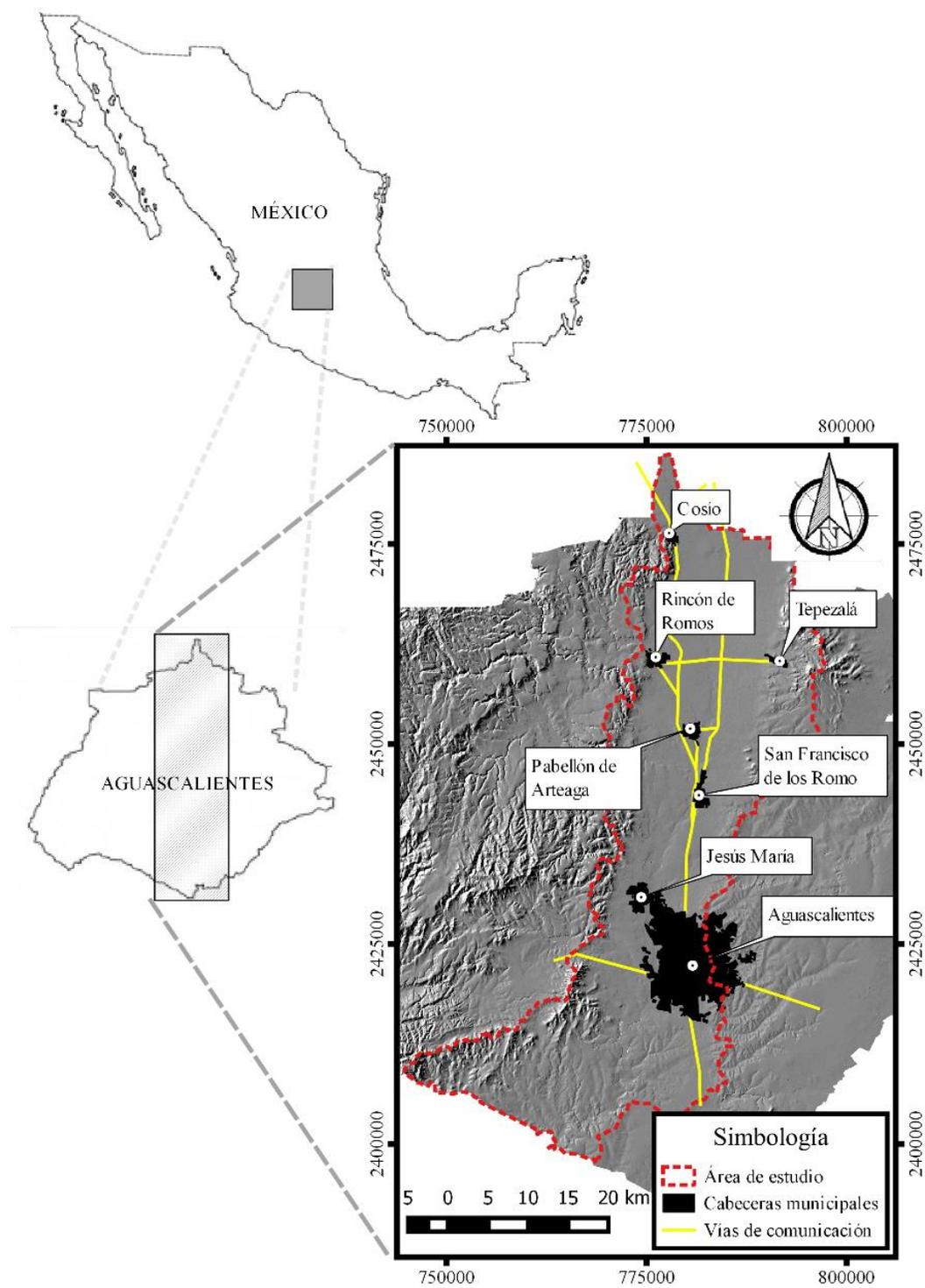


Figura 2– Localización de la zona de estudio. Se enuncian las cabeceras municipales dentro del área de estudio.

Tabla 1 - Estaciones climatológicas de la zona de estudio.

Nombre	Este	Norte	Elevación	Temperatura media anual	Precipitación media anual	Evaporación total
<i>Aguascalientes 2</i>	782573.52	2424610.47	1945.5	16.7	530.1	2175.6
<i>Aguascalientes</i>	778084.72	2423423.13	1888.7	18.4	530.5	2422.8
<i>Arellano</i>	781944.28	2413119.08	1910.7	17.5	550.7	2037.2
<i>Cieneguilla</i>	763482.62	2404956.03	1838.8	18.3	492.1	2076.1
<i>Cosío</i>	778370.33	2475197.25	2022.7	17.3	421.5	2015.7
<i>El Chayote</i>	784822.99	2466819.01	1951.2	15.7	385.9	1856.8
<i>El Ocote</i>	756692.74	2410569.15	2044.6	17.5	613.3	1894
<i>Jesús María</i>	774223.73	2430742.26	1880	17.8	457.5	1905.7
<i>La Posta UAA</i>	772367.16	2431848.88	1940.9	17.5	485.3	2145.8
<i>Los Negritos</i>	773939.96	2420581.16	1887.1	17.1	532.7	2020.4
<i>Mesillas</i>	791983.39	2469968.45	2020.5	17.7	397.7	2100.8
<i>Montoro</i>	779013.66	2408112.41	1870.5	18.5	506.5	1762.7
<i>Pabellón campo</i>	779188.32	2453512.69	1933.7	16.7	459.9	2056.8
<i>Pabellón de Arteaga</i>	780631.92	2451353.2	1929.7	18.8	453.1	1937.5
<i>Presa El Niagara</i>	771783.74	2410572.88	1844	18.2	555.8	1986.3
<i>Presa El Jocoque</i>	772384.52	2449084.01	2006.2	17.5	476.9	2024.3
<i>Puerta de la concepción</i>	795393.99	2457781.21	2322.8	16.8	540.8	1904.6
<i>Rincón de Romos</i>	776740.8	2460578.98	1965.3	16.1	403	1688.2
<i>San Francisco de los Romo</i>	781398.3	2443795.32	1909.1	18.2	421.6	2249.4
<i>Tepetatillo</i>	790837.91	2445321.53	2039.7	16.3	476.7	1884.9
<i>Tepezala</i>	791854.69	2460023.33	2110.2	17.5	447.1	2027

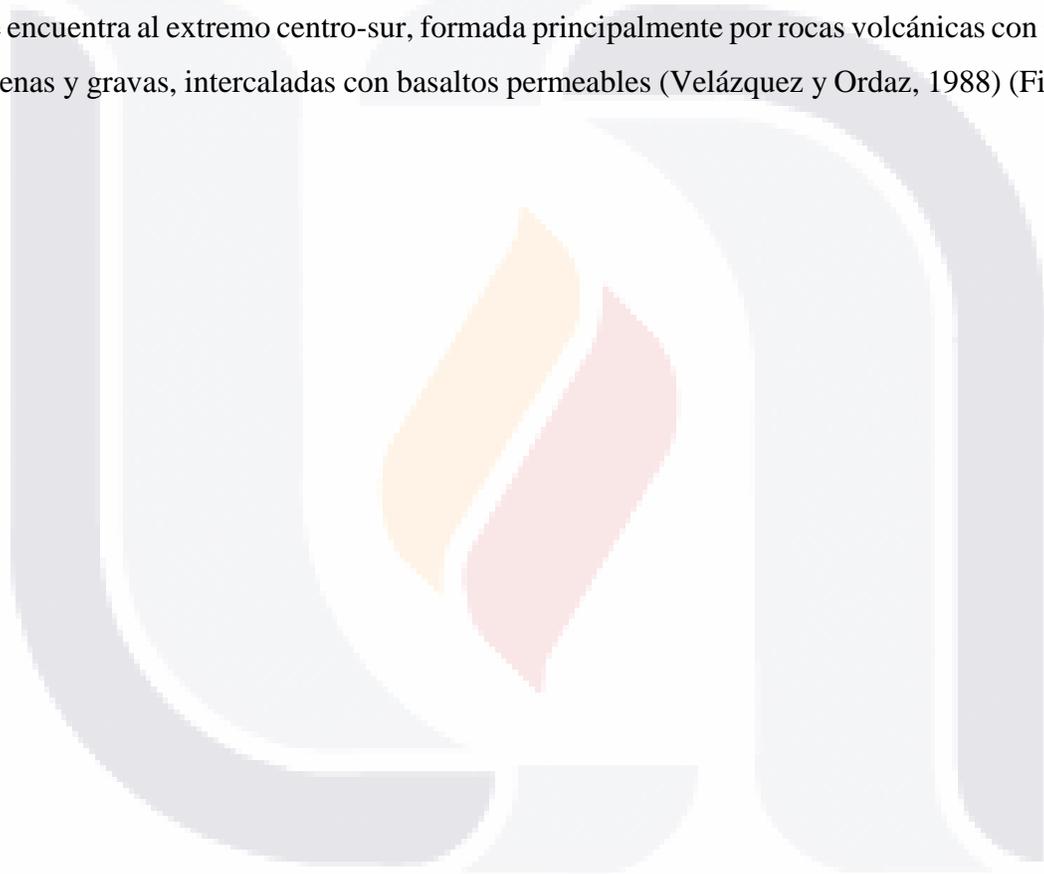
Los climas semicálidos abarcan cerca del 80% del área de estudio con una temperatura promedio anual de 18.5°C, mientras que en las serranías cercanas a Tepezalá y Cosío, predomina un clima templado con una temperatura promedio anual de 16°C (Figura 3). La precipitación pluvial media anual varía entre 400 y 600 mm en la zona de estudio (Figura 4) y una evaporación media anual de 2,200 mm, con un periodo de lluvias de junio a agosto, para el resto del año las precipitaciones que se registran son de bajo volumen.

2.2.3 Geomorfología

La geomorfología general del lugar consta de una configuración de lomeríos suaves ubicados al centro del valle, con pendientes crecientes hacia las serranías, de las cuales al poniente se encuentra la Sierra Fría y el Cerro del Muerto, mientras que al oriente se encuentra la Sierra de Tepezalá. La altitud promedio de la zona de estudio es de 1,965 msnm.

2.2.4 Fisiografía

La superficie estatal forma parte de 3 provincias fisiográficas, la Sierra Madre Occidental, la cual es un sistema que funciona principalmente como área de recarga a la Meseta Central, esta última se encuentra en la parte central y oriente del estado, la cual es determinada como una cuenca cerrada y semiárida; los principales acuíferos están conformados por sedimentos granulares donde la principal recarga viene de las rocas volcánicas y calizas de las provincias adyacentes, por último el Eje Neovolcánico en el que se encuentra al extremo centro-sur, formada principalmente por rocas volcánicas con arcillas, arenas y gravas, intercaladas con basaltos permeables (Velázquez y Ordaz, 1988) (Figura 5).



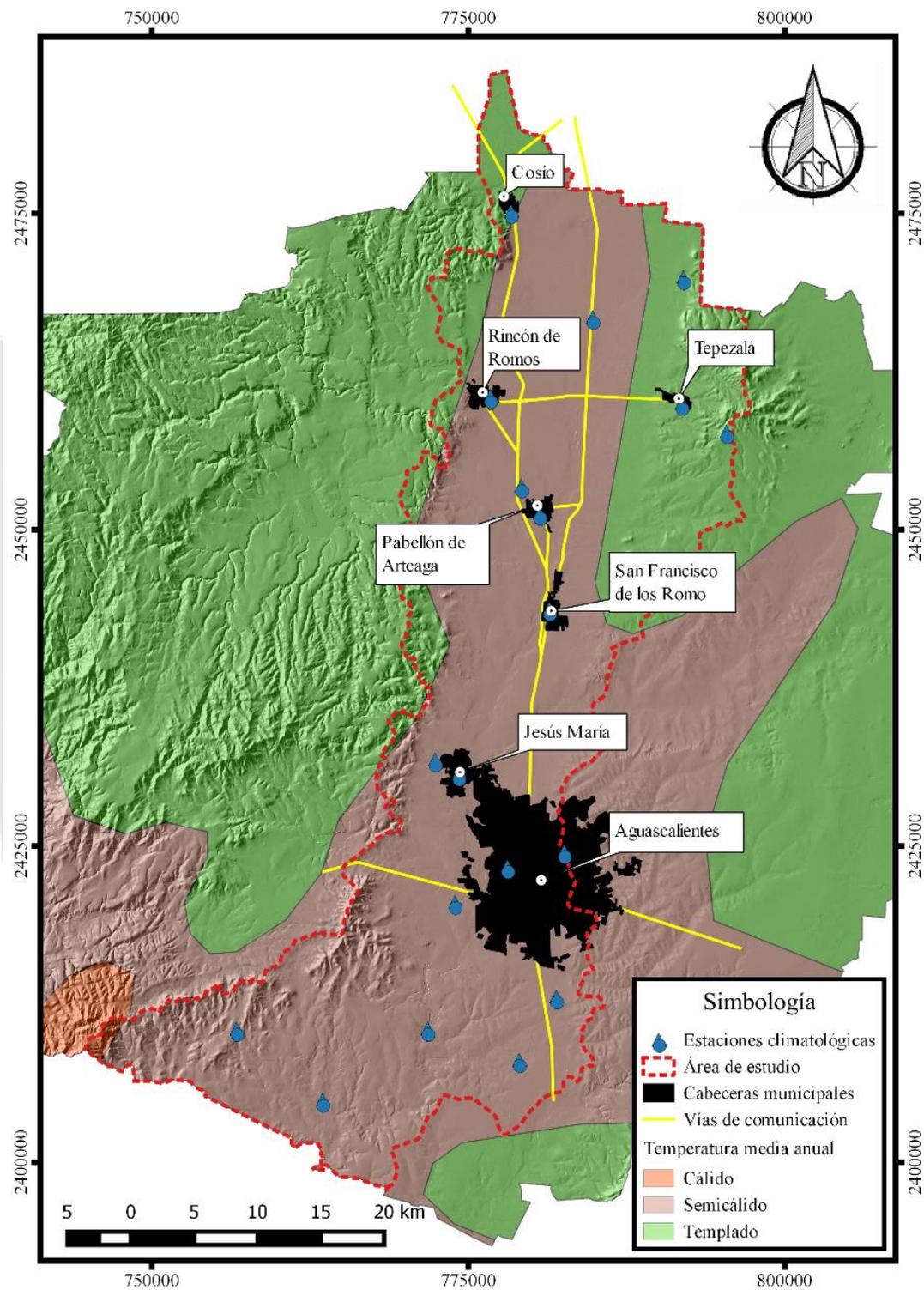


Figura 3 - Temperatura de la zona de estudio.

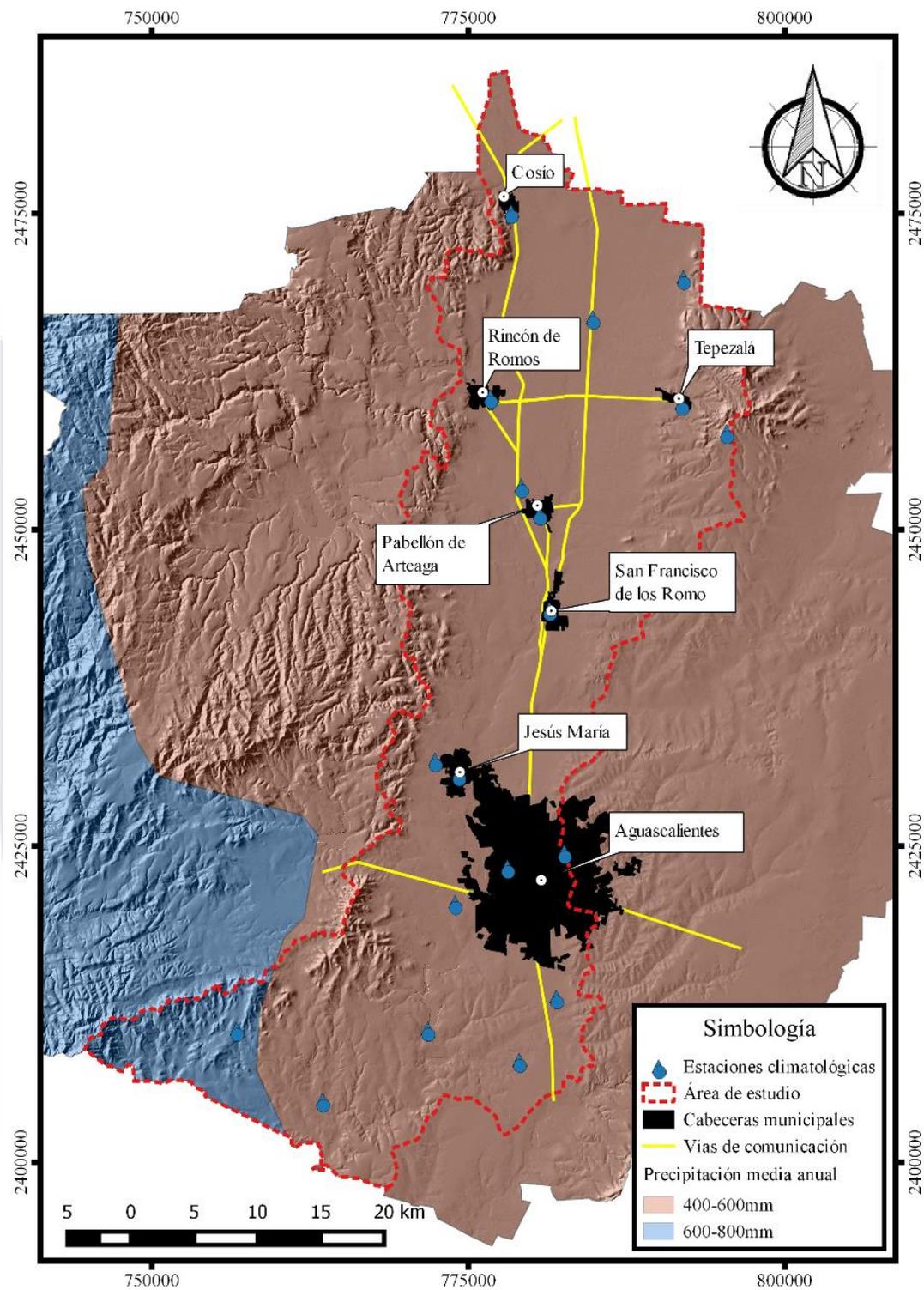


Figura 4 - Precipitación media anual de la zona de estudio.

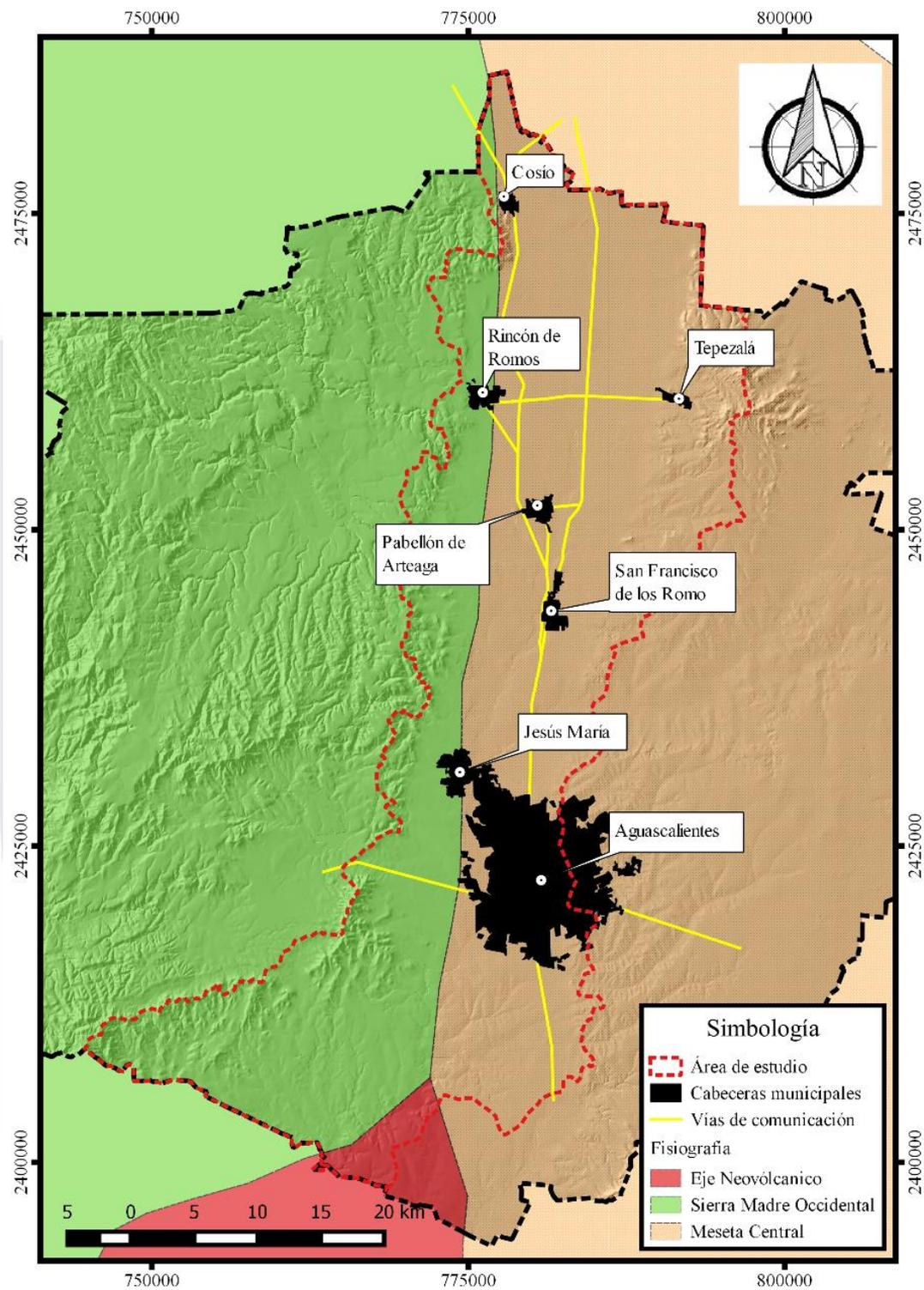


Figura 5 - Fisiografía de la zona de estudio.

2.2.5 Geología Regional y local

El área de estudio comprende tres áreas fisiográficas, la Sierra Madre Occidental ubicada al poniente, el Eje Neovolcánico al sur-poniente y en mayor medida la Mesa Central.

De acuerdo con las características fisiográficas que presenta el valle de Aguascalientes y estudios en la región, la Sierra Madre Occidental presenta alteraciones de rocas ígneas del cenozoico cubiertas en partes por depósitos residuales, formada principalmente en su base por rocas batolíticas y en la parte superior ignimbritas intercaladas con lava basáltica (INAGUA, 2013). Por otro lado, la meseta central tiene como base depósitos aluviales de espesor considerable separados por serranías compuestas por rocas sedimentarias del paleozoico y mesozoico, mientras que al límite con la Sierra Madre Occidental por rocas volcánicas del cenozoico (Velázquez y Ordaz, 1988).

De modo local, Pacheco et al., 2013, determinó una secuencia geológica del valle de Aguascalientes conformada en su parte superior sedimentos aluviales no consolidados y gravas y arenas volcanoclasticas moderadamente litificadas con un espesor de hasta 200 metros al centro del valle, donde granulométricamente se constituyen por gravas, arenas, limos y arcillas. Seguido de conglomerados y rocas ígneas fracturadas de hasta 300 metros de espesor, así también en este espesor se encuentran minerales como calcitas, moscovitas, cuarzos, feldespatos entre otros.

2.2.6 Geología estructural.

La principal estructura del valle de Aguascalientes consiste en un graben de origen tectónico, aunque Nieto-Samaniego et al (2005) lo consideran como semigraben tectónico, asociado con el graben de Bolaños y el graben de Villa de Reyes, formados por el sistema de fallamiento normal de la región centro-occidental (Castañeda et al., 1993).

El graben de Aguascalientes se encuentra delimitado por dos fallas regionales con rumbos preferenciales N y N30°E. La falla principal se localiza al poniente del valle y es de aproximadamente 150 km de longitud. Por su parte al lado al oriente de la ciudad se encuentra la discontinuidad de 70 km aproximados (figura 6). Se debe agregar que la aparición superficial de nuevos agrietamientos y fallas, tanto en dirección preferencial norte-

sur como poniente-oriente, se atribuye a la sobreexplotación del acuífero y a formaciones estructurales bajo el relleno aluvial y no como evidencia de un graben tectónico activo (Aranda, 1989); (Pacheco, 2012) y (Castañeda et al., 1996).



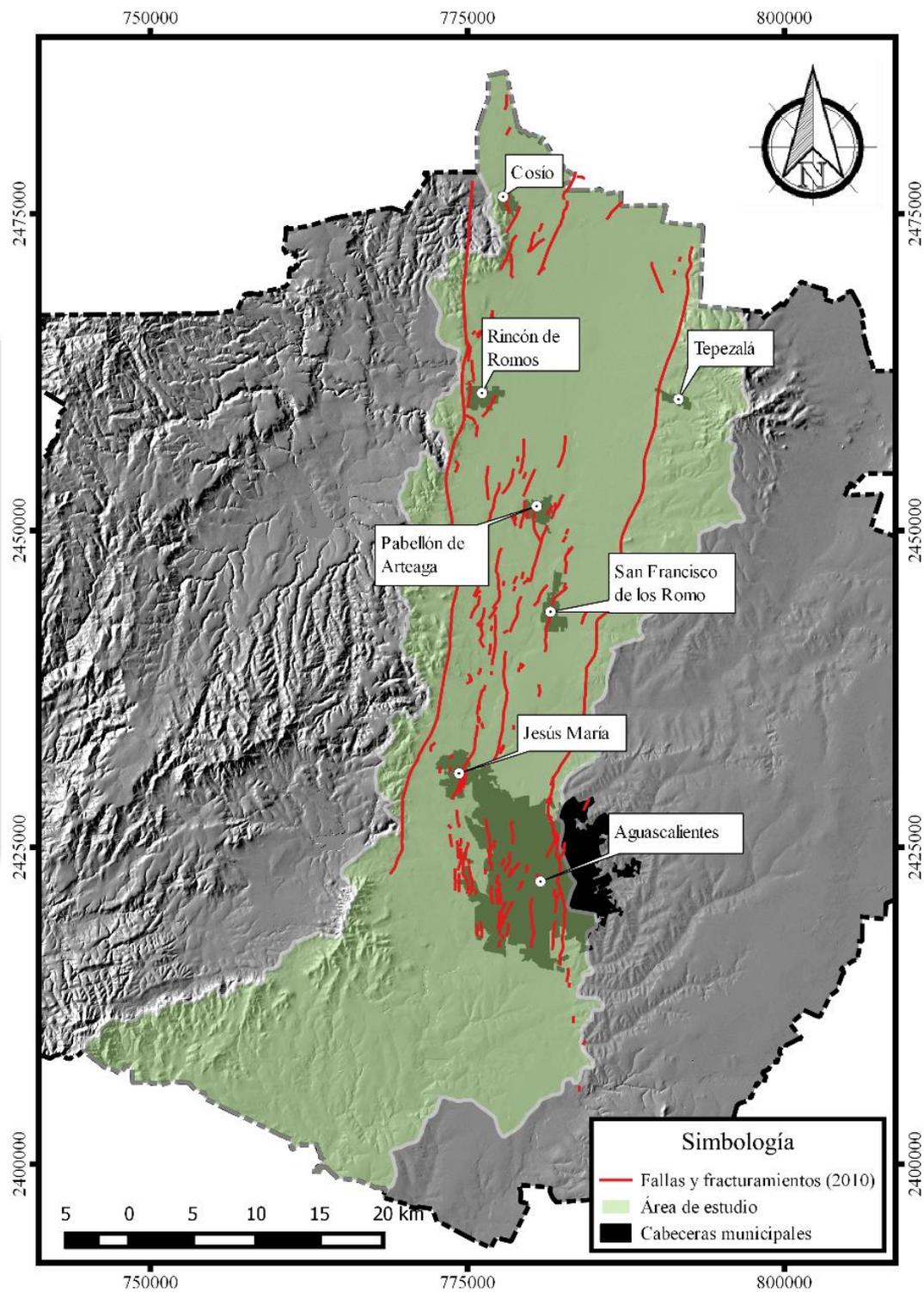


Figura 6 - Fallas y fracturamiento sobre el área de estudio para el año 2010.

2.2.7 Hidrografía

Las corrientes superficiales más importantes en el área de estudio, son los ríos San Pedro, Chicalote y Morcinique, ubicados dentro de la región hidrológica Lerma-Chapala-Santiago. La columna vertebral de la hidrografía en el valle de Aguascalientes es el río San Pedro, de manera natural el cauce solo lleva agua durante unos meses, sin embargo debido a la gran cantidad de plantas de tratamiento, este acarrea agua durante todo el año. Se estima que el escurrimiento anual es de 130 millones de metros cúbicos para una cuenca con extensión de 4,330 km² (INAGUA, 2013).

2.2.8 Hidrogeología

La investigación se ubica dentro del acuífero del valle de Aguascalientes, con límites al norte con Zacatecas y al sur con Jalisco. Al norte esta zona se observan rocas sedimentarias, consolidadas y no consolidadas, así como rocas ígneas extrusivas e intrusivas que van desde permeables hasta impermeables. Los acuíferos fracturados formados en rocas volcánicas riolíticas constan de una permeabilidad anisotrópica, debida al fracturamiento que presentan. Otro rasgo de los acuíferos fracturados riolíticos en esta zona es el hidrotermalismo donde la temperatura del agua alcanza temperaturas mayores a los 35°C (Velázquez y Ordaz, 1988).

Al centro del área de estudio, los acuíferos granulares están conformados de depósitos aluviales, los cuales consisten de clásticos consolidados y no consolidados, intercalados con rocas volcánicas, donde prevalecen las ignimbritas (Castañeda et al., 1996).

Diversos estudios categorizan al acuífero como libre y semiconfinado, con una dirección de flujo norte-sur y una entrada lateral al sur-oeste (Arroyo et al., 2003). Pruebas de bombeo en el acuífero han determinado que la conductividad hidráulica vertical para el acuífero libre de 0.021 m/d a 0.138 m/d, así como un coeficiente de almacenamiento que varían de 0.10 a 0.16 y una infiltración vertical natural de 140 Mm³(CONAGUA, 2009). Para el año 2015 el nivel estático del agua subterránea promediaba cerca de los 120 metros para todo el acuífero (figura 7).

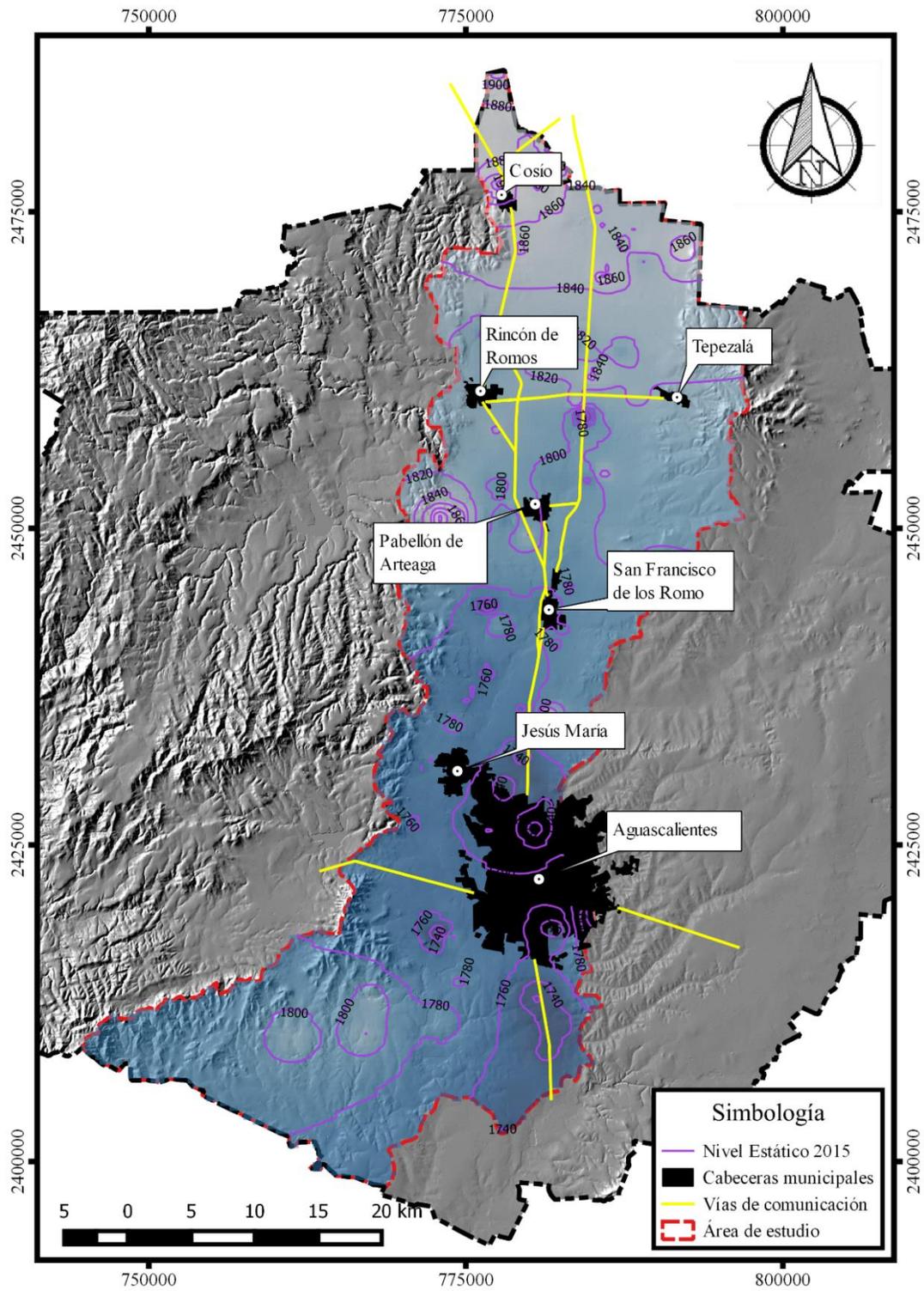


Figura 7 - Elevación estática para el acuífero del valle de Aguascalientes, año 2015.

2.3 Hidrogeología de la zona vadosa

La hidrogeología de la zona vadosa en el valle de Aguascalientes no ha sido factor de gran investigación a pesar del impacto que esta zona tiene en los procesos hidrológicos y mecánicos ya mencionados. La información para esta zona de estudio es escasa o nula, por lo que, si se requiere hacer algún análisis hidrogeológico cuantitativo de la zona, es necesario adoptar parámetros de cuencas semejantes o categorizar a partir de datos granulométricos con la ayuda de programas computacionales como ROSSETA, creado por el Laboratorio de Salinidad de Estados Unidos (Marcel et al., 2001). Con este programa podemos estimar valores hidráulicos, como parámetros de retención de agua, importantes para la aplicación de las curvas de retención, entre las que destacan las del investigador T. van Genuchten, y que a su vez son sustanciales para la aplicación de la ecuación de Richard, la cual se describe a continuación.

2.3.1 Ecuación de Richards

Con respecto a la física aplicada sobre la zona no saturada, destaca la ecuación de Richards, formulada en 1931 como una alternativa a la ley de Darcy, con el objetivo de entender el flujo vertical y dispersión de dióxido de carbono a través de un medio no saturado, utilizando el contenido volumétrico de agua y la difusividad (ecuación 1) (Richards, 1931), para determinar el contenido volumétrico a través del tiempo y con esta determinar el tiempo de trayecto sobre la franja de estudio (Pachepsky et al., 2003).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right]$$

Ecuación 1 – Ecuación de Richards tradicional.

Donde θ es el contenido volumétrico del agua ($m^3 m^{-3}$), D es la difusividad ($m^2 s^{-1}$), z es la altura con respecto a un plano de referencia (m) y t es el tiempo (s).

Con el tiempo, diferentes autores propusieron alternativas a la ecuación anterior, modificando la difusividad por el potencial hidráulico, basados en que cada tipo de suelo tiende a modificar la conductividad hidráulica dependiendo del potencial hidráulico y esta a

su vez depende principalmente del contenido de humedad del suelo, factor principal en la hidráulica de la zona vadosa (van Genuchten, 1980), quedando así la ecuación 2.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right]$$

Ecuación 2 – Ecuación de Richards modificada.

Donde K es la conductividad hidráulica (m s^{-1}) y ψ es el potencial hidráulico (Pa).

2.3.2 Curvas características de retención de humedad

Con la finalidad de facilitar la aplicación de la ecuación de Richards, investigadores como van Genuchten (1980) y Brooks y Corey (1966) han trabajado en la caracterización de diferentes tipos de suelos, desarrollando curvas características donde relacionan el contenido de humedad y el potencial hidráulico, la ecuación 3 muestra el modelo matemático utilizado por van Genuchten.

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\psi|^n)]^{1-1/n}}$$

Ecuación 3 – Modelo matemático de van Genuchten para determinar curvas características de retención de humedad.

Donde θ_r es el contenido de humedad residual en el suelo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_s es el contenido de humedad saturado del suelo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), ψ es el potencial hidráulico (Pa), α es la relación de succión de aire con respecto a la entrada de líquido ($1/\text{m}$) y n es la medida de la distribución y tamaño del poro.

Estas curvas presentan una característica llamada histéresis, donde para un mismo contenido de humedad, el suelo retiene agua con diferente grado de presión hidráulica, a este fenómeno se le ha dado importancia en la agricultura, ya que es un fenómeno que puede optimizar el sistema de riego. En la figura 8 se muestra una representación de una curva característica de humedad con el fenómeno de histéresis.

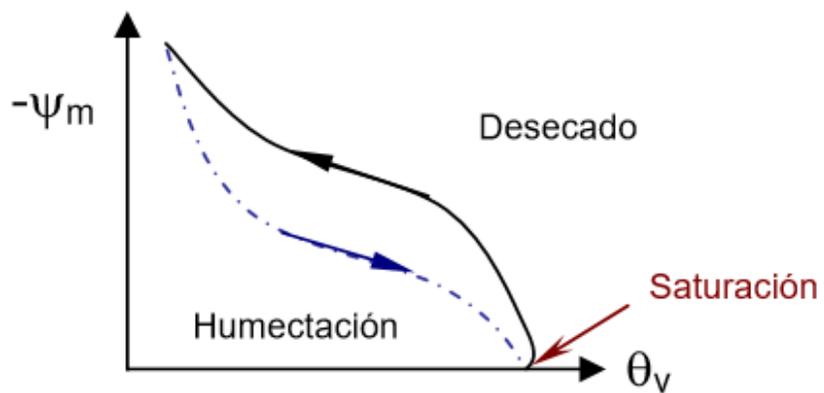
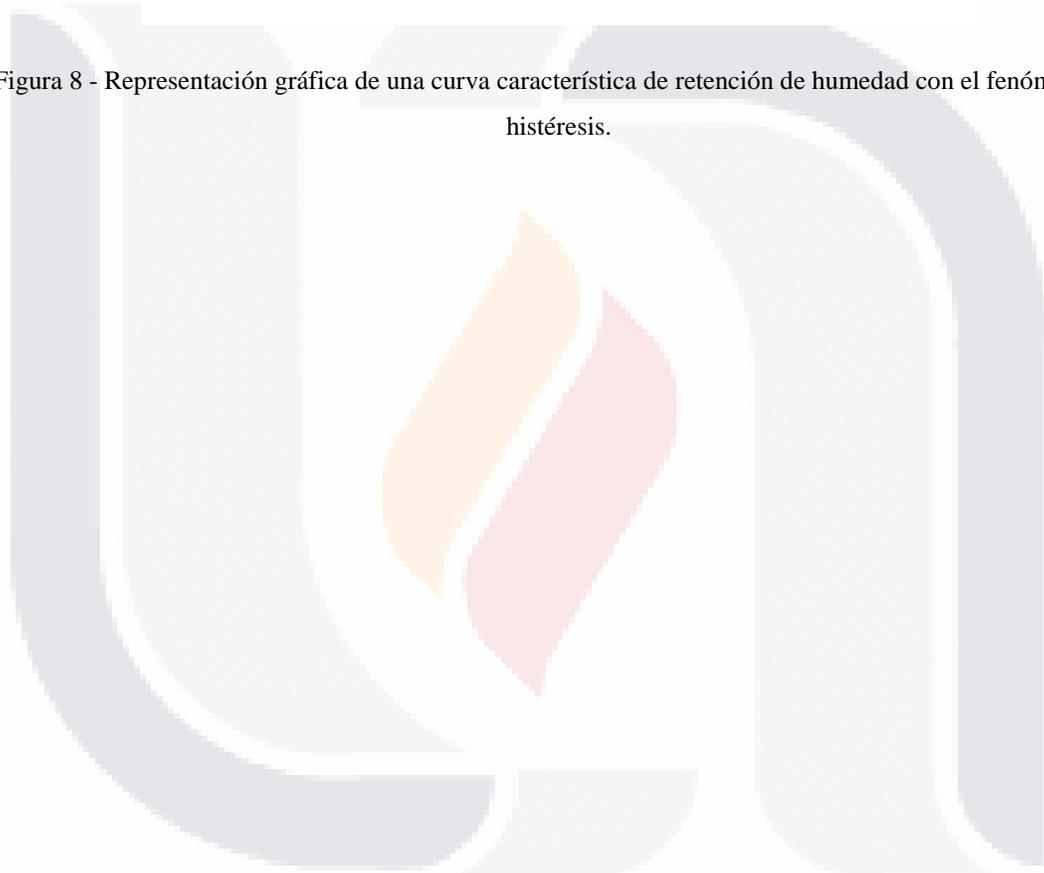


Figura 8 - Representación gráfica de una curva característica de retención de humedad con el fenómeno de histéresis.



2.4 Geofísica

La geofísica en el estudio de la zona vadosa ha contribuido a optimizar los procesos de exploración y ayudado con la caracterización de suelos a través de diferentes métodos, entre los más utilizados se encuentran los métodos eléctricos debido a la estrecha relación entre la resistividad eléctrica y la conductividad hidráulica. Entre los diferentes métodos eléctricos, los sondeos eléctricos verticales son conocidos por la sencillez de aplicación y la profundidad de respuesta, donde el principal objetivo es determinar configuración estratigráfica en el subsuelo, a través de espesores y resistividades (Brunet et al., 2010). Cabe mencionar que los sondeos eléctricos también son utilizados para la realización de secciones eléctricas con el objetivo de determinar zonas con características eléctricas similares.

Los métodos eléctricos han sido reconocidos como un método no invasivo para el estudio del subsuelo, donde sus principales aplicaciones han sido determinar espesores de suelo, profundidades del lecho rocoso, cuantificación de propiedades hidrológicas del suelo, estudios para pozos de agua subterránea, entre otros (Dafonte et al., 2010). Sin embargo, como Friedman (2005) expone, la resistividad se ve afectada por factores como, la porosidad, el contenido de agua, la distribución y tamaño de las partículas, contenido de minerales, composición química del suelo, temperatura, entre otros, por lo que es necesario contar con estudios geológicos previos para una correcta interpretación de los resultados, en la figura 9 se muestra la resistividad de diferentes tipos de materiales.

Estudios como el de Dafonte et al. (2010) y Estévez et al. (2010) son un ejemplo de la caracterización hidrogeológica de la zona vadosa definiendo las unidades por sus valores de resistividad eléctrica y estudios geológicos regionales. Así también se encuentra el estudio de Llanos (2009), realizado sobre el área fracturada del acuífero del valle de Toluca, donde se utilizan sondeos verticales para obtener características litológicas y formar secciones hidrogeológicas para modelar flujo de contaminantes a través de la zona vadosa. La figura 10 muestra el resultado de la interpretación de una sección eléctrica construida a partir de cinco sondeos eléctricos verticales.

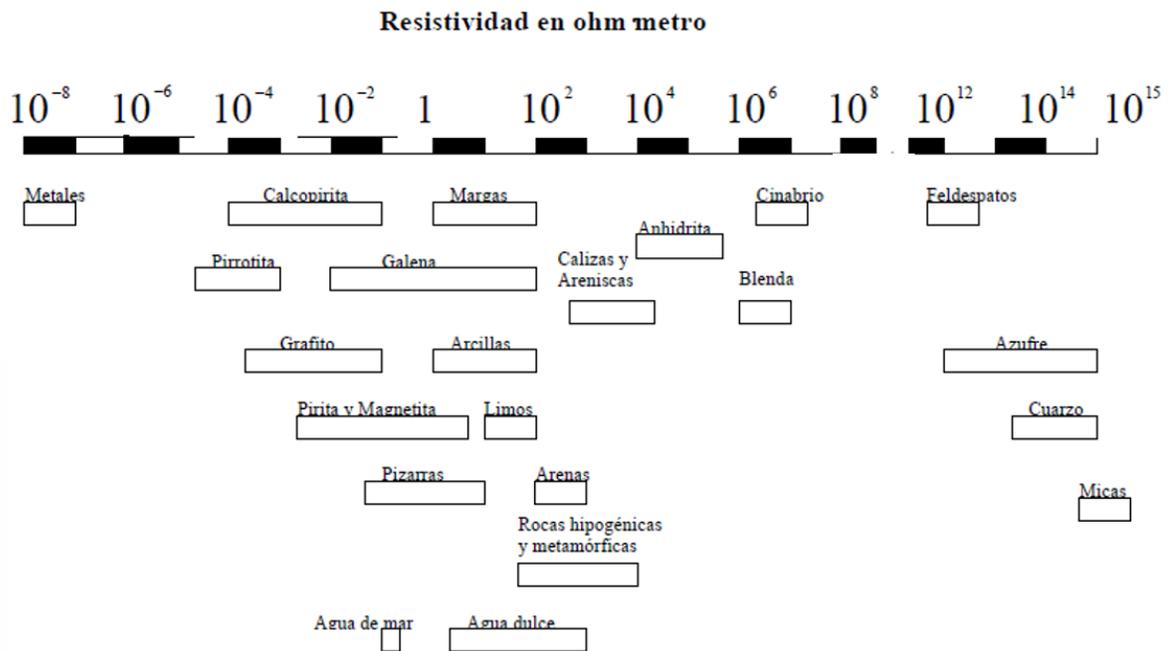
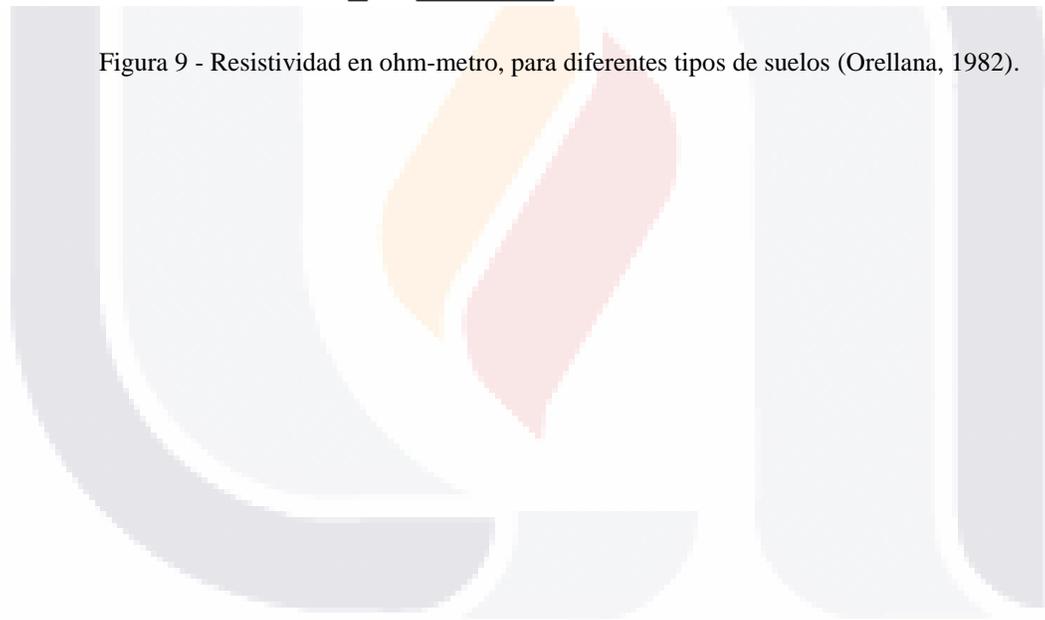


Figura 9 - Resistividad en ohm-metro, para diferentes tipos de suelos (Orellana, 1982).



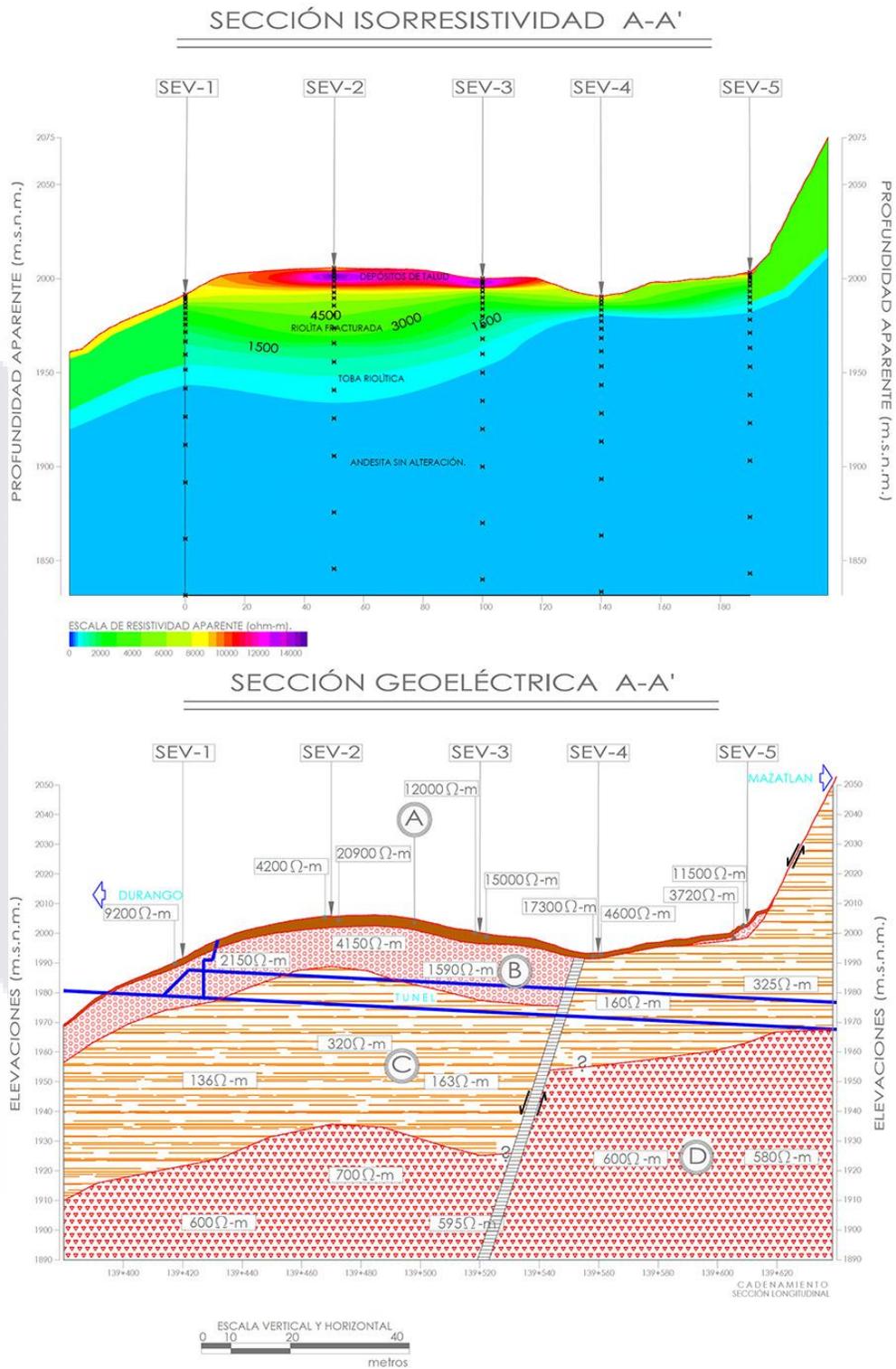


Figura 10 - Sección de igual resistividad y su interpretación geoelectrica. Tomada de “Geofísica | EPYESA”, (2016).

CAPITULO III. Marco metodológico

La metodología utilizada para lograr los objetivos propuestos ha sido estructurada en tres etapas. La primera etapa estuvo orientada a definir las características geohidrológicas, a través de la litología de registros históricos de perforaciones de pozos, 35 sondeos eléctricos verticales facilitados por la empresa privada GEO “Geofísica aplicada a la geotecnia” y estudios geológicos de la zona. En la segunda etapa, se orientó en definir características hidráulicas de la zona vadosa a través de estudios granulométricos para la aplicación del programa ROSETTA. La tercera etapa, se relacionó con la configuración de los modelos conceptuales para la adaptación de simulaciones numéricas.



3.1 Caracterización hidrogeológica

Para definir las características hidrogeológicas del área de estudio se comenzó con la obtención de datos litológicos de la CONAGUA. La Comisión facilitó un archivo en formato de hoja de cálculo con el registro de 207 perforaciones de pozos con información litológica y geográfica.

Para comenzar con el análisis de la información, fue forzoso observar de forma gráfica la distribución de los pozos para determinar la división de las secciones, por lo que fue necesario la utilización de programas que manejaran información geográfica, en este caso se utilizó el programa Qgis, el cual es un programa de código libre, de fácil adquisición y práctico aprendizaje.

En la tabla 2 se muestra el resumen de la información de los pozos utilizados en el análisis. El proceso realizado para graficar la posición geográfica de los sondeos eléctricos verticales fue el mismo utilizado para la información de pozos. La tabla 3 muestra la información geográfica de los sondeos eléctricos. La interpretación de los sondeos fue a través del software IPI2WIN desarrollado por el departamento de geofísica de la Universidad Estatal de Moscú. En la figura 11 y 12 se muestra la distribución de la información de pozos y sondeos eléctricos respectivamente.

Tabla 2 - Información geográfica resumida de la perforación de pozos utilizados en el análisis.

<i>Nombre</i>	<i>Longitud</i>	<i>Latitud</i>	<i>UTM X</i>	<i>UTM Y</i>	<i>Elevación</i>	<i>Profundidad</i>
7	-102.27	22.09	781,328.82	2,444,471.21	1,891.00	160.00
PO-10	-102.29	22.33	778,874.89	2,471,020.32	1,962.00	222.00
21	-102.24	22.08	784,944.06	2,444,444.01	1,938.00	182.00
27	-102.31	22.00	777,858.72	2,434,652.90	1,894.00	200.00
PO-58	-102.27	21.76	782,113.19	2,408,443.83	1,893.00	210.00
PO-68	-102.31	22.10	777,347.29	2,445,754.65	1,921.00	400.00
PO-70	-102.36	21.76	772,689.52	2,408,033.97	1,813.00	258.00
PO-71	-102.31	21.67	778,698.50	2,398,135.28	1,824.00	293.00
74	-102.36	21.92	773,161.12	2,425,768.87	1,905.00	200.00
PO-85	-102.31	22.27	777,546.68	2,465,210.09	1,956.00	216.00

<i>Nombre</i>	<i>Longitud</i>	<i>Latitud</i>	<i>UTM X</i>	<i>UTM Y</i>	<i>Elevación</i>	<i>Profundidad</i>
PO-88	-102.28	22.37	779,789.76	2,475,869.18	1,975.00	199.60
PO-90	-102.29	22.29	779,089.32	2,467,053.65	1,949.00	250.00
90	-102.23	22.20	785,683.97	2,457,354.35	1,946.00	250.00
PO-93	-102.19	22.33	789,048.40	2,472,222.19	1,963.00	203.00
PO-136	-102.25	22.11	783,681.14	2,447,653.01	1,917.00	350.00
137	-102.38	21.89	770,477.14	2,423,168.47	1,909.00	210.00
PO-151	-102.26	22.40	781,711.40	2,478,828.12	1,967.00	250.00
PO-153	-102.23	22.36	785,217.29	2,474,983.16	1,950.00	250.00
PO-162	-102.25	22.19	784,081.90	2,455,601.45	1,916.00	180.00
PO-172	-102.36	21.97	772,231.62	2,431,384.89	1,906.00	250.00
PO-178	-102.29	21.68	780,651.33	2,399,985.15	1,861.00	350.00
185	-102.32	22.02	776,458.77	2,437,552.16	1,884.00	84.00
189	-102.26	22.18	782,464.47	2,454,679.54	1,912.00	205.00
207	-102.25	22.05	784,156.50	2,440,397.64	1,928.00	72.00
287	-102.25	22.04	783,401.34	2,439,306.76	1,921.00	150.00
290	-102.32	22.09	776,669.92	2,445,127.15	1,923.00	250.00
309	-102.34	22.10	774,971.00	2,445,497.42	1,956.00	225.00
310	-102.20	22.23	788,355.15	2,460,173.73	1,992.00	250.00
316	-102.23	22.19	785,829.54	2,455,664.09	1,948.00	250.00
326	-102.28	22.15	780,424.10	2,451,749.60	1,920.00	246.00
352	-102.29	22.29	779,308.47	2,467,611.61	1,952.00	200.00
364	-102.29	22.39	778,881.80	2,478,592.19	1,984.00	500.00
399	-102.32	21.97	776,394.37	2,431,395.58	1,865.00	103.00
410	-102.24	22.14	785,176.34	2,450,604.21	1,938.00	245.00
414	-102.32	22.42	776,027.51	2,481,341.89	2,018.00	144.00
417	-102.26	21.79	782,953.53	2,411,321.04	1,915.00	286.00
422	-102.28	21.75	781,450.42	2,406,893.27	1,882.00	228.00
432	-102.31	22.01	777,744.46	2,436,251.32	1,889.00	220.00
435	-102.22	22.34	786,281.26	2,473,186.68	1,948.00	70.00
484	-102.20	22.29	788,558.69	2,467,749.73	1,961.00	201.00
508	-102.31	22.07	777,485.48	2,442,802.42	1,910.00	306.00
620	-102.25	22.21	783,253.99	2,458,572.08	1,912.00	200.00
632	-102.24	22.27	783,975.07	2,464,618.09	1,926.00	168.00
635	-102.33	22.00	775,299.42	2,434,915.82	1,878.00	100.00
678	-102.33	22.02	775,581.20	2,436,859.69	1,888.00	150.00
705	-102.24	22.11	784,458.12	2,447,513.18	1,923.00	185.00
706	-102.24	22.10	785,110.74	2,446,324.61	1,931.00	210.00
710	-102.19	22.33	789,048.40	2,472,222.19	1,963.00	203.00
719	-102.28	22.10	781,153.48	2,446,253.24	1,892.00	300.00

<i>Nombre</i>	<i>Longitud</i>	<i>Latitud</i>	<i>UTM X</i>	<i>UTM Y</i>	<i>Elevación</i>	<i>Profundidad</i>
745	-102.28	22.21	780,708.84	2,458,249.10	1,923.00	248.00
809	-102.28	21.79	780,984.63	2,412,117.23	1,886.00	195.00
828	-102.30	21.80	779,476.26	2,412,890.93	1,876.00	200.00
871	-102.29	22.39	778,881.25	2,478,622.96	1,984.00	194.00
984	-102.31	22.00	778,226.34	2,434,967.15	1,898.00	380.00
1027	-102.32	22.00	776,273.98	2,434,994.40	1,872.00	130.00
1068	-102.31	22.02	778,037.83	2,437,518.38	1,879.00	50.00
1135	-102.30	21.92	779,135.87	2,425,719.11	1,890.00	450.00
1167	-102.30	21.95	779,271.18	2,429,445.59	1,889.00	250.00
1256	-102.25	22.10	783,338.94	2,445,953.96	1,915.00	212.00
1276	-102.22	22.26	786,537.28	2,463,957.07	1,948.00	193.00
1312	-102.31	21.73	777,982.37	2,404,585.89	1,867.00	200.00
1376	-102.29	22.02	779,673.22	2,437,547.31	1,900.00	150.00
1379	-102.27	22.24	781,803.85	2,461,100.54	1,923.00	200.00
1397	-102.30	22.25	778,534.17	2,462,857.75	1,943.00	200.00
1434	-102.28	21.76	781,275.81	2,408,644.51	1,890.00	160.00
1561	-102.27	21.74	782,325.88	2,406,170.05	1,885.00	250.00
1636	-102.27	22.37	780,826.24	2,475,549.35	1,968.00	262.00
1669	-102.36	21.97	772,653.11	2,431,915.35	1,914.00	400.00
1692	-102.32	22.24	776,034.73	2,461,612.93	1,956.00	200.00
1719	-102.24	22.36	783,821.51	2,474,588.16	1,952.00	166.00
1785	-102.29	22.01	779,587.37	2,435,914.55	1,896.00	150.00
1843	-102.31	22.10	777,998.12	2,446,258.61	1,910.00	100.00
1861	-102.26	22.16	782,133.49	2,452,365.11	1,902.00	204.00
1880	-102.27	22.16	781,414.67	2,452,475.29	1,900.00	295.00
1964	-102.32	22.14	776,380.82	2,450,138.83	1,928.00	120.00
1967	-102.31	22.12	777,868.49	2,448,718.56	1,903.00	248.00
1975	-102.30	22.14	778,806.07	2,450,828.14	1,923.00	250.00
2002	-102.30	21.81	779,427.02	2,414,059.60	1,869.00	200.00
2013	-102.28	22.13	780,751.00	2,449,508.60	1,911.00	210.00
2023	-102.24	22.23	784,801.29	2,460,170.02	1,929.00	400.00
2041	-102.22	22.16	786,768.75	2,452,911.03	1,965.00	241.40
2054	-102.23	22.08	786,323.49	2,444,315.19	1,960.00	230.00
2069	-102.34	21.99	775,109.29	2,434,296.96	1,888.00	158.00
2179	-102.33	22.08	775,769.55	2,444,126.44	1,939.00	250.00
2234	-102.26	22.35	781,966.56	2,474,246.51	1,956.00	80.00
2411	-102.31	21.78	778,375.70	2,410,070.98	1,862.00	220.00
2508	-102.31	21.95	777,952.88	2,429,299.26	1,875.00	180.00
2597	-102.27	21.81	782,011.98	2,414,166.70	1,893.00	200.00

<i>Nombre</i>	<i>Longitud</i>	<i>Latitud</i>	<i>UTM X</i>	<i>UTM Y</i>	<i>Elevación</i>	<i>Profundidad</i>
2824	-102.34	21.94	774,384.44	2,428,098.24	1,892.00	100.00
2946	-102.29	22.31	778,739.56	2,468,986.46	1,968.00	162.00
3056	-102.29	22.37	778,805.58	2,476,467.02	1,987.00	250.00
3418	-102.29	22.08	779,309.05	2,443,511.82	1,900.00	200.00
4341	-102.31	22.46	776,982.93	2,485,514.19	2,010.00	250.00
4568	-102.23	22.12	786,056.57	2,447,942.38	1,946.00	400.00
4603	-102.32	22.11	776,069.34	2,446,655.46	1,916.00	202.00
1009-1	-102.29	21.88	779,701.02	2,421,358.65	1,876.00	210.00
PO-174-A	-102.24	21.89	785,679.33	2,422,819.37	1,972.00	250.00
185-A	-102.28	21.74	781,751.99	2,406,098.37	1,881.00	350.00
PO-41-A	-102.33	22.00	775,907.94	2,434,587.90	1,878.00	270.00
PO-7-A	-102.23	22.35	785,813.59	2,473,701.33	1,948.00	150.00
CO-7	-102.29	22.41	778,796.84	2,480,129.63	1,984.00	250.00
con-1	-102.29	22.45	778,606.90	2,484,312.25	1,992.00	350.00
JM-1	-102.35	21.96	773,535.41	2,430,699.54	1,883.00	350.00
JM-18	-102.28	21.95	780,503.34	2,429,590.50	1,903.00	500.00
JM-23	-102.32	21.96	776,745.79	2,431,001.62	1,874.00	300.00
JM-5	-102.36	21.95	772,952.31	2,429,550.74	1,890.00	344.00
P-006	-102.28	21.92	780,803.38	2,425,625.46	1,903.00	258.00
P-009	-102.26	21.90	783,222.85	2,423,637.13	1,948.00	300.00
P-011	-102.24	21.89	785,668.81	2,423,403.98	1,987.00	400.00
P-014	-102.27	21.90	782,274.10	2,423,681.77	1,923.00	400.00
P-030	-102.30	21.90	779,457.70	2,423,755.01	1,878.00	400.00
P-034	-102.31	21.86	777,980.31	2,419,543.36	1,854.00	500.00
P-037	-102.31	21.87	778,499.62	2,421,060.54	1,861.00	400.00
P-040	-102.28	21.89	780,715.91	2,422,453.78	1,884.00	401.00
P-045	-102.29	21.91	779,866.18	2,425,024.10	1,889.00	450.00
P-049	-102.27	21.90	781,923.48	2,424,014.10	1,914.00	552.00
P-059	-102.26	21.88	783,076.35	2,422,187.93	1,901.00	300.00
P-061	-102.26	21.88	783,464.54	2,421,363.84	1,913.00	450.00
P-067	-102.32	21.89	777,342.95	2,423,133.13	1,862.00	500.00
P-069	-102.27	21.91	781,618.28	2,425,024.35	1,911.00	80.00
P-072	-102.30	21.85	778,928.07	2,417,928.77	1,863.00	536.00
P-082	-102.31	21.85	777,634.84	2,417,936.92	1,854.00	228.00
P-086	-102.31	21.92	777,399.66	2,426,458.05	1,873.00	500.00
P-087	-102.26	21.95	782,980.86	2,429,142.17	1,952.00	500.00
P-092	-102.26	21.89	783,147.68	2,423,020.22	1,912.00	252.00
P-096	-102.23	21.84	785,856.84	2,417,744.02	1,952.00	300.00
P-101	-102.32	21.87	777,330.13	2,420,578.42	1,851.00	100.00

<i>Nombre</i>	<i>Longitud</i>	<i>Latitud</i>	<i>UTM X</i>	<i>UTM Y</i>	<i>Elevación</i>	<i>Profundidad</i>
P-104	-102.26	21.81	782,845.81	2,414,150.71	1,910.00	500.00
P-109	-102.31	21.93	777,739.33	2,426,741.00	1,874.00	230.00
P-112	-102.30	21.92	779,069.77	2,426,210.38	1,890.00	288.00
P-114	-102.31	21.89	778,411.95	2,422,782.53	1,866.00	438.00
P-116	-102.25	21.91	783,915.98	2,425,034.56	1,938.00	500.00
P-118	-102.32	21.93	777,153.28	2,427,407.83	1,871.00	650.00
P-120	-102.28	21.91	781,410.72	2,425,390.00	1,911.00	500.00
P-125	-102.27	21.86	782,583.23	2,419,224.43	1,918.00	450.00
P-126	-102.26	21.86	783,242.81	2,419,297.73	1,939.00	370.00
P-127	-102.26	21.92	783,430.68	2,426,472.47	1,959.00	550.00
P-128	-102.27	21.94	782,385.15	2,428,731.41	1,942.00	500.00
P-129	-102.26	21.87	783,453.94	2,420,347.96	1,908.00	404.00
P-130	-102.25	21.86	784,382.44	2,419,841.31	1,931.00	450.00
P-131	-102.26	21.85	783,599.58	2,418,626.96	1,939.00	400.00
P-132	-102.25	21.87	784,653.15	2,420,769.52	1,918.00	300.00
P-133	-102.25	21.85	784,297.82	2,418,146.98	1,972.00	500.00
P-134	-102.28	21.86	781,621.67	2,419,976.81	1,882.00	450.00
PA-10	-102.28	22.15	780,857.94	2,451,541.92	1,915.00	350.00
PA-9	-102.28	22.15	780,829.28	2,451,541.41	1,915.00	350.00
PAB-1	-102.24	22.23	784,801.29	2,460,170.02	1,929.00	400.00
PAB-13	-102.39	21.80	769,733.04	2,412,846.18	1,880.00	250.00
PAB-14	-102.29	22.40	778,878.47	2,478,776.80	1,983.00	194.00
PAB-15	-102.31	21.72	778,042.01	2,404,463.82	1,865.00	200.00
PAB-19	-102.29	22.37	778,921.16	2,476,407.55	1,985.00	223.50
PAB-20	-102.30	22.27	778,405.88	2,465,225.44	1,949.00	216.00
PAB-22	-102.35	21.84	773,544.50	2,416,850.43	1,953.00	143.35
PAB-23	-102.28	22.37	779,818.38	2,475,869.69	1,975.00	199.60
PAB-24	-102.17	22.33	791,515.17	2,472,022.07	1,987.00	230.00
PAB-25	-102.29	22.29	779,118.51	2,467,023.39	1,948.00	250.00
PAB-27	-102.26	21.77	783,299.70	2,409,634.40	1,903.00	286.00
PAB-28	-102.20	22.33	788,760.96	2,472,278.40	1,957.00	203.00
PAB-3	-102.31	22.10	777,545.30	2,445,912.04	1,911.00	400.00
PAB-38	-102.37	21.88	771,421.82	2,421,676.60	1,905.00	254.00
PAB-44	-102.17	22.31	791,447.43	2,469,527.42	1,994.00	187.00
PAB-45	-102.25	21.82	784,445.59	2,414,702.42	1,947.00	436.00
PAB-46	-102.38	21.89	771,240.05	2,422,227.45	1,904.00	591.41
PAB-5	-102.36	21.76	772,719.31	2,407,972.92	1,812.00	258.00
PAB-9	-102.31	21.85	777,574.17	2,418,120.52	1,855.00	329.00
PMX-107	-102.02	22.32	807,364.91	2,471,496.64	2,032.00	250.00

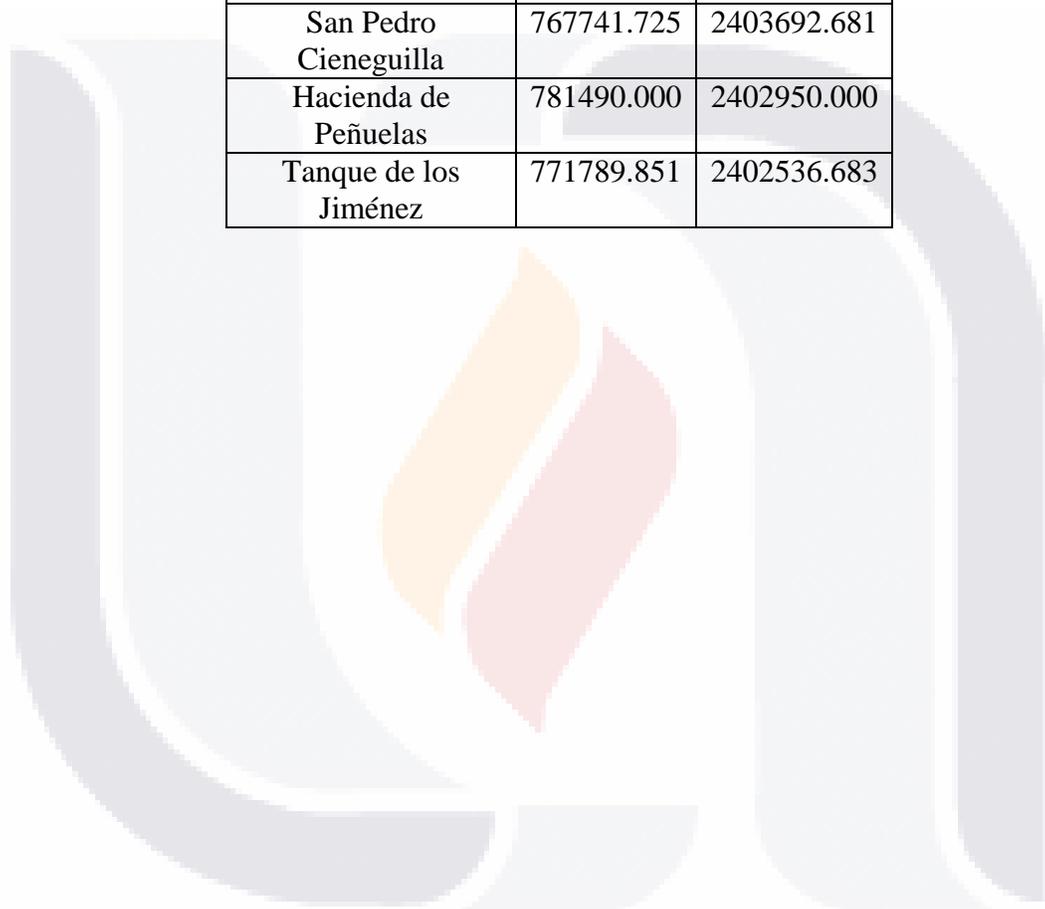
<i>Nombre</i>	<i>Longitud</i>	<i>Latitud</i>	<i>UTM X</i>	<i>UTM Y</i>	<i>Elevación</i>	<i>Profundidad</i>
PMX-108	-102.32	22.09	776,669.92	2,445,127.15	1,923.00	250.00
PMX-115	-102.33	22.08	775,769.55	2,444,126.44	1,939.00	250.00
PMX-13	-102.30	21.95	779,329.67	2,429,385.07	1,892.00	250.00
PMX-138	-102.24	21.89	785,679.33	2,422,819.37	1,973.00	250.00
PMX-139	-102.16	22.08	793,450.09	2,443,707.89	2,031.00	250.00
PMX-140	-102.17	22.16	792,047.10	2,452,793.15	2,096.00	250.00
PMX-141	-102.24	22.24	784,794.54	2,462,109.06	1,928.00	250.00
PMX-144	-102.36	21.97	772,290.08	2,431,324.34	1,904.00	250.00
PMX-145	-102.46	22.17	761,813.95	2,453,581.66	2,019.00	292.00
PMX-148	-102.28	22.39	779,781.68	2,477,900.49	1,976.00	250.00
PMX-149	-102.23	22.36	785,218.99	2,474,890.84	1,949.00	250.00
PMX-150	-102.28	22.37	779,765.02	2,475,653.27	1,976.00	250.00
PMX-22	-102.22	22.16	786,768.75	2,452,911.03	1,966.00	241.40
PMX-26	-102.23	22.19	785,829.54	2,455,664.09	1,948.00	250.00
PMX-30	-102.20	22.23	788,213.03	2,460,109.55	1,988.00	250.00
PMX-35	-102.14	22.16	795,461.26	2,452,703.30	2,143.00	250.00
PMX-38	-102.07	22.29	802,169.85	2,467,608.08	2,060.00	230.00
PMX-41	-102.26	22.40	781,740.02	2,478,828.65	1,967.00	250.00
PMX-43	-102.27	21.74	782,325.88	2,406,170.05	1,885.00	250.00
PMX-45	-102.24	22.36	783,821.51	2,474,588.16	1,953.00	166.00
PMX-48	-102.30	22.30	777,888.26	2,468,540.31	1,982.00	250.00
PMX-56	-102.23	21.96	785,730.44	2,431,130.69	2,024.00	250.00
PMX-68	-102.32	22.11	776,069.34	2,446,655.46	1,917.00	202.00
PMX-69	-102.25	22.10	783,339.50	2,445,923.19	1,914.00	212.00
PMX-81	-102.23	22.20	785,737.90	2,457,540.02	1,945.00	250.00
R-11	-102.22	21.89	787,602.40	2,422,915.66	1,949.00	462.00
R-20	-102.37	21.89	771,959.04	2,422,178.21	1,887.00	312.00
R-63	-102.27	21.72	782,383.42	2,404,539.85	1,868.00	300.00
R-71	-102.37	21.85	771,645.69	2,418,664.43	1,878.00	250.00
R-77	-102.21	21.81	788,456.86	2,413,820.41	1,929.00	250.00
R-82	-102.38	21.83	770,859.85	2,415,881.25	1,857.00	250.00
RR-11	-102.27	22.23	781,050.31	2,459,978.88	1,925.00	350.00
RR-12	-102.33	22.24	775,511.48	2,462,034.57	1,960.00	350.00
RR-20	-102.22	22.36	786,554.07	2,475,469.53	1,958.00	350.00
RR-9	-102.25	22.28	783,368.04	2,466,484.63	1,928.00	350.00
SJG-4	-102.48	22.15	760,427.09	2,450,788.84	2,029.00	300.00
SJG-6	-102.51	22.12	757,207.46	2,447,812.19	2,039.00	350.00
T-11	-102.25	22.21	783,522.49	2,457,992.13	1,916.00	250.00
T-16	-102.25	22.26	783,414.54	2,463,930.72	1,923.00	225.00

<i>Nombre</i>	<i>Longitud</i>	<i>Latitud</i>	<i>UTM X</i>	<i>UTM Y</i>	<i>Elevación</i>	<i>Profundidad</i>
T-8	-102.26	22.20	782,770.54	2,456,778.09	1,913.00	250.00
T-9	-102.19	22.30	789,232.25	2,468,501.01	1,962.00	300.00

Tabla 3 - Información geográfica de los sondeos eléctricos verticales.

Nombre	Este	Norte
Charco de Gallina	783127.169	2476545.422
San Juan Natura	786234.269	2475421.453
Puente San Jacinto	784825.025	2475107.377
Agua Zarca	780537.529	2475081.192
La Esperanza	778987.000	2471856.000
Tres Viudas, Mesillas	791781.369	2470216.754
El Durazno	782829.066	2469780.915
El Carmen Pozo 158	786457.796	2462248.808
Carretera a Cosío	776677.440	2461872.701
Mar Negro	782385.000	2461260.642
Ejido Morelos	772371.294	2460951.727
Estación Rincón	780512.177	2460260.372
Tepezala	791566.832	2459966.849
Arroyo Hondo	789465.352	2456160.999
Buenavista El Salitrillo	778821.699	2455197.434
El Tepozán, Arroyo	794671.724	2454382.080
Planta CHINOIN	775049.000	2453986.000
Nombre	Este	Norte
San Carlos N°1	778530.413	2440498.993
Balneario Valladolid	777063.851	2438541.816
- ING. CARDOSO	783026.600	2438058.081
Rancho El Chaveño	772484.602	2430865.745
Maravillas	776388.758	2429433.443
Parque México	782267.325	2425836.444
Parras	780969.401	2425625.015
Camino Los Arquitos	769338.000	2425298.000
Macías Arellano	780484.469	2425225.23

Nombre	Este	Norte
Club Campestre	776351.545	2425099.398
Hípico Had. Nva.	772826.624	2424679.487
Los Caños	762241.634	2410609.521
La Escondida	774801.000	2409911.000
Macro Plaza Textil 2	759374.981	2406114.845
Macro Plaza Textil 1	759303.478	2406109.377
San Pedro Cieneguilla	767741.725	2403692.681
Hacienda de Peñuelas	781490.000	2402950.000
Tanque de los Jiménez	771789.851	2402536.683



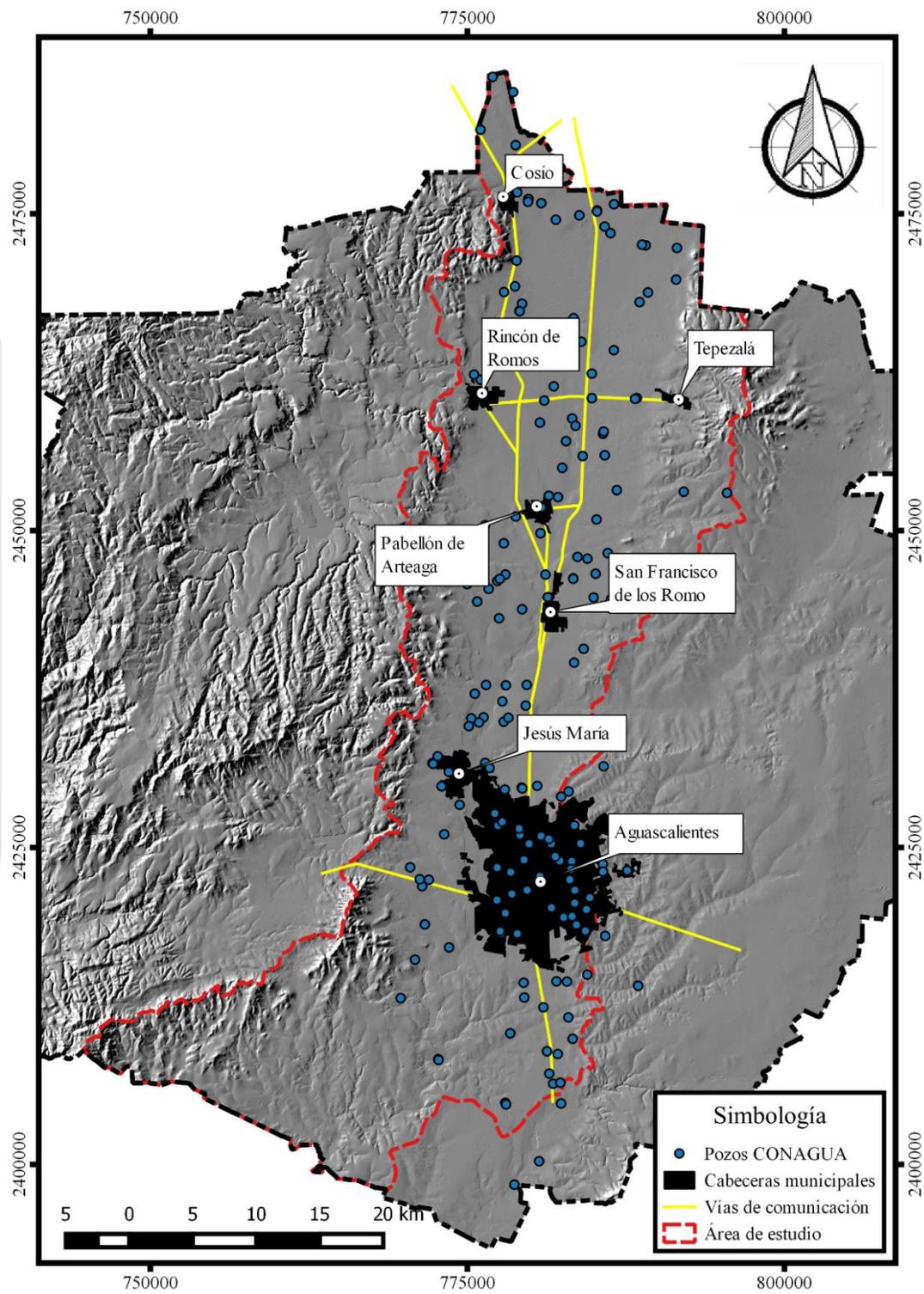


Figura 11 - Distribución geoespacial de los pozos con información litológica.

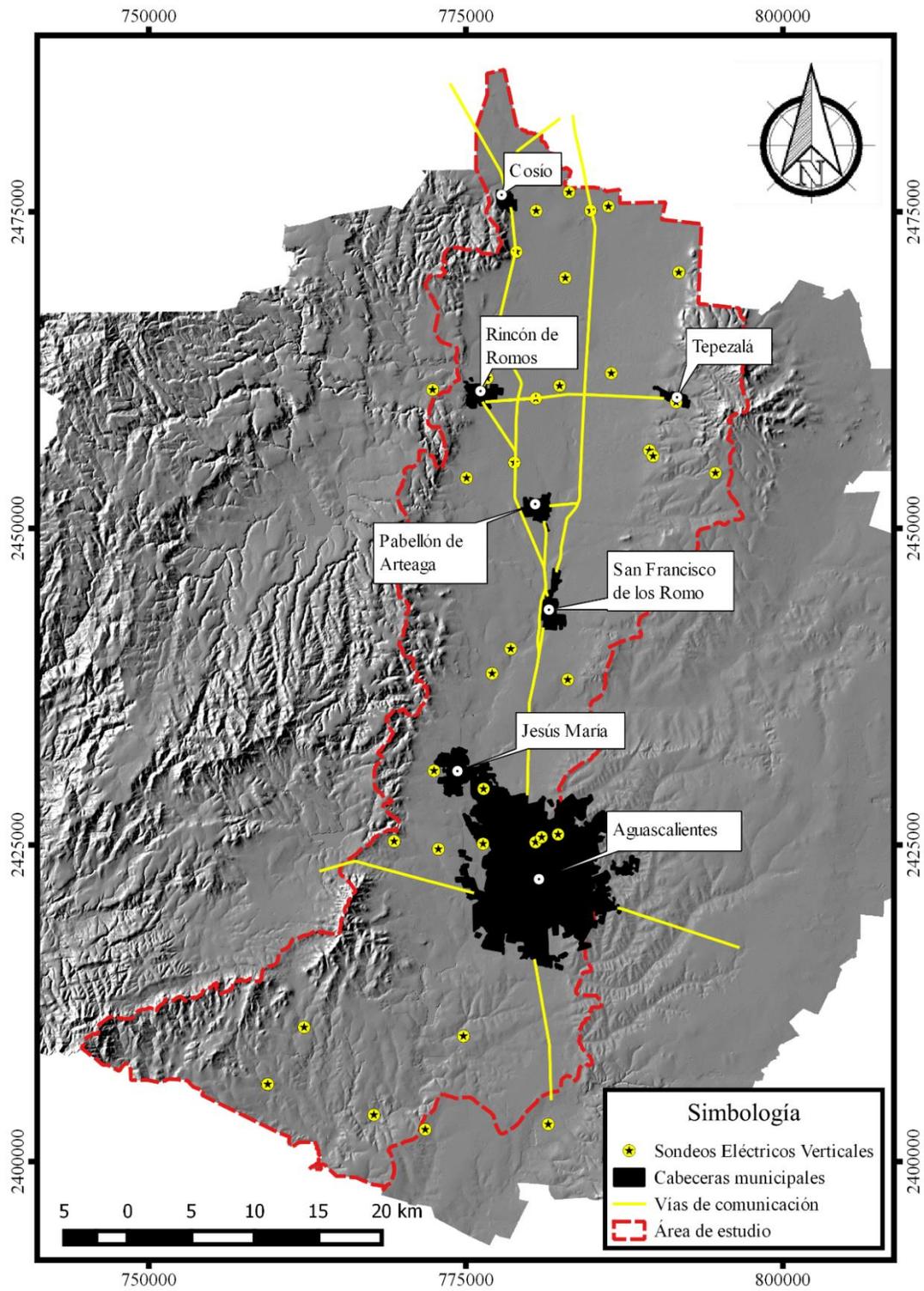


Figura 12 – Distribución geoespacial de los sondeos eléctricos verticales.

Ya con los datos de pozos y sondeos en su representación gráfica, se continuó con la distribución de las secciones, para esto se consideraron dos aspectos. El primero fue darle prioridad a las cabeceras municipales y el segundo fue la concentración de pozos y sondeos por sección. Con la metodología anterior se tomó la decisión de utilizar 9 secciones con extensión poniente-oriente, donde la mayoría de las cabeceras municipales son atravesadas, a excepción de Pabellón de Arteaga y San Francisco de los Romos. En la figura 13 se muestran las 9 secciones.

A continuación se realizó la comparación de la geología estatal, a partir de 3 fuentes, la primera fue la carta geológica del graben de Aguascalientes, elaborada por Martínez y Mitre en el año 2003 (figura 14), la segunda fueron las cartas geológicas-mineras Aguascalientes F13-9 y Zacatecas F13-6 y por último la capa vectorial de hidrogeología de la CONABIO (figura 15) (Vázquez, 2016).

Con la información en conjunto se continuó con el desarrollo de las secciones hidrogeológicas. Cabe mencionar que la altura de las secciones fue obtenida a través del modelo digital de elevación de Aguascalientes consultado del geoportal de INEGI.

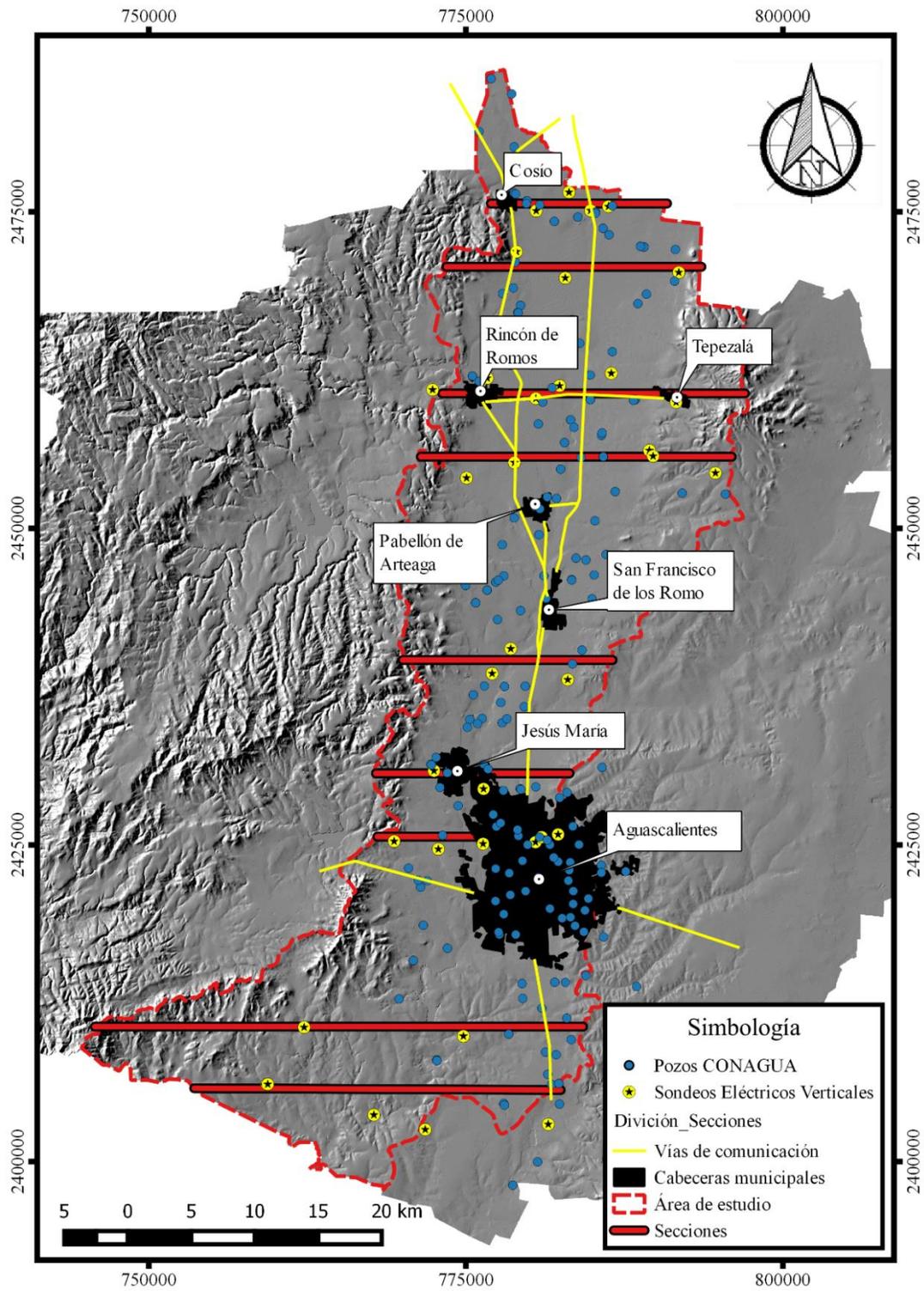


Figura 13 - Distribución de las secciones para la construcción de la hidroestratigrafía.

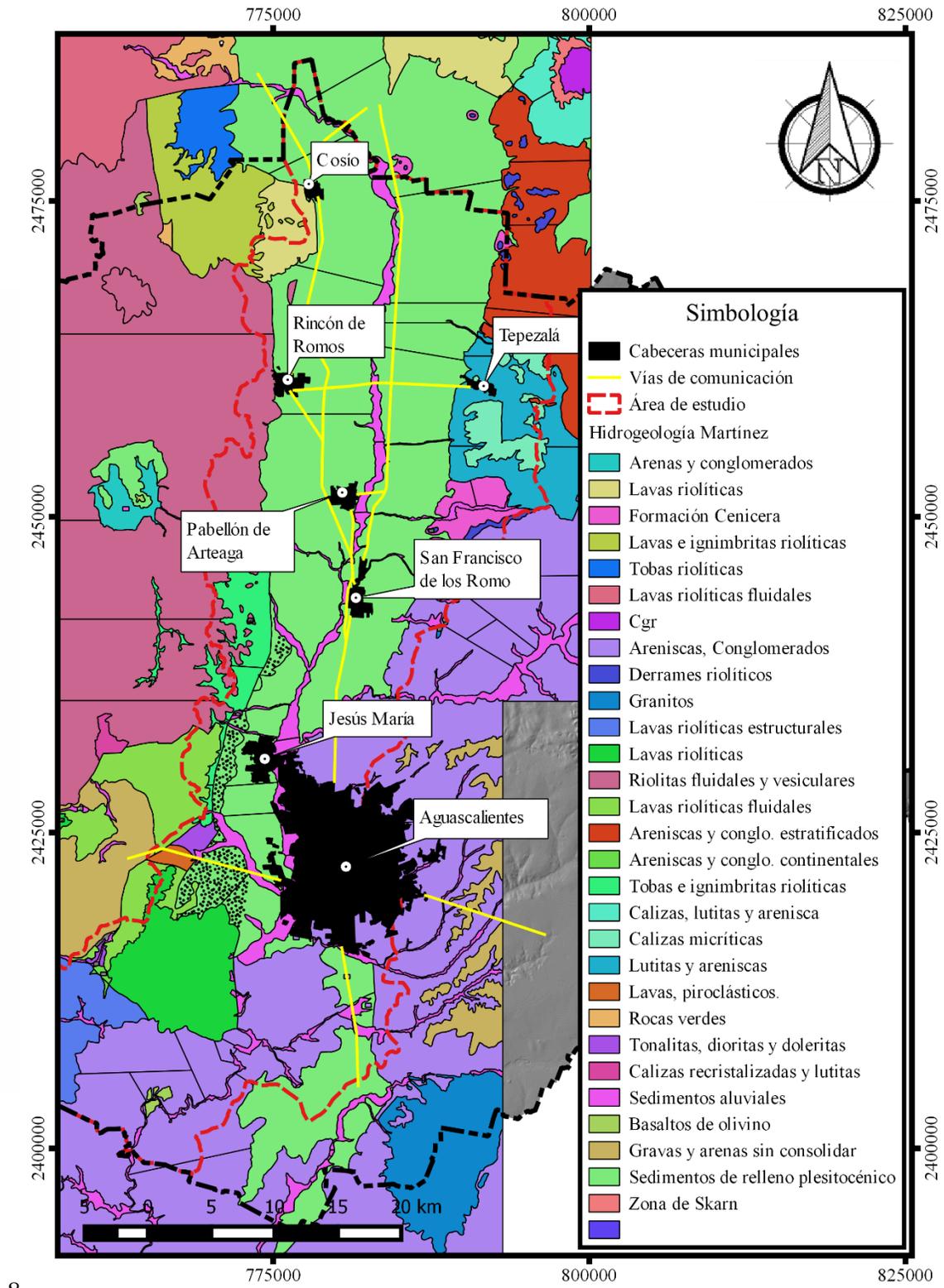


Figura 14 - Carta geológica del valle de Aguascalientes. Tomada de Martínez y Mitre (2003).

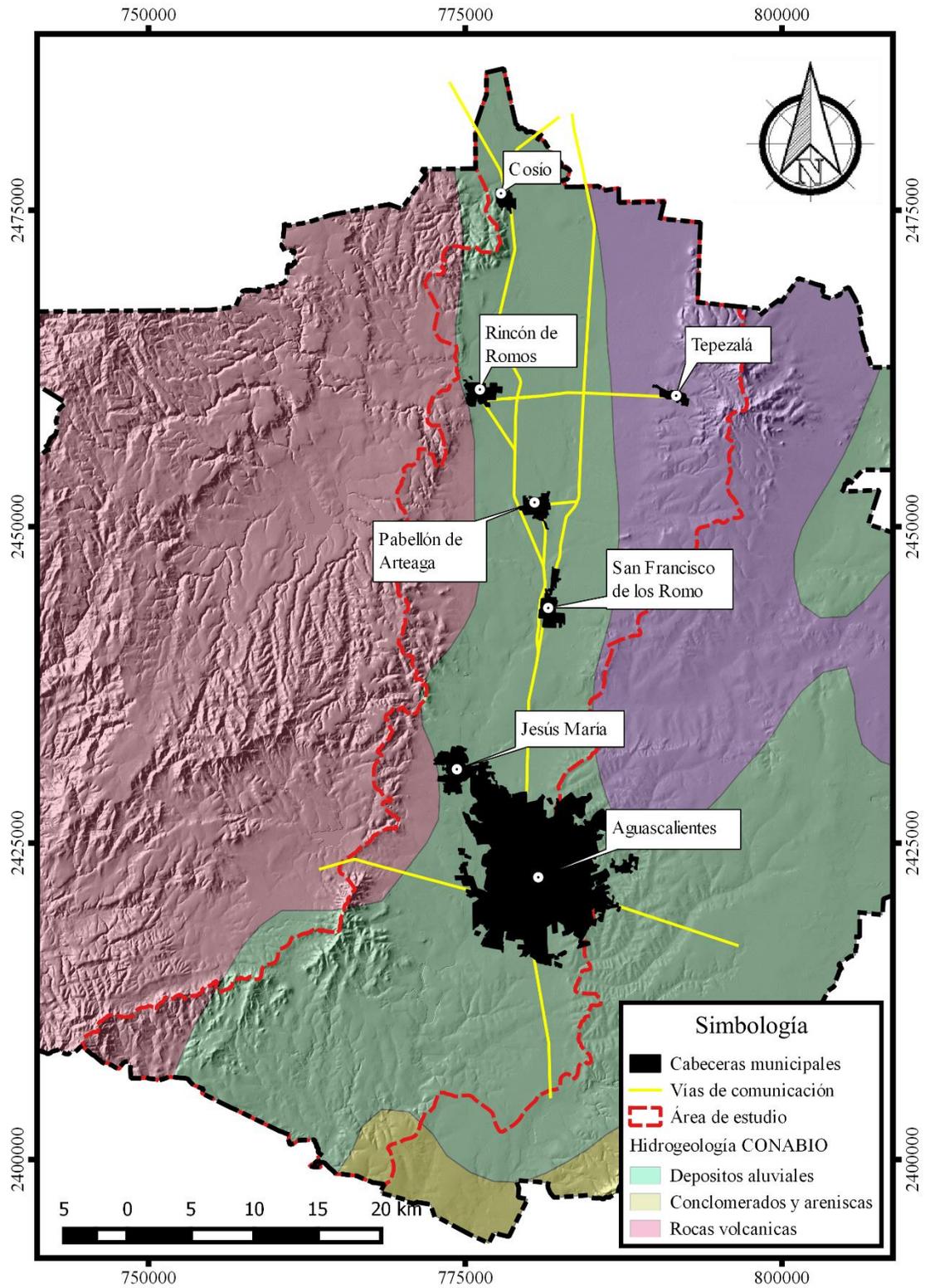


Figura 15 - Carta hidrogeológica del estado de Aguascalientes. Tomada de Vázquez (2016)

3.2 Parámetros hidráulicos de la zona vadosa

Para obtener los parámetros hidráulicos fue necesario la utilización del programa ROSETTA, de trabajos no publicados de granulometría y de gravedad específica del suelo no publicados por alumnos de la licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Aguascalientes y del trabajo de tesis de Rosales (2011). El programa ROSETTA fue utilizado por su rapidez y economía para la determinación de propiedades hidráulicas del suelo, si bien existen métodos que permiten la determinación de estas propiedades con mayor exactitud, es necesaria la inversión de tiempo y dinero (Marcel et al., 2001).

ROSETTA implementa funciones de pedotransferencia que predicen curvas de retención y conductividad basadas en la composición, densidad aparente y otros parámetros de la curva de retención como la capacidad de campo. Autores como Schaap y van Genuchten (1998) opinan que los ajustes del programa son superiores a otros con la misma finalidad como lo podría ser SOILPAR. Así también Zimmermann y Basile (2008) concluyen que ROSETTA es una buena aproximación si se cuentan solo con estudios de granulometría de la zona vadosa y datos hidráulicos del acuífero como la conductividad hidráulica vertical.

Los datos utilizados para el cálculo de los parámetros de la curva de retención de un suelo arenoso se muestran en la tabla 4, estos datos fueron obtenidos a través de pruebas granulométricas por alumnos de la licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Aguascalientes de un suelo superficial.

Tabla 4 - Porcentajes de granulometría para un suelo superficial de la ciudad de Aguascalientes.

Tipo de grano	Prueba 1 (%)	Prueba 2 (%)	Prueba 3 (%)	Promedio (%)
Gravas	11.45	0	4	5.15
Arenas	85.31	86	94.2	88.50
Finos	3.24	14	1.8	6.35

La tabla 5 muestra los valores de gravedad específica obtenida por los alumnos de la licenciatura en Ingeniería Civil de un suelo cercano al rio San Pedro.

Tabla 5 - Gravedad específica para un suelo cercano al río San Pedro.

Tipo	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Gravedad específica (g/cm ³)	2.52	2.60	2.79	2.63

Al contar con poca información de la zona vadosa local, fue necesario utilizar datos de otras zonas, para nuestro caso de estudio, Rosales (2011) caracterizó los tepetates de Querétaro, en las poblaciones de Tlacote (T), Conin (C) y Jurica (J) a través de la metodología de la American Society of Testing Materials, obteniendo los valores presentados en la tabla 6.

Tabla 6 - Granulometría para "Tepetates" de municipio de Querétaro (Rosales, 2011).

Nombre	Gravas	Arenas	Finos
T1	1.28	69.65	29.06
T3	3.28	82.40	14.32
J1	9.13	70.10	20.72
J2	10.20	69.13	20.67
C1	16.35	66.61	17.05
C2	1.79	71.10	27.11
C3	5.25	76.52	18.23
Jaral	0	72.83	27.17

3.3 Modelación de flujo en la zona vadosa

La última etapa en la metodología propuesta tiene que ver con la aplicación de simulaciones numéricas para cuyo desarrollo, además de la información previa, se tomó en cuenta información realizada al acuífero y estudios hidrológicos realizados sobre el valle de Aguascalientes.

El modelo matemático utilizado para describir el funcionamiento hidrogeológico fue la ecuación de Richards modificada con los parámetros de las curvas de retención, con la ayuda del programa COMSOL Multiphysics. Se simularon diferentes columnas con las mismas características granulométricas a diferentes profundidades del nivel estático, para determinar tiempos saturación total hasta dicho nivel estático.

Con los resultados obtenidos para diferentes profundidades se calculó una ecuación para cada tipo de suelo, con la cual se calculó el tiempo de tránsito dependiendo de la profundidad y el tipo de suelo.

CAPITULO IV. Resultados

Los resultados obtenidos se han estructurado en 3 subcapítulos. El primero trata de las cuestiones concernientes a la caracterización hidrogeológica de la zona vadosa, el segundo abarca los parámetros obtenidos utilizando el programa ROSETTA y el tercero describe el resultado de las simulaciones numéricas así como el cálculo de las ecuaciones para diferentes materiales y el modelo digital de elevación para tiempos de tránsito.



4.1 Caracterización hidrogeológica

Mediante el análisis de la información geológica recopilada se integró la figura 16, la cual muestra la configuración geológica conceptual. Se encontraron 3 unidades principales: al poniente, una unidad de rocas volcánicas (riolitas e ignimbritas mayormente), al centro sedimentos de origen aluvial y fluvial (gravas, arenas, limos y arcillas) y al oriente, rocas sedimentarias (conglomerados, areniscas, arenas litificadas).

El estudio de la litología de pozos dio como resultado una configuración estratigráfica que incluye sedimentos como gravas, arenas con limos y arcillas en mayoría. Los pozos con una profundidad, superior a los 500 metros y cercanos al poniente presentaron registros de ignimbritas y riolitas, mientras que los registros ubicados al oriente presentaron rocas como calizas, areniscas y conglomerados. Es de importancia mencionar que la definición “*tobas*” presentada en los registros litológicos ha sido interpretada como una secuencia de origen volcánico y epiclásticos volcánicos. En el Anexo A, se muestran los registros litológicos de los pozos por sección.

Los resultados de los sondeos eléctricos verticales presentaron diversidad de resistividades, la mayoría presentaron una capa resistiva en la superficie, común en las zonas áridas debido a la poca presencia de humedad. La resistividad eléctrica para el centro del valle se encontró dentro del rango de 10 a 50 Ω -m para profundidades de hasta 200 metros, valores comunes para suelos arenosos con presencia de humedad o areno-arcillosos. Seguidas de una capa resistiva mayor de 100 Ω -m valores para areniscas y conglomerados. En la figura 17 se muestra la configuración eléctrica de la sección 8 ubicada al sur de Cosío, configurada por los sondeos eléctricos: La Esperanza, El Durazno y Tres Viudas. El sondeo La Esperanza, mostro una configuración de 2 a 51 Ω -m en un espesor de 180 metros. El sondeo el Durazno, presenta una configuración eléctrica similar a La Esperanza donde se presentan valores de resistividad en un rango de 6 a 63 Ω -m para un espesor de 250 metros. Por último el sondeo Tres Viudas, presenta valores menos resistivos en un rango de 3 a 8 Ω -m para un espesor de 260 metros. Estos valores se pueden asociar a una configuración de arenas con arcillas y limos. Para los tres sondeos después de los espesores mencionados se

presenta un valor de resistividad cercano a los 100 Ω -m, asociados a una configuración de conglomerados y areniscas.

En el Anexo B se presentan los datos de geofísica, a partir de la utilización de los resultados del programa IPI2WIN.

En la figura 18 se muestra la sección hidrogeológica 8 resultante del conjunto de la información geológica, litológica y eléctrica, así como el nivel estático. En el Anexo C se presentan las secciones restantes. En color melón, la unidad hidrogeológica correspondiente a sedimentos aluviales y fluviales que a partir de este párrafo se mencionara como unidad 1. En naranja, la unidad hidrogeológica correspondiente a rocas sedimentarias y arenas litificadas, que a partir de este párrafo se mencionara como unidad 2, y en rojo la unidad 3, correspondiente a rocas volcánicas, las cuales han sido consideradas como impermeables.

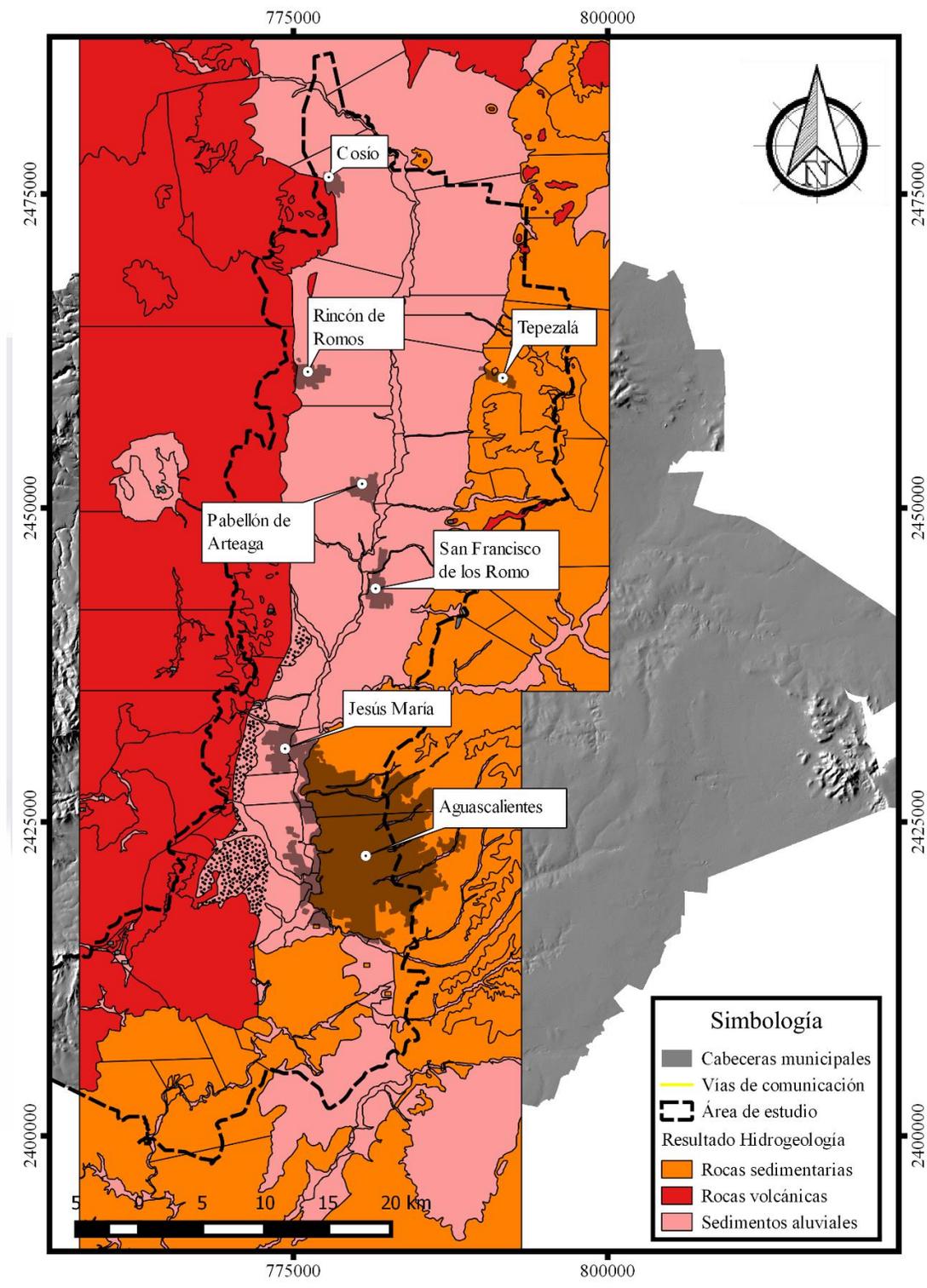
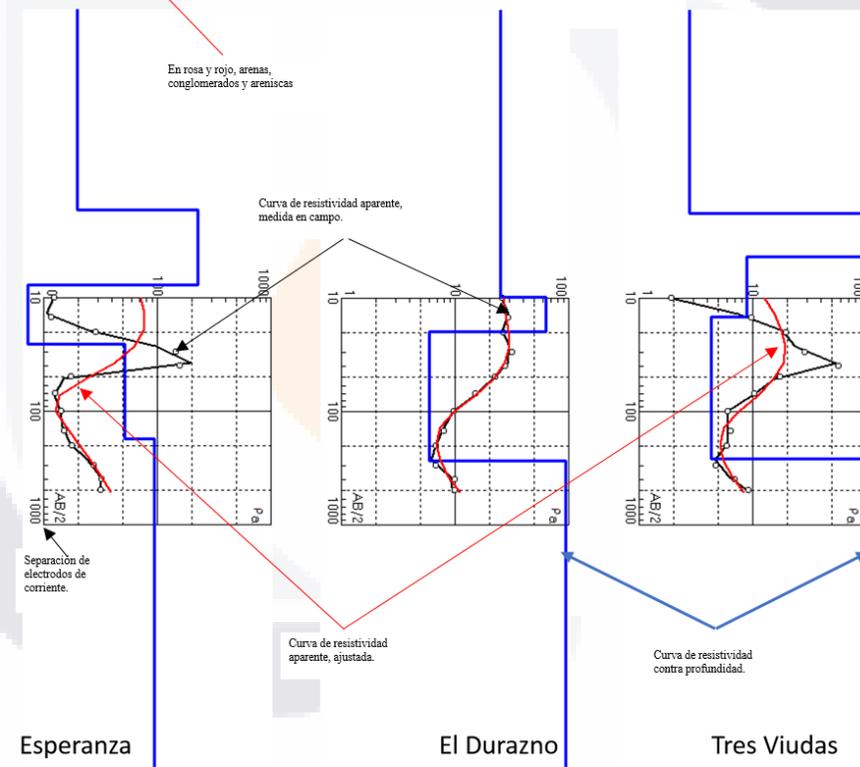
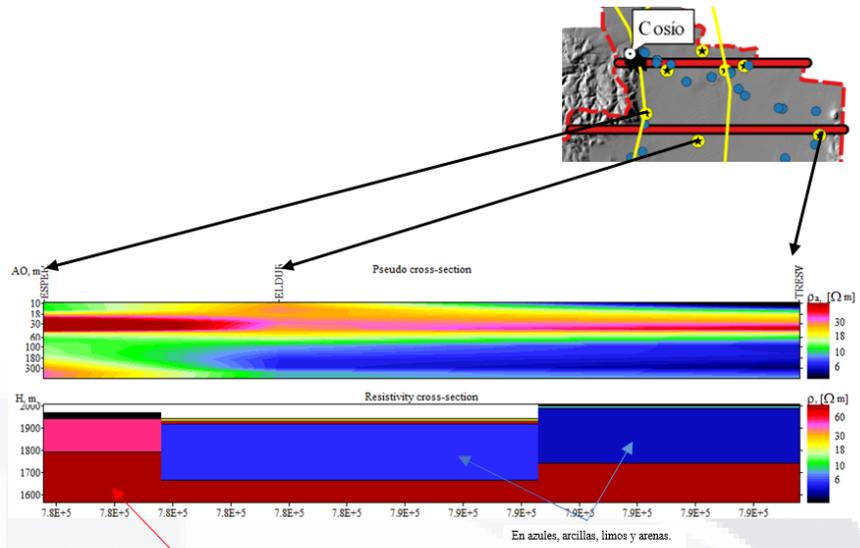


Figura 16 - Unidades hidrogeológicas para la zona de estudio por valores de conductividad hidráulica..



N	p	h	d	Alt
1	19.8	1.68	1.68	1965
2	227	6.03	7.71	1959
3	2.72	17.9	25.6	1941
4	51.6	150	175	1792
5	94.2			

N	p	h	d	Alt
1	25.1	9.85	9.85	1929
2	63.1	9.95	19.8	1919
3	5.93	253	273	1666
4	94.2			

N	p	h	d	Alt
1	2.78	1.79	1.79	2000
2	186	2.53	4.31	1998
3	8.87	10.3	14.6	1987
4	4.31	247	261	1741
5	130			

Figura 17 - Configuración eléctrica de la sección 8, ubicada al sur de la cabecera municipal de Cosío. El perfil de resistividad superior muestra la sección de resistividad aparente medida en campo, la segunda muestra la resistividad real después del proceso de inversión, Los gráficos muestran la variación de resistividad aparente contra las distancia entre los electrodos. Mientras que las tablas indican la estratigrafía (cada renglón indica un estrato diferente).

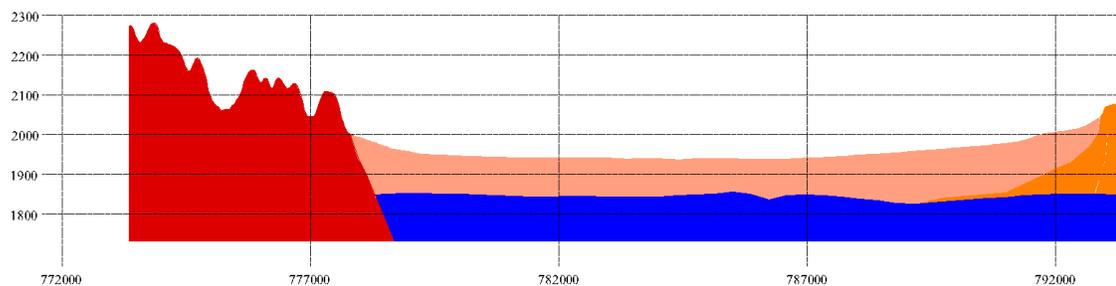


Figura 18 - Sección hidrogeológica conceptual, ubicada al sur de la cabecera municipal de Cosío. En naranja, se muestra la unidad 2, en color melón la unidad 2, en rojo rocas volcánicas y en azul rey el acuífero.



4.2 Parámetros hidráulicos

Mediante los valores granulométricos presentados anteriormente y la utilización del software ROSETTA se obtuvieron los datos hidráulicos de la zona vadosa, a utilizarse en la ecuación de van Genuchten y a su vez en las simulaciones numéricas. La tabla 7 muestra un resumen de los datos para un suelo con menos del 10% de finos. La tabla 8 presenta los datos para un suelo con más del 10% de finos.

Tabla 7 - Resumen de valores hidráulicos para la zona vadosa en un suelo con menos del 10% de finos (AA, Arenas arcillosas).

Promedio de los parámetros				
Parámetro	Clasificación			Promedio
	A_A	ARENA	ARENA	
θ_r	0.0512	0.0510	0.0513	0.0512
θ_s	0.3767	0.3778	0.3769	0.3771
α	0.0330	0.0343	0.0341	0.0338
n	2.0008	3.6694	4.0170	3.2291

Tabla 8 - Resumen de valore hidráulicos para la zona vadosa en un suelo con más del 10% de finos (AA, Arenas arcillosas).

Promedio de los parámetros								
Parámetro	Clasificación							Promedio
	LIMO ARENSO	A_A	A_A	A_A	A_A	A_A	A_A	
θ_r	0.0266	0.0278	0.0277	0.0296	0.0254	0.0305	0.0256	0.0276
θ_s	0.4037	0.4022	0.4024	0.3998	0.4070	0.3987	0.4065	0.4029
α	0.0431	0.0515	0.0515	0.0514	0.0485	0.0511	0.0490	0.0494
n	1.4608	1.6463	1.6383	1.7567	1.5108	1.8214	1.5195	1.6220

El Anexo D presenta el resultado para cada una de las granulometrías presentadas, con su respectivo error de ajuste.

4.3 Simulaciones numéricas

Con la información descrita en los subcapítulos anteriores, se diseñaron columnas de suelo con diferentes profundidades para las dos unidades hidrogeológicas encontradas en la zona del valle (unidad 1 y unidad 2). A continuación se presentan las tablas 9 y 10 con los valores utilizados para las simulaciones de dichas unidades, en donde y es la profundidad al nivel estático del acuífero. En todas las simulaciones la carga hidráulica impuesta es el resultado del estimado de recarga anual (140 Mm^3 según CONAGUA, 2009) dividido entre el área total de la zona de estudio, que en este caso es de 85 milímetros. La profundidad del nivel estático utilizada en los modelos se basó en los datos de pozos proporcionados por la Conagua para el 2015.

Tabla 9 - Parámetros utilizados para la simulación numérica de la unidad 1.

Parámetro	Valor	Unidades
Conductividad hidráulica	0.138	m/d
θ_s	0.3771	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
θ_r	0.0512	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
α	0.0338	-
n	3.2291	-
Carga hidráulica	0.085	m
Condición inicial	- (y -Nivel estático)	m
Densidad del agua	1000	Kg/m^3

Tabla 10 - Parámetros hidráulicos utilizados para la simulación numérica de la unidad 2.

Parámetro	Valor	Unidades
Conductividad hidráulica	0.021	m/d
θ_s	0.4029	$m^3 m^{-3}$
θ_r	0.0276	$m^3 m^{-3}$
α	0.0494	-
n	1.6220	-
Carga hidráulica	0.085	m
Condición inicial	- (y-Nivel estático)	m
Densidad del agua	1000	Kg/m^3

Las tablas 11 y 12 muestran los tiempos de tránsito simulados hasta el nivel del acuífero para las unidades 1 y 2 respectivamente, En donde los tiempos máximos para una columna de 175 metros de la unidad 1, resultó con un valor de 12.06 meses y para la unidad 2 un valor de 210.785 años para una profundidad de 250 metros. Por su parte, la figura 19 muestra la saturación efectiva para diferentes profundidades de la unidad 1 en un tiempo de 12.06 meses, así como la figura 20 muestra la saturación efectiva para diferentes profundidades de la unidad 1 en un tiempo de 12.273 años. En ambas imágenes se puede presenciar que a mayor profundidad para un mismo tiempo, la saturación efectiva es menor, este efecto es mayor en las columnas de la unidad 2.

Los valores de las tablas 11 y 12, graficaron para obtener una ecuación y determinar el tiempo de tránsito de las unidades 1 y 2 para cualquier profundidad, ambas ecuaciones presentaron una configuración cuadrática con un alto grado de correlación. En las figuras 21

y 22 se presentan los datos graficados y debajo su ecuación correspondiente. Es importante recordar que estas funciones solo servirán para los parámetros hidráulicos antes presentados.

Tabla 11 - Tiempos máximos de tránsito para diferentes profundidades del nivel freático en la unidad 1 en años.

Profundidad (m)	Tiempo (años)
0	0
25	1.00
50	4.25
75	9.48
100	16.15
125	23.94
150	32.47
175	41.54

Tabla 12 - Tiempos máximos de residencia para diferentes profundidades del nivel freático en la unidad 2 en años.

Profundidad (m)	Tiempo (a)
0	0
25	3.187
50	12.273
75	26.367
100	44.182
125	65.5
150	89.867
175	116.72
200	146
225	177.272
250	210.785

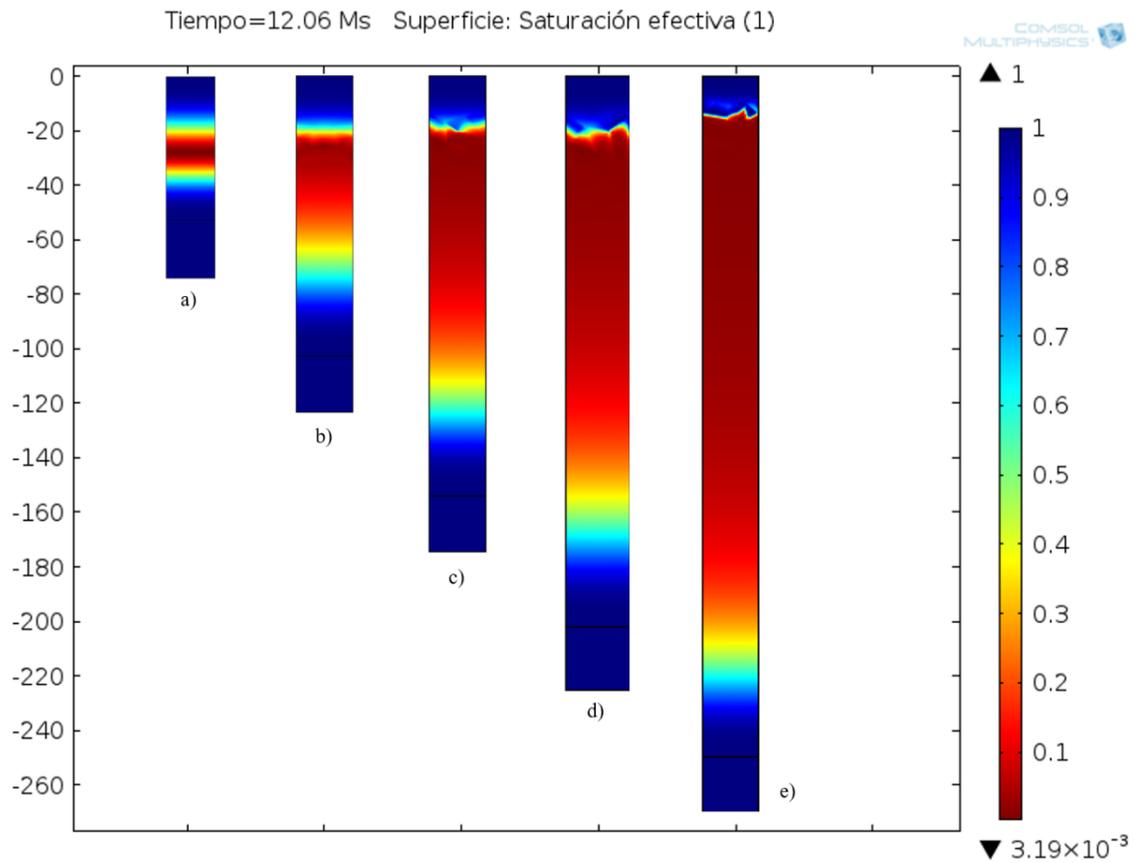


Figura 19 - Saturación efectiva para diferentes profundidades del nivel freático. Se muestran 5 de los 8 casos de columnas. a) 50, b) 100, c) 150, d) 200 y e) 250 metros del acuífero, para la unidad 1 en un tiempo de 1 año. La línea blanca indica el nivel freático simulado. El 100 % de saturación efectiva observada sobre dicha líneas se debe al efecto capilar.

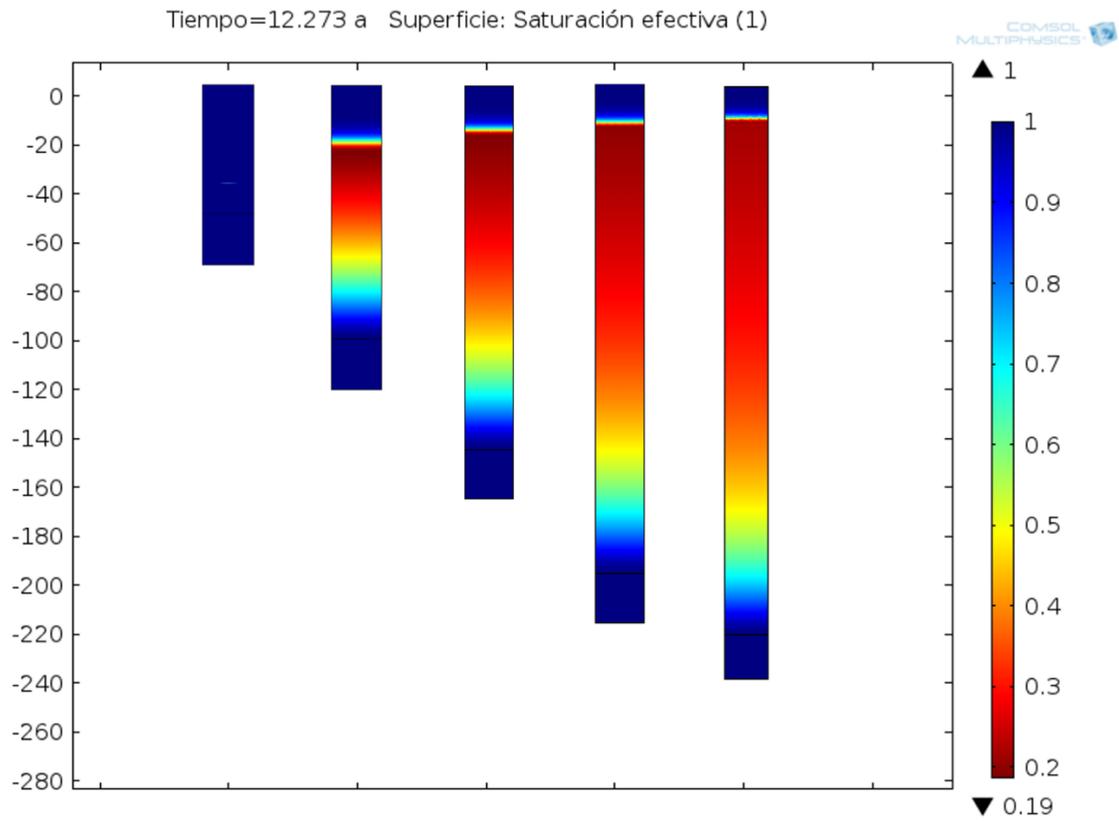


Figura 20 - Saturación efectiva para diferentes profundidades del nivel freático. Se muestran 5 de los 8 casos de columnas a) 50, b) 100, c) 150, d) 200 y e) 250 metros del acuífero, para la unidad 2 en un tiempo de 12.273 años. La línea blanca indica el nivel freático simulado. El 100 % de saturación efectiva observada sobre dicha líneas se debe al efecto capilar.

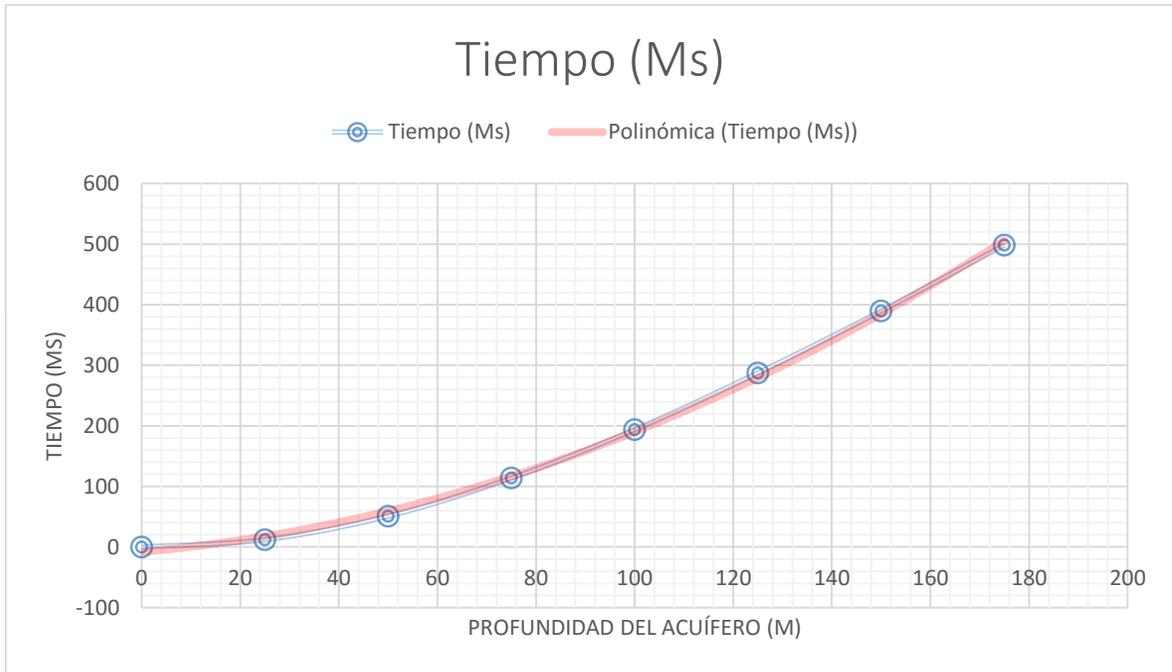


Figura 21 - Valores máximos de tiempos de tránsito, para la unidad 1. En rojo se grafica la función polinómica grado 2.

$$t = 0.0127 * p^2 + 0.7063 * p - 7.921$$

Ecuación 4 – Función polinómica de grado 2, para calcular el tiempo de tránsito en la Unidad 1 dependiendo de la profundidad del acuífero, $R^2 = 0.9986$.

Donde t es el tiempo en meses y p es la profundidad del acuífero en metros.

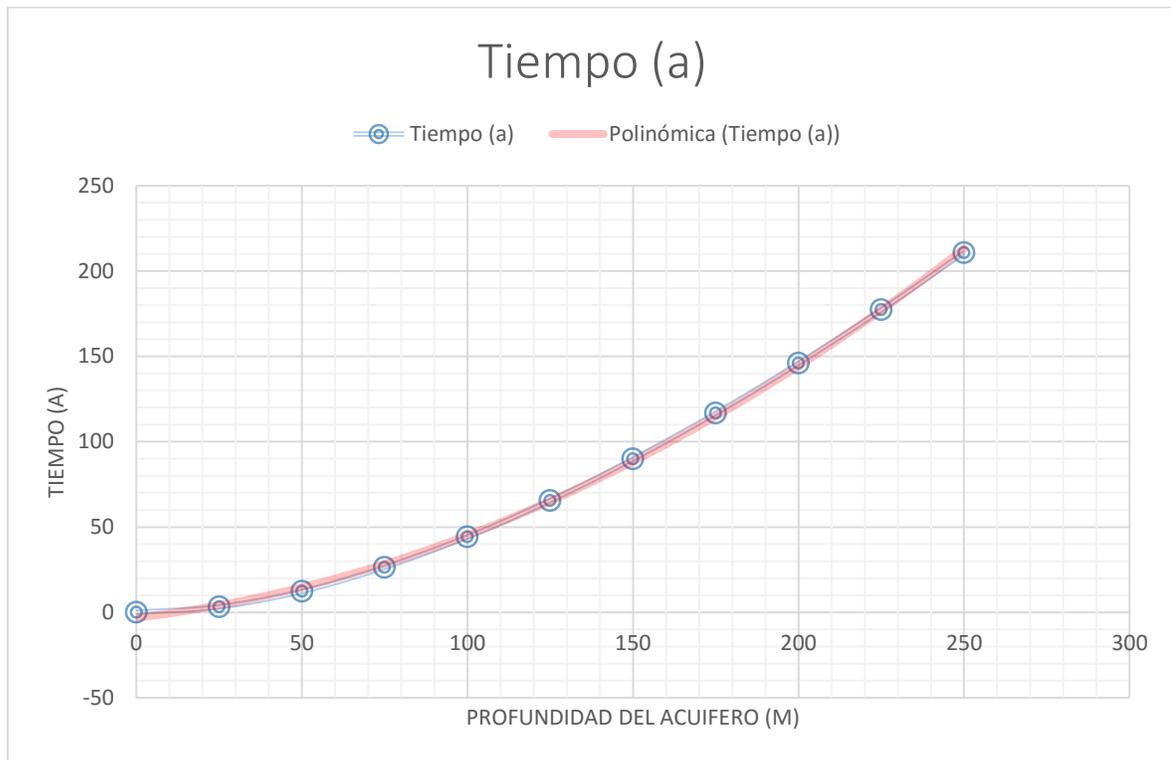


Figura 22 - Valores máximos de tiempos de tránsito, para la unidad 2. En rojo se grafica la función polinómica grado 2.

$$t = 0.0025 * p^2 + 0.2277 * p - 3.0924$$

Ecuación 4 – Función polinómica de grado 2, para calcular el tiempo de tránsito en la Unidad 2 dependiendo de la profundidad del acuífero, $R^2 = 0.9993$.

Donde t es el tiempo en meses y p es la profundidad del acuífero en metros.

Con las ecuaciones y los espesores de las secciones hidrogeológica, se construyó el modelo digital de elevación, donde la altura de las celdas corresponde al tiempo de transcurso desde la superficie hasta el acuífero. Presentando tiempos de transito mínimos, al norte con valor de 13 años y sur del estado se presentó un valor de 4.25 años y máximos al norte de la ciudad de Aguascalientes con 160 años y la sierra de Tepezala con 750 años. La figura 23 muestra las curvas de igual tiempo para todo el valle, mientras las figuras 24 y 25 presentan los lugares de tiempos mínimos y máximos respectivamente.

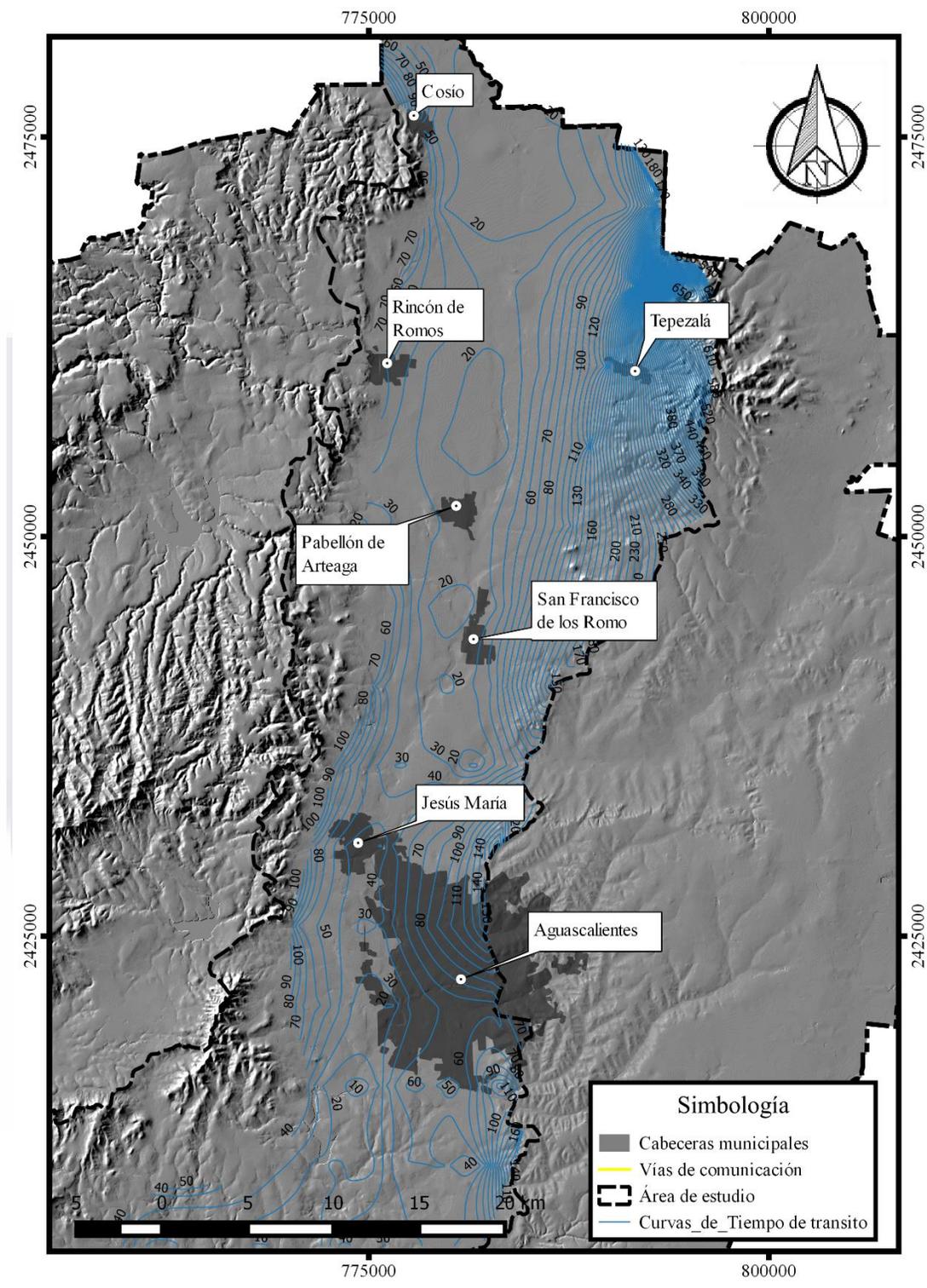


Figura 23 - Modelo digital de elevación con curvas a igual tiempo de tránsito en años.

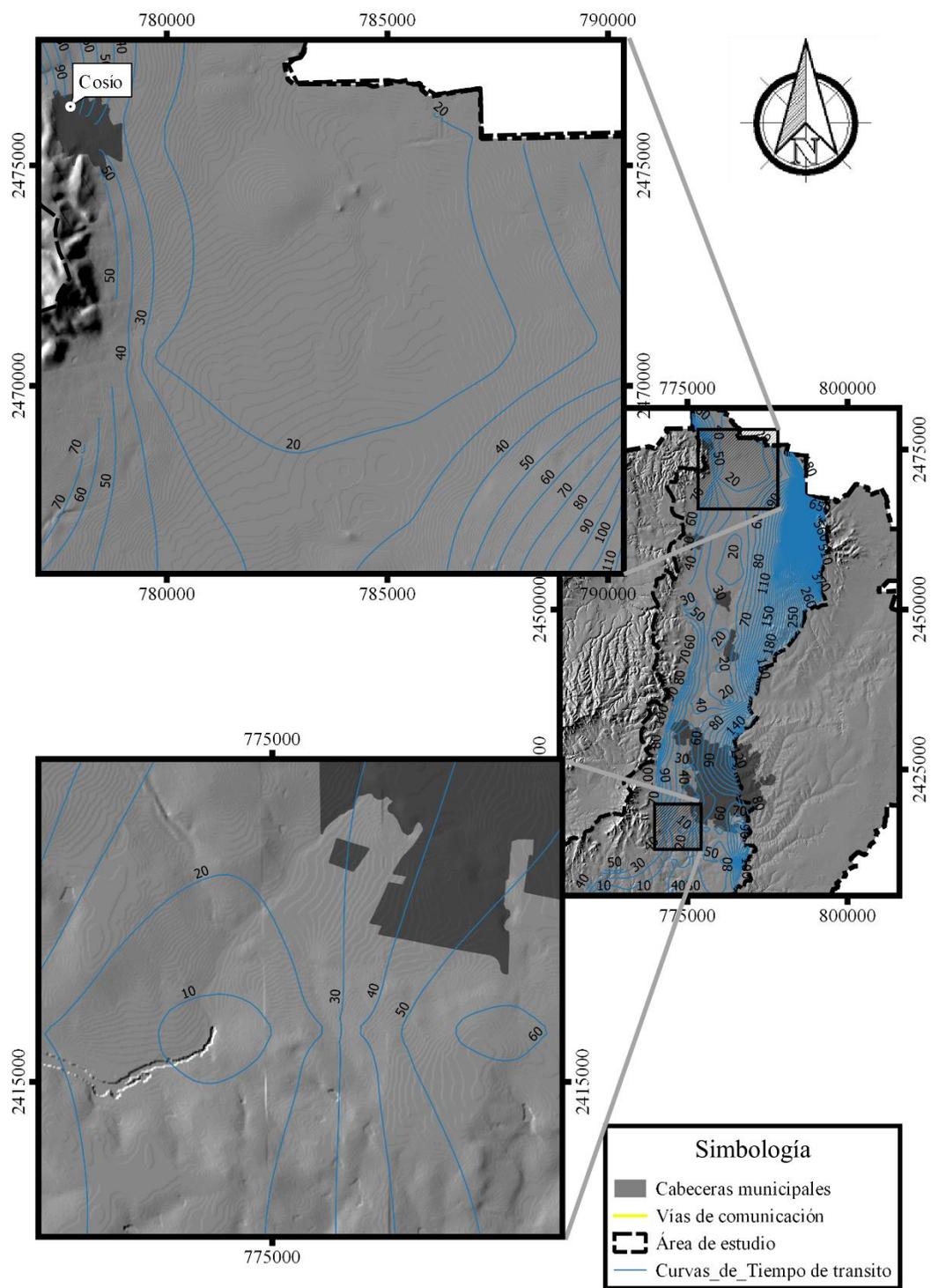


Figura 24 - Localización de los tiempos mínimos de tránsito en años. Arriba, cerca de la cabecera de Cosío. Abajo, al sur de la ciudad de Aguascalientes.

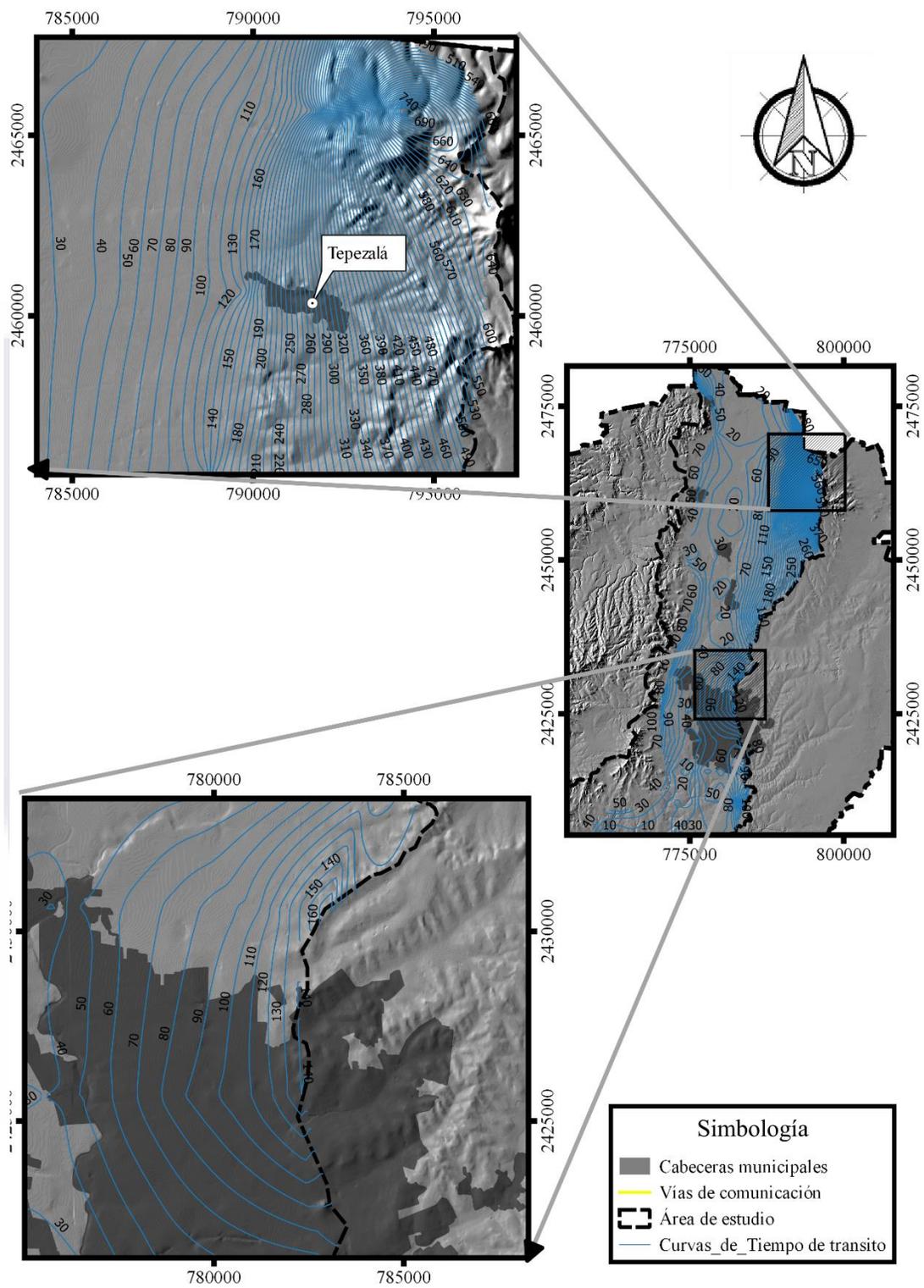


Figura 25 - Tiempos máximos de tránsito en años. Arriba, la sierra de Tepezala. Abajo, el norte de la ciudad de Aguascalientes.

CAPITULO V. Conclusiones

De la presente investigación se concluye que dentro de la área de estudio, la zona vadosa está configurada por 2 unidades hidrogeológicas, una superficial formada por sedimentos aluviales y fluviales de hasta 200 metros de profundidad, seguida de una de unidad de conglomerados, areniscas, rocas volcánicas y sedimentos con diferente grado de litificación.

Los tiempos de tránsito de agua dentro de la zona vadosa del área estudiada varían en función de 2 factores, la profundidad del nivel freático y la configuración de las unidades hidrogeológicas, encontrando un valor mínimo de 4.25 años al sur de la ciudad de Aguascalientes, donde el nivel estático se encuentra a 45 metros de profundidad, sin embargo esta es una zona muy pequeña. Por otro lado, al norte del estado, se presentó una extensión mayor con un tiempo mínimo de 13 años. Los valores máximos se encontraron al poniente del área de estudio, sobre la sierra de Tepezalá y al norte de la ciudad de Aguascalientes.

También se concluye que las áreas cercanas al río San Pedro presentan un tiempo de tránsito menor, de forma regional, 20 años en toda la longitud del área influenciada por este río.

Si bien el modelo de tiempos de tránsito presentado es una buena aproximación y está dentro de resultados presentados por INAGUA (2013), para mejorar las simulaciones numéricas, es necesario la realización de mayor investigación geofísica, sobre todo en épocas de estiaje para determinar estratos con el menor contenido de humedad posible. Así como simular con datos particulares de las zonas o secciones como lo son, la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento, así también obtener las curvas de retención de humedad para cada tipo de suelo, a través de mediciones de campo o experimentales.

Referencias

- Aranda Gómez, J. J. (1989). Geología preliminar del graben de Aguascalientes. *Universidad Nacional Autónoma de México, Inst. Geología*, 8(1), 22–32.
- Aranda Gómez, J. M., y Aranda Gómez, J. J. (1986). *Análisis del agrietamiento en la ciudad de Aguascalientes* (Inédito) (p. 104). Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Brooks, R. H., y Corey, A. T. (1966). Properties of porous media affecting fluid flow. *American Society of Civil Engineering*, (92), 61–88.
- Brunet, P., Clément, R., y Bouvier, C. (2010). Tomography (ETR) - A case study in the Cevennes area, France. *Hydrogeology Journal*, 380(1–2), 146–153.
- Budhu, M., y Adiyaman, I. (2012). Earth fissure formation from groundwater pumping and the influence of a stiff upper cemented layer. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 45, 197–205. <http://doi.org/10.1144/1470-9236/10-030>
- Castañeda Molina, H., Murillo Méndez, M. A., Fuentes López, J. A., y Monsivais Santoyo, J. P. (1993). Levantamiento cartográfico de las fallas y fracturas geológicas de la ciudad de Aguascalientes. *Investigación y ciencia*, 43–47.
- Castañeda Molina, H., Murillo Méndez, M. A., Fuentes López, J. A., y Monsivais Santoyo, J. P. (1996). Comentarios al estudio de fallas y fracturas geológicas de la ciudad de Aguascalientes. *Investigación y ciencia*, 40–43.
- CONAGUA. (2009). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, acuífero (0101) Valle de Aguascalientes* (p. 27). Aguascalientes: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2012). *Atlas del agua en México 2012* (Atlas) (p. 142). Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
- DOF. (1963). *Decreto por el que se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende todo el Estado de Aguascalientes* (Decreto) (pp. 573–575). Distrito Federal: Diario Oficial de la Federación.

- E. Estévez, R. Lovera, J.C. Tapias, M.P. Palacios-Díaz, M. Himi, M.C. Cabrera, y A. Casas. (2010). Caracterización de la zona no saturada bajo el campo de golf de Bandama (Gran Canaria) mediante tomografía de resistividad eléctrica, *XI*, 37–41.
- Friedman, S. P. (2005). Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review. *Computational Electronical Agriculture*, *46*, 45–70.
- Geofísica | EPYESA. (2016, Mayo 16). Recuperado a partir de <http://epyesa.com/geofisica/>
- Guerrero Martínez, L. (Comunicación escrita). *Evaluación de la recarga natural vertical del acuífero del valle de Aguascalientes mediante el análisis de variación de niveles de agua subterránea y datos de precipitación* (Tesis). Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes.
- H. Llanos Acebo, J. Salas García, y J. Gárfias Soliz. (2009). Análisis de la infiltración en la zona no saturada fracturada del acuífero del Valle de Toluca, México. *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*, *X*, 97–102.
- Hernández A., M. (2001). La importancia de la zona no-saturada en la hidrología de llanuras. *Cátedra de hidrogeología*, *53*, 73–82.
- Hernández Marín, M., y Burbey, T. J. (2010). Controls on initiation and propagation of pumping-induced earth fissures: insights from numerical simulations. *Hydrogeology Journal*, *18*, 1773–1785.
- Huo, S., Jin, M., Liang, X., y Lin, D. (2014). Changes of vertical groundwater recharge with increase in thickness of vadose zone simulated by one-dimensional variably saturated flow model. *Journal of Earth Science*, *25*(6), 1043–1050.
<http://doi.org/10.1007/s12583-014-0486-7>
- Instituto del Agua del Estado. (2013). *Estudio de la recarga artificial del acuífero del Valle de Aguascalientes* (p. 197). Aguascalientes: Instituto del Agua de Estado (INAGUA).
- J. Dafonte, J.R. Raposo, M. Valcárcel, M. Fandiño, E.M. Martínez, B.J. Rey, y J.J. Cancela. (2010). Utilización de la tomografía eléctrica resistiva para estimar el contenido de agua en el suelo en Viña bajo diferentes sistemas de riego, *XI*, 57–62.
- Marcel G. Shaap, Feike J. Leji, y M.Th. van Genuchten. (2001). Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters whit hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, *251*, 163–176.

- Mattern, S., y Vanclouster, M. (2010). Estimating travel time of recharge water through a deep vadose zone using a transfer function model. *Environmental Fluid Mechanics*, 10(1), 121–135. <http://doi.org/10.1007/s10652-009-9148-1>
- M.Th. van Genuchten. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America*, 44(5), 892–898.
- M.Th. van Genuchten, y D.R. Nielsen. (1985). On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Annales Geophysicae*, 3(5), 615–628.
- Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., y Camprubí, A. (2005). La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 285–318.
- Pacheco Martínez, J., Hernández Marín, M., Burbey, T. J., González Cervantes, N., Ortiz Lozano, J. Á., Zermeño de León, M. E., y Solís Pinto, A. (2013). Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology*, 164, 172–186.
- Pachepsky, Y., Timlin, D., y Rawls, W. (2003). Generalized Richards' equation to simulate water transport in unsaturated soils. *Journal of Hydrology*, 272, 3–13.
- P.E. Rijtema, y H. Wassink. (1969). Water in the unsaturated zone, *I*, 995.
- PROACTIVA MEDIO AMBIENTE. (2012). *Observaciones a la presentación de resultados preliminares auditoría 12* (Auditoría No. 12) (p. 135). Aguascalientes.
- Richards, L. (1931). Capillary conduction of liquids in porous media. *Physics*, 1, 318–333.
- Roberto Pizarro Tapia. (2012). Análisis de la gestión del agua en zonas áridas y semiáridas: una propuesta de actuación. *Afers Internacional*, (45), 11–33.
- Rosales Hurtado, D. (2011, septiembre). *Caracterización de los "Tepetates" usados como materiales de sustitución en la ciudad de Querétaro* (Tesis). Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro.
- Schaap, M. G., y van Genuchten, M. T. (1998). Neural network analysis of hierarchical prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America*, 62, 847–855.
- UAQ-UNAM. (2002). *Estudio integral sobre la problemática del agua, subsidencia y sismicidad en el valle de Aguascalientes* (Informe final) (p. 433). Aguascalientes: Universidad Autónoma de Querétaro.

Vázquez, A. T. (2016, mayo 10). Portal de Información Geográfica - CONABIO.

Recuperado el 16 de mayo de 2016, a partir de

<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

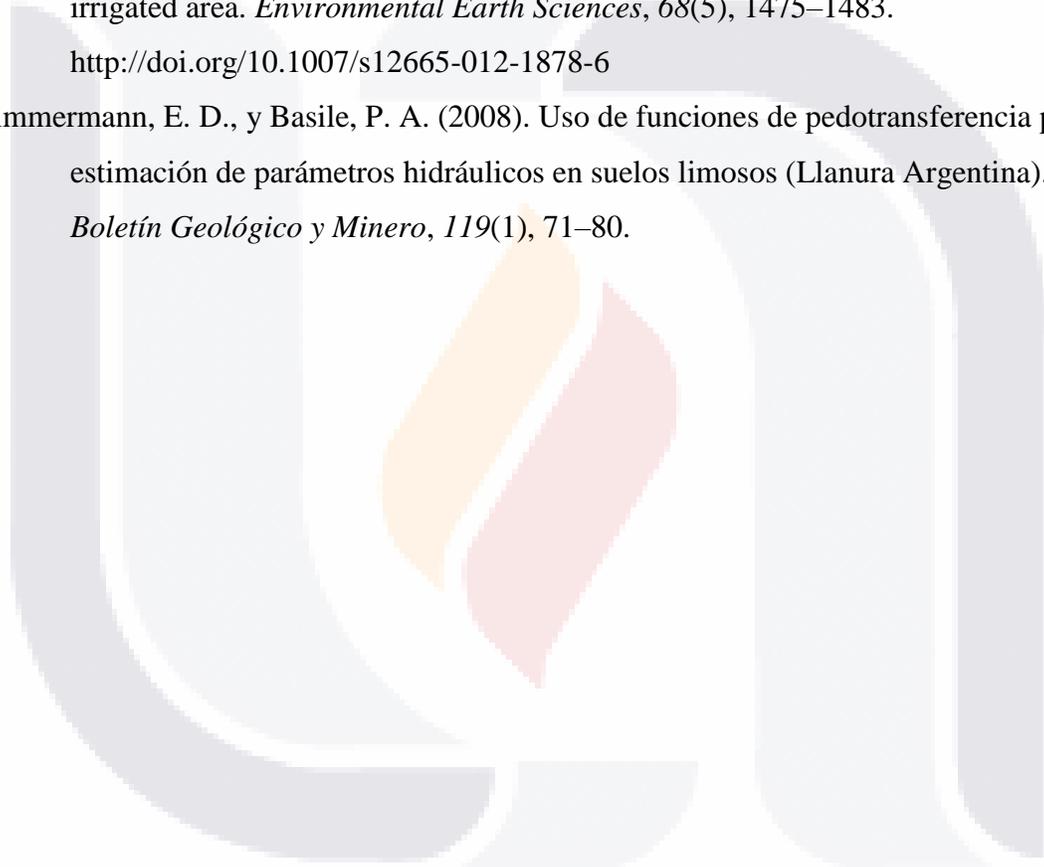
Velázquez Aguirre, L., y Ordaz Ayala, A. (1988). Provincias hidrogeológicas de México, 19.

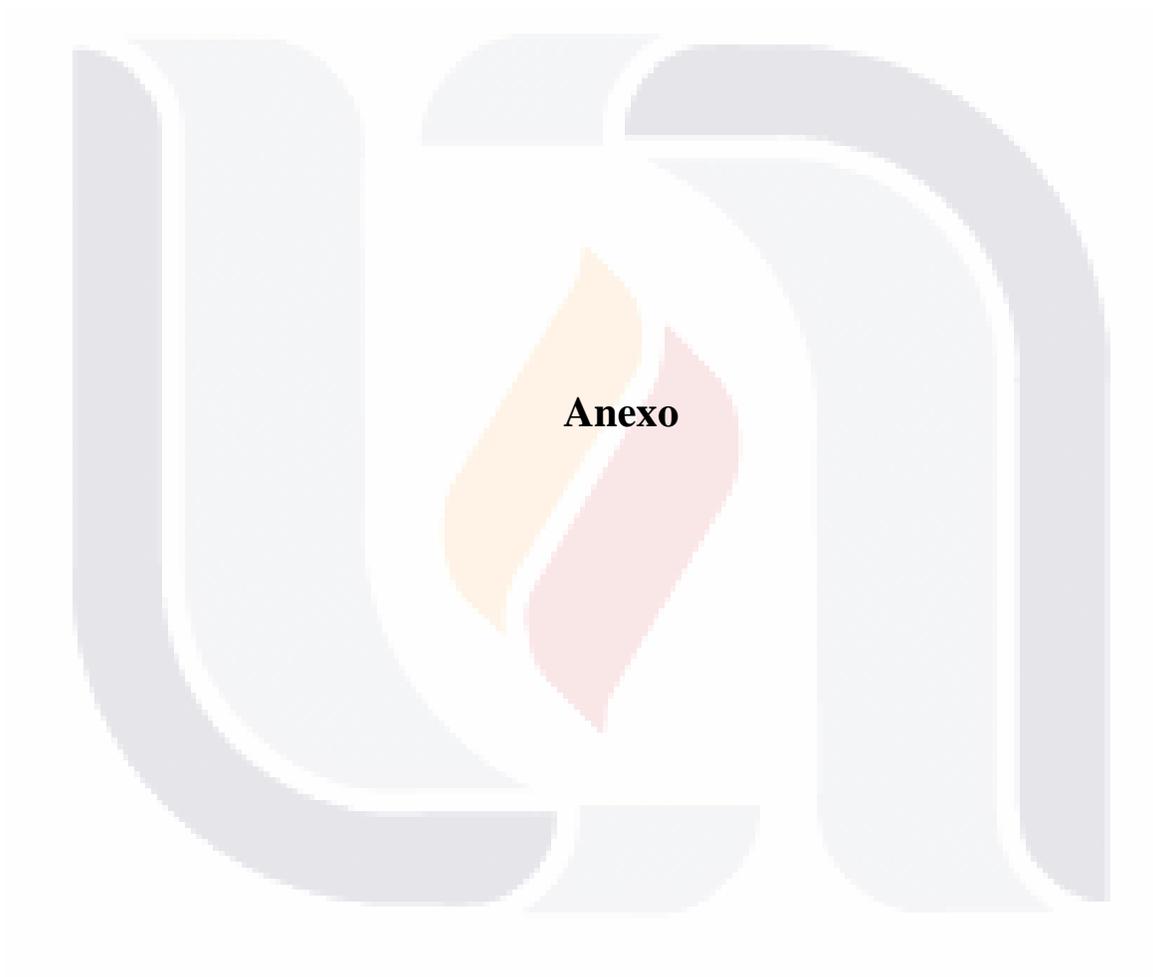
Zhang, C.-Y., Zhang, S., Yin, M.-Y., Ma, L.-N., He, Z., y Ning, Z. (2013). Nitrogen isotope studies of nitrate contamination of the thick vadose zones in the wastewater-irrigated area. *Environmental Earth Sciences*, 68(5), 1475–1483.

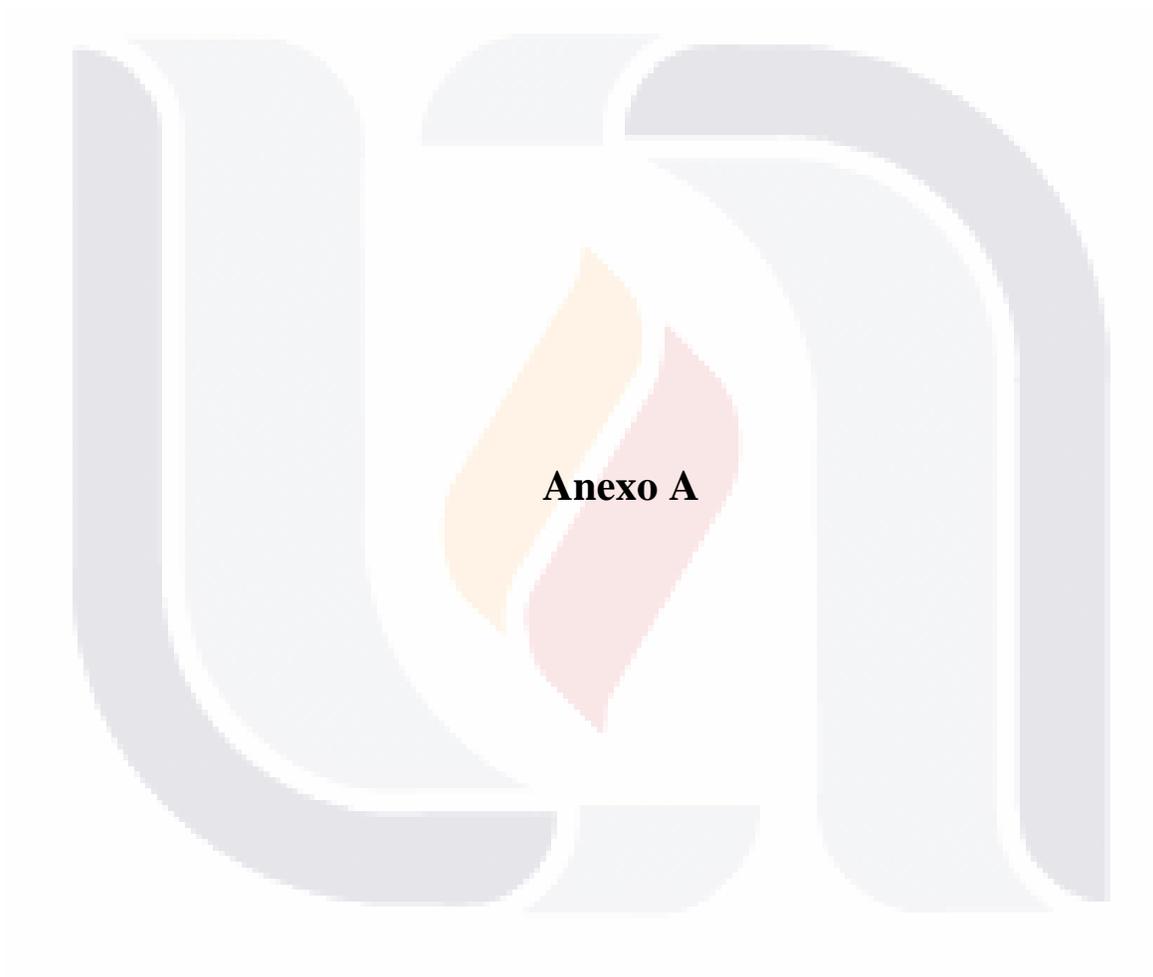
<http://doi.org/10.1007/s12665-012-1878-6>

Zimmermann, E. D., y Basile, P. A. (2008). Uso de funciones de pedotransferencia para la estimación de parámetros hidráulicos en suelos limosos (Llanura Argentina).

Boletín Geológico y Minero, 119(1), 71–80.







SECCIÓN 7

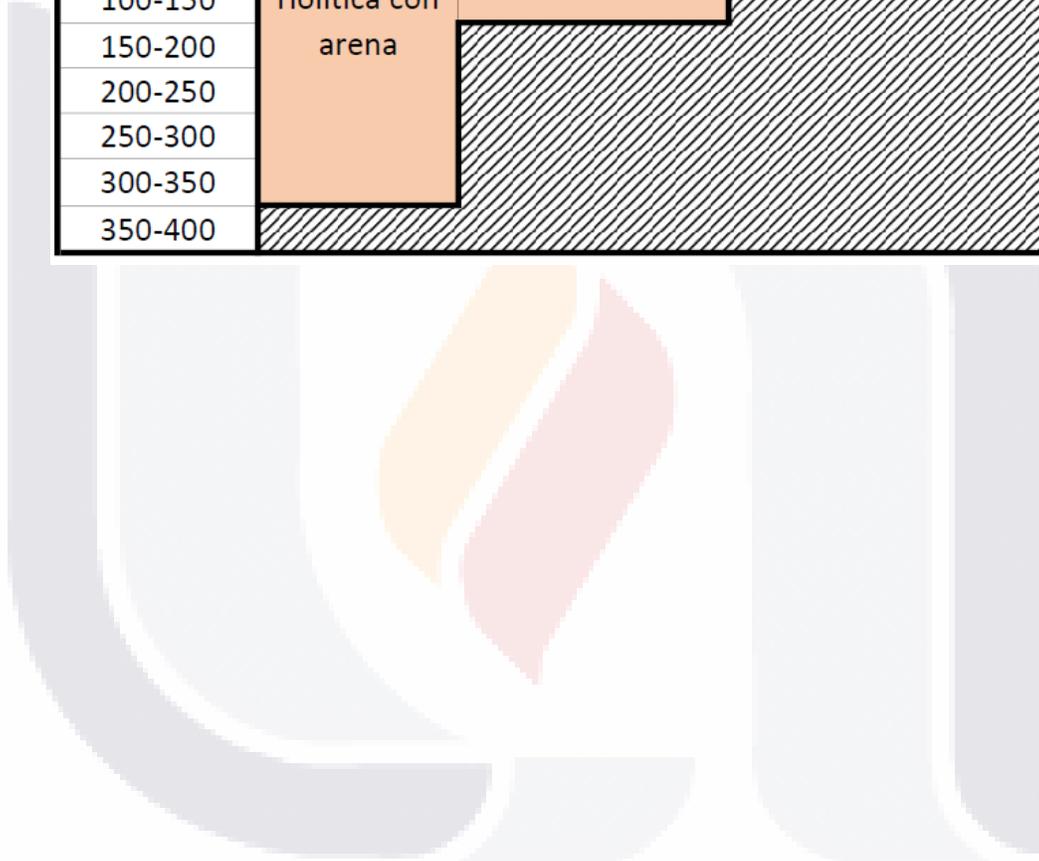
	RR-12	1692	1397	745	RR-11	1379	620	T-11	PAB-1	PMX-141	PMX-30	310
0-5	Grava, arena y limo	Tierra vegetal	Arenas con arcilla	Grava y arena con arcilla	Grava y arena con arcilla	Gravas y arenas con toba	Toba	Toba híbrida alterada	Toba híbrida alterada			
5-50	Grava y bolero de ignimbrita	Tepetate con bolero	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas y arenas con toba	Gravillas con arena tobacea	Gravas y gravillas	Gravas y gravillas
50-100	Grava y bolero de ignimbrita	Tepetate con bolero	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas y arenas con toba	Gravillas con arena tobacea	Gravas y gravillas	Gravas y gravillas
100-150	Grava y bolero de ignimbrita	Tepetate con bolero	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas y arenas con toba	Gravillas con arena tobacea	Gravas y gravillas	Gravas y gravillas
150-200	Ignimbrita	Tepetate con bolero	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas y arenas con toba	Gravillas con arena tobacea	Gravas y gravillas	Gravas y gravillas
200-250	Fragmentos angulosos de ignimbrita, roca ígnea y grava	Tepetate con bolero	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas y arenas con toba	Gravillas con arena tobacea	Gravas y gravillas	Gravas y gravillas
250-300	Fragmentos angulosos de ignimbrita, roca ígnea y grava	Tepetate con bolero	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas y arenas con toba	Gravillas con arena tobacea	Gravas y gravillas	Gravas y gravillas
300-350	Fragmentos angulosos de ignimbrita, roca ígnea y grava	Tepetate con bolero	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas y arenas con toba	Gravillas con arena tobacea	Gravas y gravillas	Gravas y gravillas
350-400	Fragmentos angulosos de ignimbrita, roca ígnea y grava	Tepetate con bolero	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas y arenas con toba	Gravillas con arena tobacea	Gravas y gravillas	Gravas y gravillas
400-450	Fragmentos angulosos de ignimbrita, roca ígnea y grava	Tepetate con bolero	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Arenas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas con arcilla	Gravas y arenas con toba	Gravillas con arena tobacea	Gravas y gravillas	Gravas y gravillas

SECCIÓN 6

	189	T-8	PO-162	90	PMX-81	PMX-26	PMX-22
0-5	Tierra vegetal	Arenas	Toba	Gravas y arenas con arcilla	Gravas y arenas con arcilla	Toba híbrida alterada	Toba híbrida alterada
5-50	Intercalaciones de tepetate y arcilla	Tobas y arenas	Gravas y gravillas	Gravas y arenas con arcilla	Gravas y arenas con arcilla	Gravas y arenas tobáceas	Intercalaciones de grava, gravilla y clásticos
50-100			Toba arenosa			Gravas y arenas	
100-150	150-200	Gravas y arenas	Gravas y gravillas	Arcilla arenosa	Arcilla arenosa	Gravas y gravillas	Riolita (alterada)
150-200						Riolita (alterada)	
200-250	250-300	300-350	350-400	400-450	400-450	400-450	400-450
250-300							
300-350							
350-400							
400-450							

SECCIÓN 5

	508	287	207
0-5	Toba riolitica	Tierra vegetal con arena y grava	Tierra vegetal con toba
5--50	Grava riolitica con arena	Intercalaciones de roca, grava y arena	Grava, arena y gravillas empacadas en toba arcillosa
50-100			
100-150			
150-200			
200-250			
250-300			
300-350			
350-400			



SECCIÓN 4

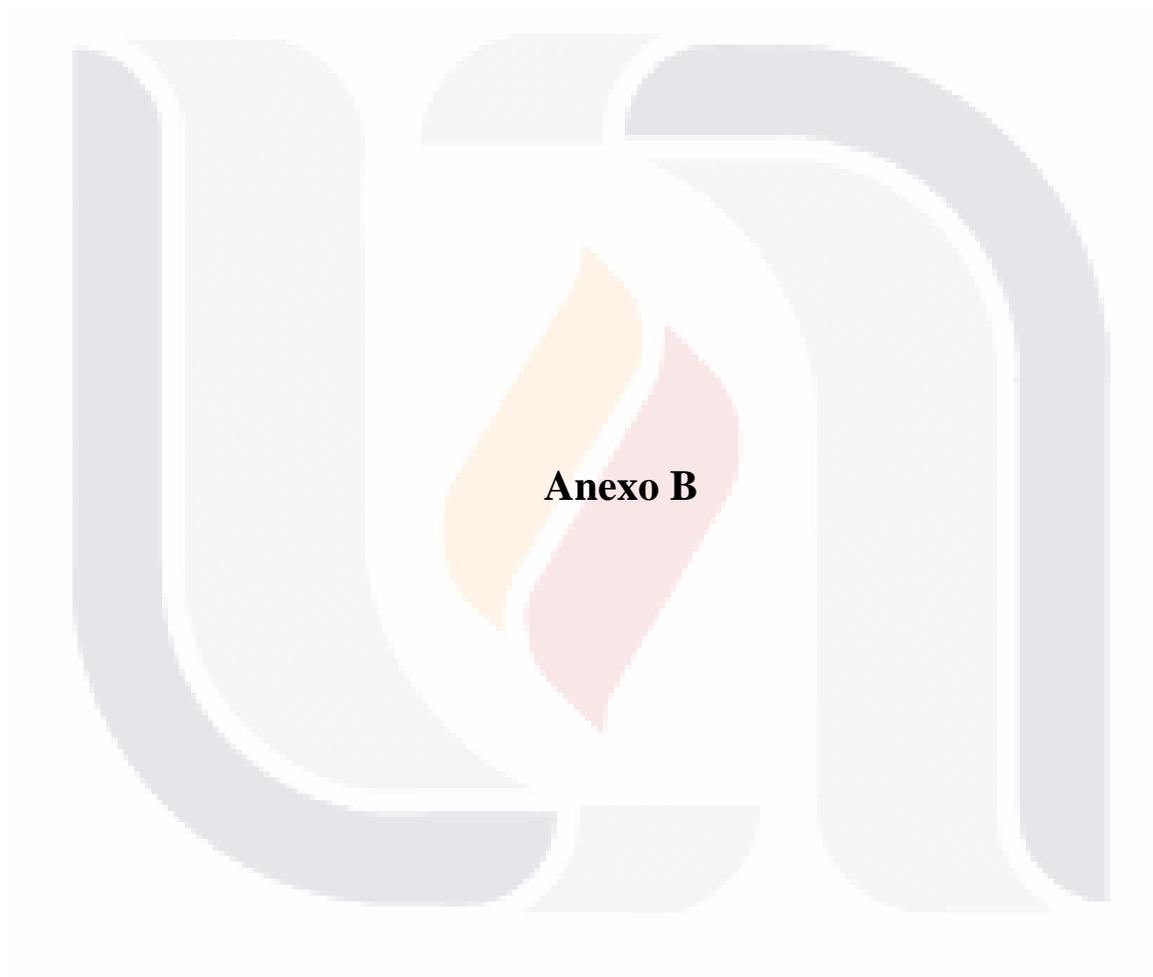
	PO-172	PMX-144	1669	JM-5	JM-1	2824	399	JM-23	2508	1167	PMX-13	JM-18	P-128	P-087	PMX-56
0-5			Suelo arcilloso arenoso	Material clase 1		Pedernal blanco		Intercalaciones de arena, limo y gravilla		Toba híbrida alterada	Toba híbrida alterada	Arenas líticas y limos	Arcilla con intercalaciones de grava	Toba con arena cementada	Toba híbrida alterada
5-50	Intercalación es de arenas tobáceas con gravillas	Intercalación es de arenas tobáceas con gravillas	Grava y arena con intercalaciones de toba y arcilla	Material clase 2	Toba arenosa con gravas y fragmentos polimícticos	Tepetate con intercalación es de arena y grava	Tepetate con intercalación es de arcilla	Intercalaciones de arena con gravilla	Intercalaciones de tepetate (blanco y rojo) con arena y grava	Gravas y arenas con material limo arcilloso	Gravas y arenas con material limo arcilloso	Toba arenosa	Arenas con intercalaciones de arena y grava	Intercalaciones de arenas, gravas y gravillas	Intercalaciones de arena y gravilla
50-100								Alternancia de gravas y arenas en matriz limoarcillosa							
100-150			Arcilla y fragmentos de toba	Material clase 1	Boleos y gravas con poca arcilla	Canto rodado		Bloques y boleos riolíticos							Arenas, gravas empacadas en arcilla
150-200	Gravas y gravillas	Gravas y gravillas										Toba no lítica			
200-250	Riolita poco alterada	Riolita poco alterada	Aglomerado volcánico		Rocas de origen ígneo			Intercalaciones de arena con gravilla							
250-300			Roca ígnea masiva	Material clase 2	Tobas no líticas										
300-350															
350-400												Arenas líticas y cuarzo			
400-450												Toba no lítica	Toba arcillosa		
450-500													Toba arcillosa	Toba arenosa no retrabajada	
500-550													Toba arenosa no retrabajada		
550-600													Toba arenosa no retrabajada		

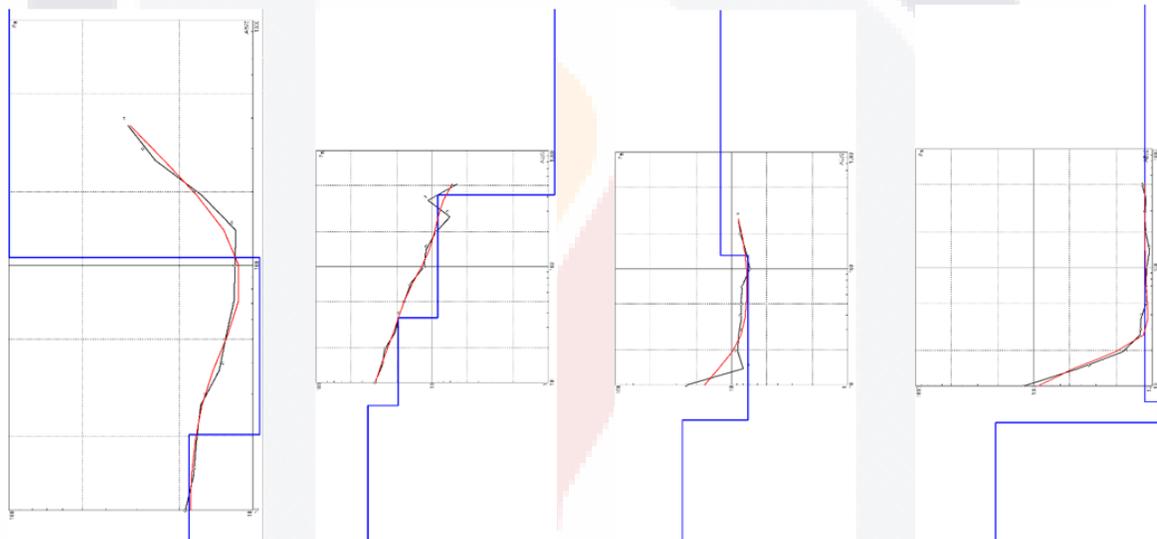
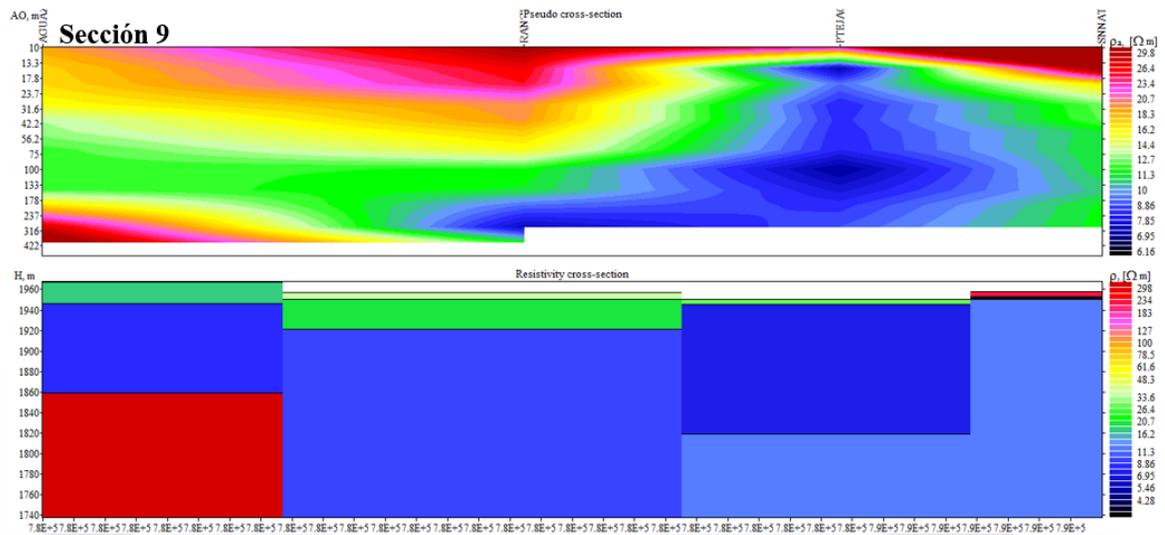
SECCIÓN 3

	137	74	P-118	P-057	P-086	P-109	P-112	1135	P-030	P-045
0-5		Toba	Toba retrabajada	Arena en matriz arcillosa		Grava, lictos de rolita		Toba compactada	Arenas y limos	Toba roñica arcillo arenosa
5-50	Tepetate	Boleo, grava, gravilla y arena		Toba arcillo-arenosa con castos polimícticos y horizontes de arena	Toba retrabajada	Toba lítica e híbrida en matriz arenosa arcillosa	Atenuancia entre arena y grava en matriz arcillosa y toba arcillo arenosa	Castos medios y gruesos con poca arcilla	Arena con lieros horizontes de arcilla	
50-100		Boleo amparados en arena intercalados con grava y gravilla	Boleo de roñita							
100-150		Boleo			Boleo de roñita					
150-200	foca		Toba arcillo arenosa	Arena gruesa con arcilla	Toba retrabajada y conglomerado	Gravas y arenas en matriz arcillosa intercaladas por toba arenosa	Arena y areniscas empacadas en arcilla			Conglomerado grueso y medio
200-250							Castos polimícticos	Intercalaciones de arena, grava y boleos de origen lítico	Conglomerado roñítico	
250-300			Toba roñica intercalada por toba arcillo arenosa	Arena, grava y arcilla con boleos	Intercalaciones de toba roñica y arcillo arenosa		Intercalacion de arena y gravas con toba roñica cementada		Arenas de grano medio y fino en matriz arcillosa	
300-350				Castos medio y gruesos con horizontes de arcilla						
350-400										
400-450										
450-500			Toba roñica							
500-550				Fragmentos de lignitrta						
550-600								Toba arcillo arenosa con fragmentos de roca		Conglomerado empacado en toba

SECCIÓN 1

	1312	PAB-15	422	185-A	PMX-43	R-63
0-5	Suelo vegetal	Suelo vegetal	Suelo vegetal	Toba vítrea arcillosa	Gravas con gravilla, clásticos gruesos	Toba arenosa, grava y arena con matriz arcillosa
5-50	(Tepetate) Arena de grano fino a grueso con intercalaciones de arcilla	(Tepetate) Arena de grano fino a grueso con intercalaciones de arcilla	Gravas y arenas con intercalaciones de arcilla			
50-100	Arena de grano medio con arcilla	Arena de grano medio con arcilla	Gravas empacadas en arcilla			
100-150	Arena con gravilla e intercalaciones de arcilla	Arena con gravilla e intercalaciones de arcilla	(Conglomerado) Gravas, gravillas y arena empacadas en arcilla	Clastos de arena y grava con intercalaciones de arcilla	Clasticos gruesos, gravas	Gravas y arenas intercalados por arcilla
150-200	[Hatched pattern]	[Hatched pattern]	Gravas y gravillas con poca arcilla		Riolita (232)	Toba arcillosa
200-250				Riolita alterada	Toba arcillosa, gravas y arenas con intercalaciones de arcilla	
250-300	[Hatched pattern]	[Hatched pattern]	[Hatched pattern]	[Hatched pattern]	[Hatched pattern]	[Hatched pattern]
300-350						





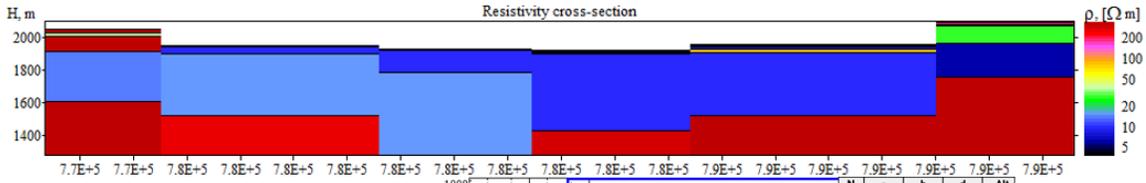
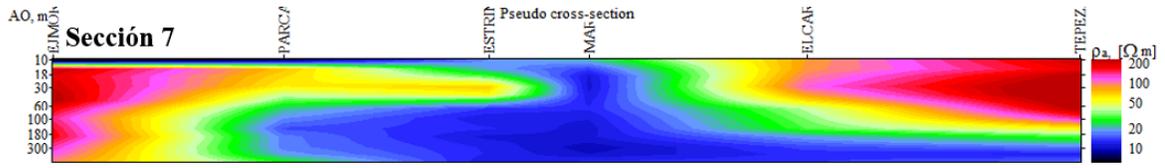
N	ρ	h	d	Alt	N	ρ	h	d	Alt	N	ρ	h	d	Alt	N	ρ	h	d	Alt
1	18.3	20.4	20.4	1947	1	35.7	6.3	6.3	1951	1	26.5	5	5	1945	1	211	4.87	4.87	1953
2	8.44	87.4	108	1859	2	19.6	29.7	36	1921	2	7.21	126	131	1819	2	7.43	0.437	5.31	1953
3	1690				3	8.98	380	416	1541	3	12.4				3	2.82	2.03	7.34	1951
															4	11.6			

Agua Zarca

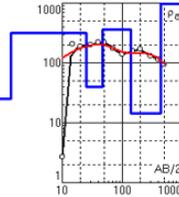
Rancho Charco Azul

San Jacinto

San Natura

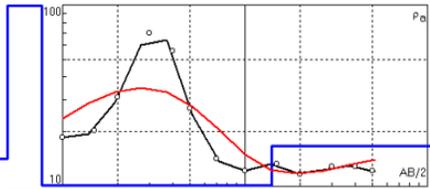


Ejido Morelos



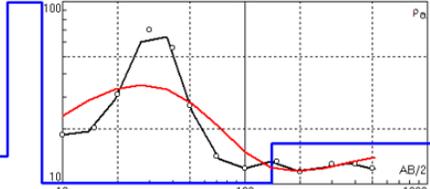
N	p	h	d	Alt
1	25.1	1.37	1.37	2052
2	318	24.1	25.5	2028
3	40.3	21.8	47.2	2006
4	363	93.1	140	1913
5	14.2	306	446	1607
6	1192			

Paralelo Carretera



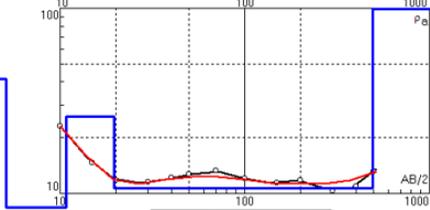
N	p	h	d	Alt
1	14.1	5	5	1924
2	307	2.71	7.71	1921
3	10.1	132	140	1789
4	16.7			

Estación Rincón



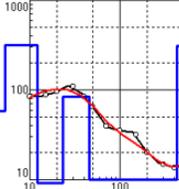
N	p	h	d	Alt
1	14.1	5	5	1924
2	307	2.71	7.71	1921
3	10.1	132	140	1789
4	16.7			

Mar Negro



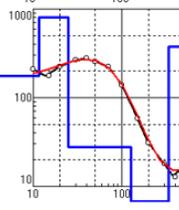
N	p	h	d	Alt
1	58.3	5.37	5.37	1949
2	315	6.79	12.2	1942
3	9.14	11.1	23.3	1931
4	83.3	22.5	45.7	1908
5	10	383	429	1525
6	309			

El Carmen

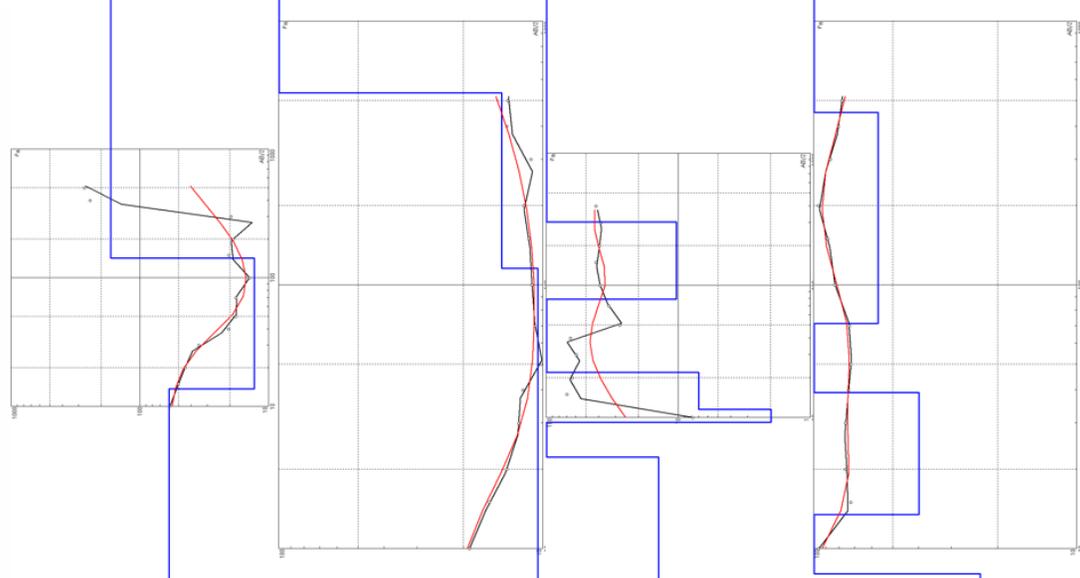
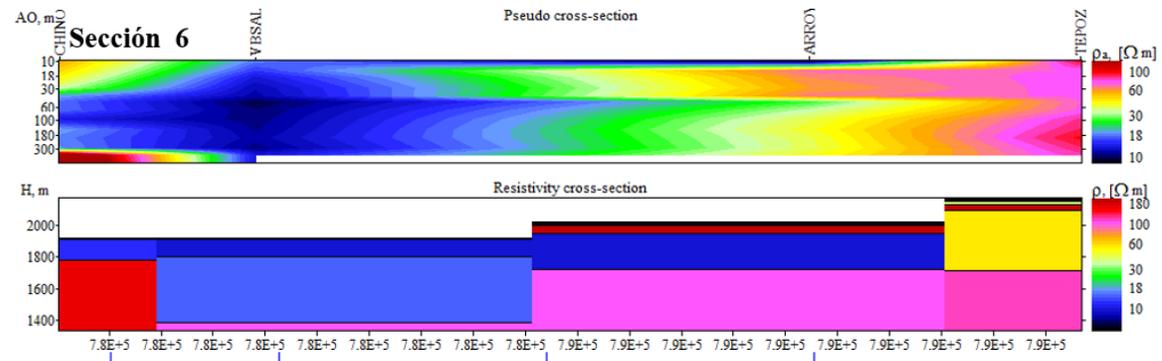


N	p	h	d	Alt
1	175	11.7	11.7	2081
2	805	13.2	24.9	2068
3	27.9	103	128	1965
4	6.76	210	338	1755
5	376			

Tepezalá



N	p	h	d	Alt
1	175	11.7	11.7	2081
2	805	13.2	24.9	2068
3	27.9	103	128	1965
4	6.76	210	338	1755
5	376			



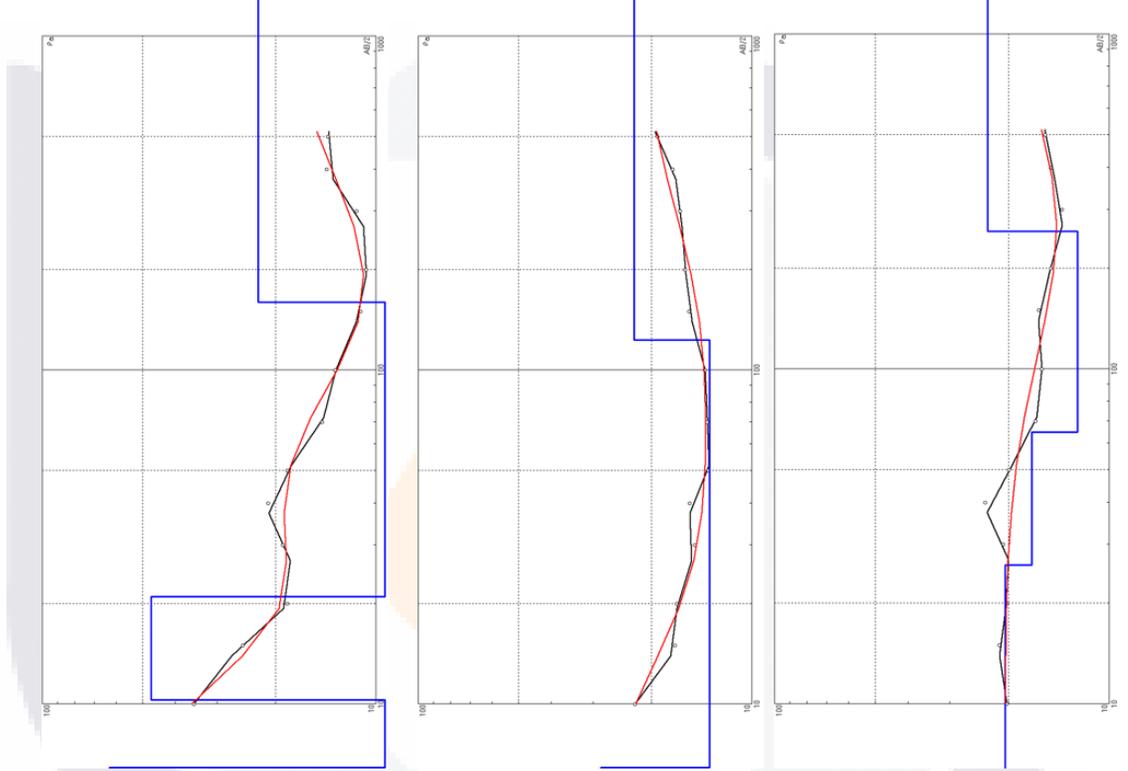
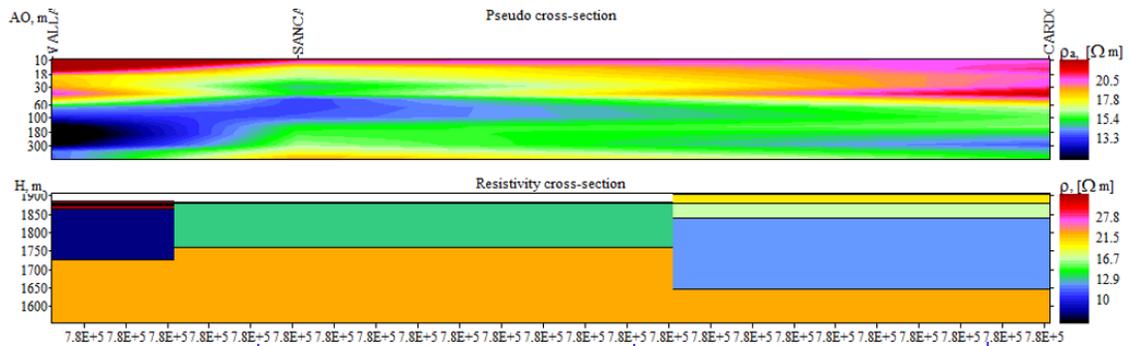
N	p	h	d	Alt	N	p	h	d	Alt	N	p	h	d	Alt	N	p	h	d	Alt
1	59.3	13.6	13.6	1908	1	22.7	6.67	6.67	191	1	14.1	5	5	202	1	138	5	5	2163
2	13	128	142	1780	2	10.4	109	116	180	2	383	4.17	9.17	201	2	23.3	3.01	8.01	2160
3	169				3	14.3	419	535	138	3	1.99	2.36	11.5	201	3	219	5.4	13.4	2155
					4	108				4	6.99	10.3	21.9	200	4	39.8	25.6	39	2129
										5	198	56.9	78.7	194	5	309	32.3	71.3	2097
										6	10.3	224	303	172	6	56.9	380	451	1717
										7	102				7	118			

**Planta
CHINOIN**

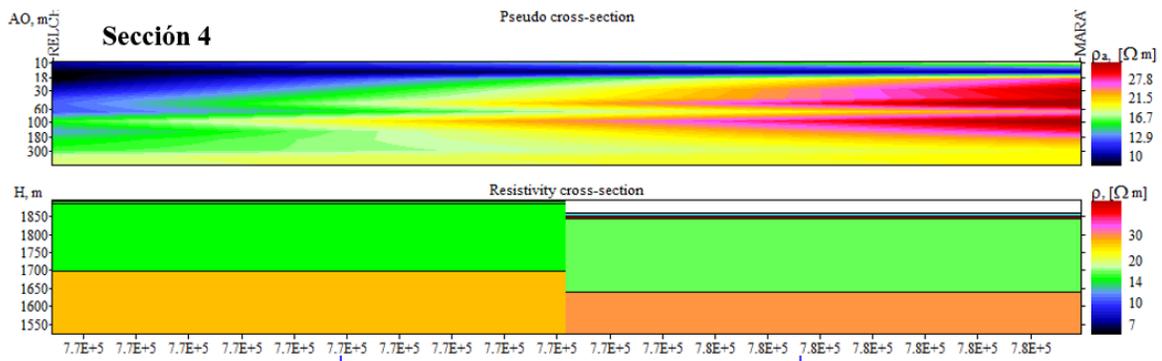
VB_Salitrillo

**Arroyo
Hondo**

Tepozán



N	ρ	h	d	Alt	N	ρ	h	d	Alt	N	ρ	h	d	Alt
1	63	5.05	5.05	1880	1	28.4	5.27	5.27	1879	1	20.5	25.9	25.9	1878
2	7.06	5.2	10.3	1875	2	13.4	118	123	1761	2	17	38.9	64.8	1839
3	47.3	10.7	20.9	1864	3	22.6				3	12.4	192	257	1647
4	8.69	139	160	1725						4	23.1			
5	22.6													

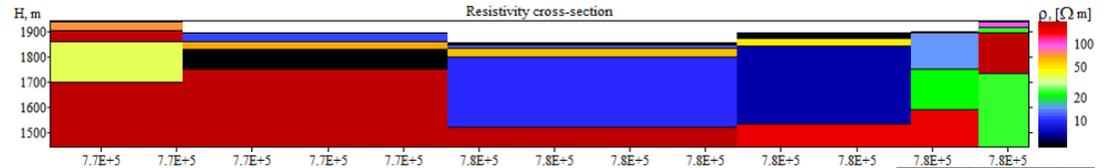
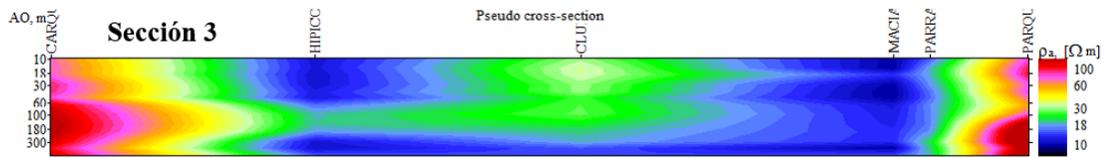


N	ρ	h	d	Alt
1	15.6	5	5	1888
2	2.68	2.59	7.59	1885
3	15	189	196	1697
4	27.4			

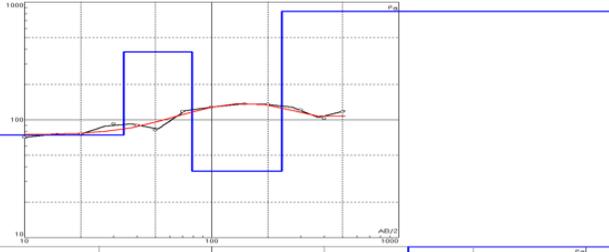
El Chaveño

N	ρ	h	d	Alt
1	12.6	9.67	9.67	1852
2	189	8.63	18.3	1844
3	16.8	205	223	1639
4	29.6			

Maravillas



Arquitos



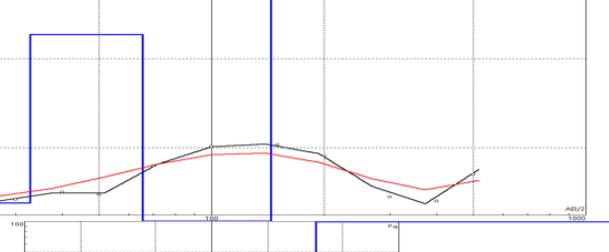
N	p	h	d	Alt
1	74.6	34	34	1904
2	379	44.7	78.7	1859
3	36.7	159	238	1700
4	834			

Hípico



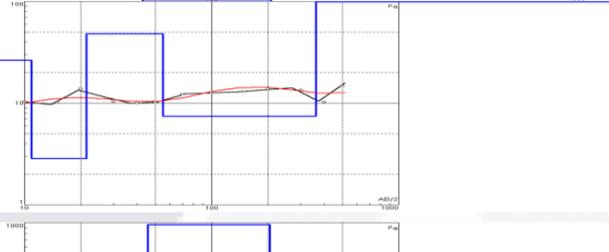
N	p	h	d	Alt
1	23.8	5	5	1852
2	76.6	5.24	10.2	1847
3	12.2	14.1	24.3	1833
4	58.9	31.4	55.8	1801
5	10.9	280	336	1521
6	197			

Club Campestre



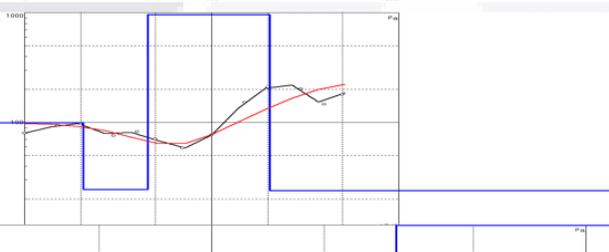
N	p	h	d	Alt
1	11.3	32.7	32.7	1861
2	64.2	32.8	65.5	1829
3	2.28	78.5	144	1750
4	753			

Macías Maciel



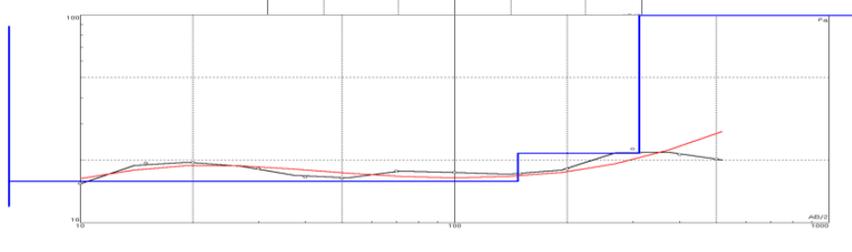
N	p	h	d	Alt
1	7.4	5	5	1891
2	26.4	5.93	10.9	1895
3	2.86	10.6	21.5	1874
4	48	33.5	55	1841
5	7.41	307	362	1534
6	150			

Parras



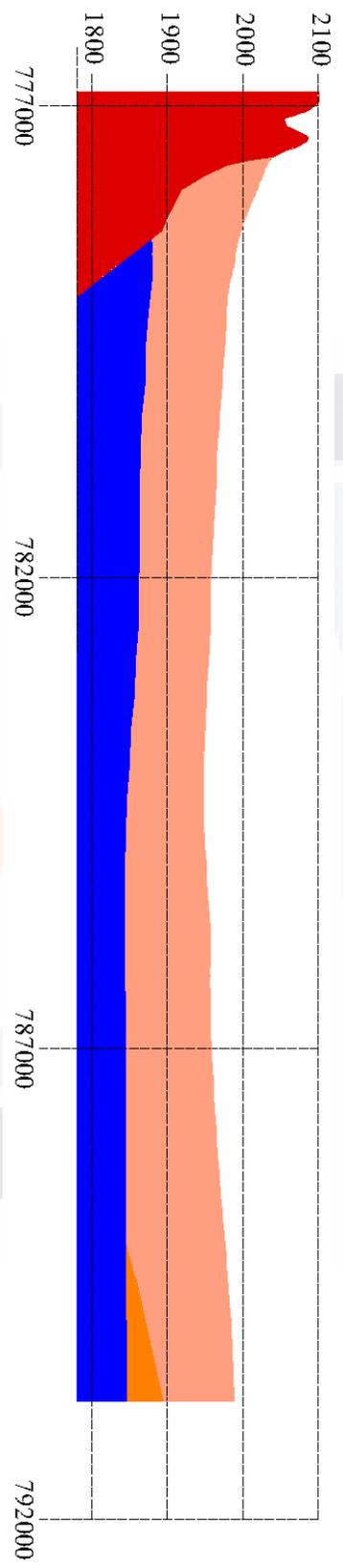
N	p	h	d	Alt
1	99.1	20.7	20.7	1917
2	24.5	24.8	45.4	1893
3	964	159	205	1733
4	23.9			

Parque México

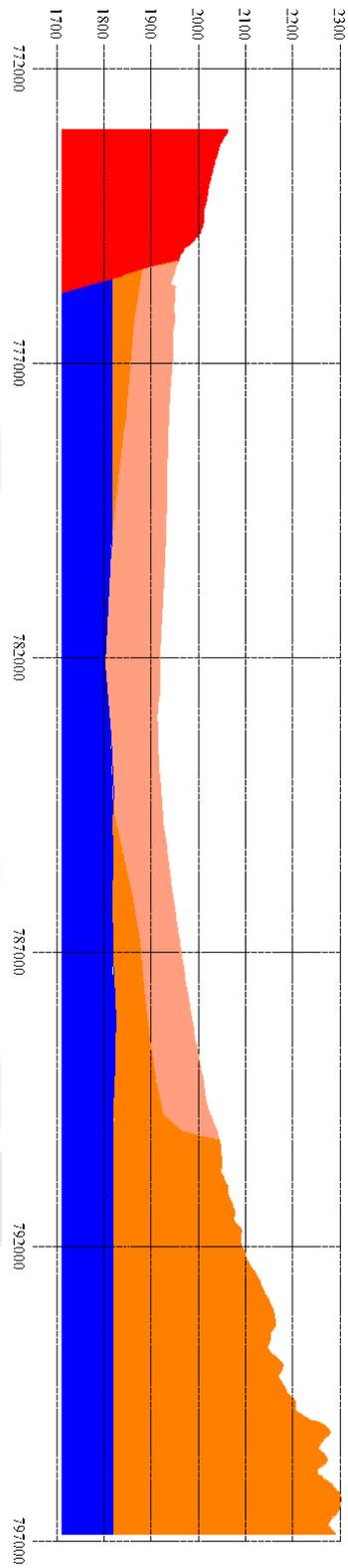


N	p	h	d	Alt
1	12	5	5	1896
2	88.4	1.41	6.41	1895
3	15.8	141	148	1753
4	21.6	163	311	1590
5	151			

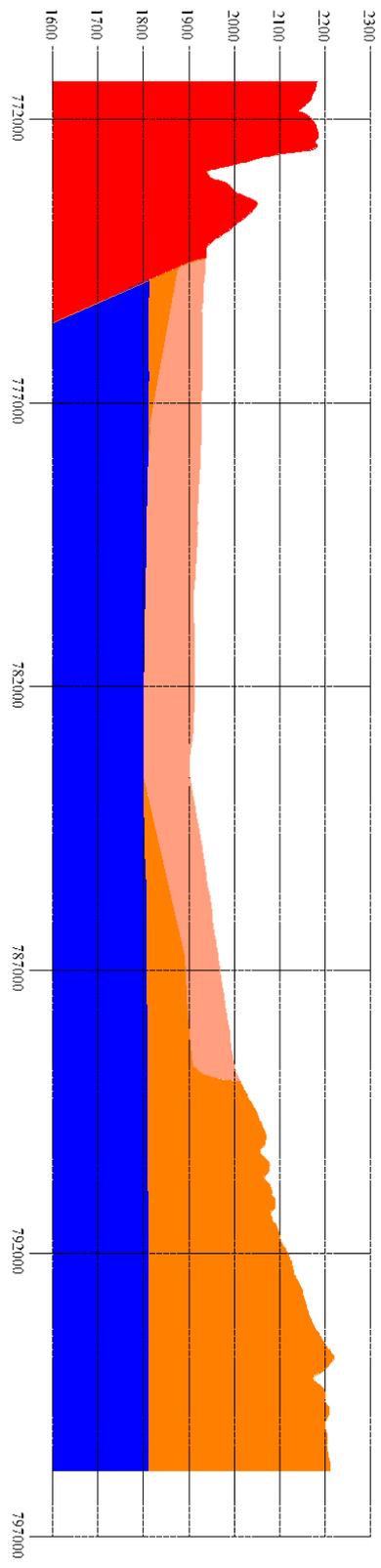
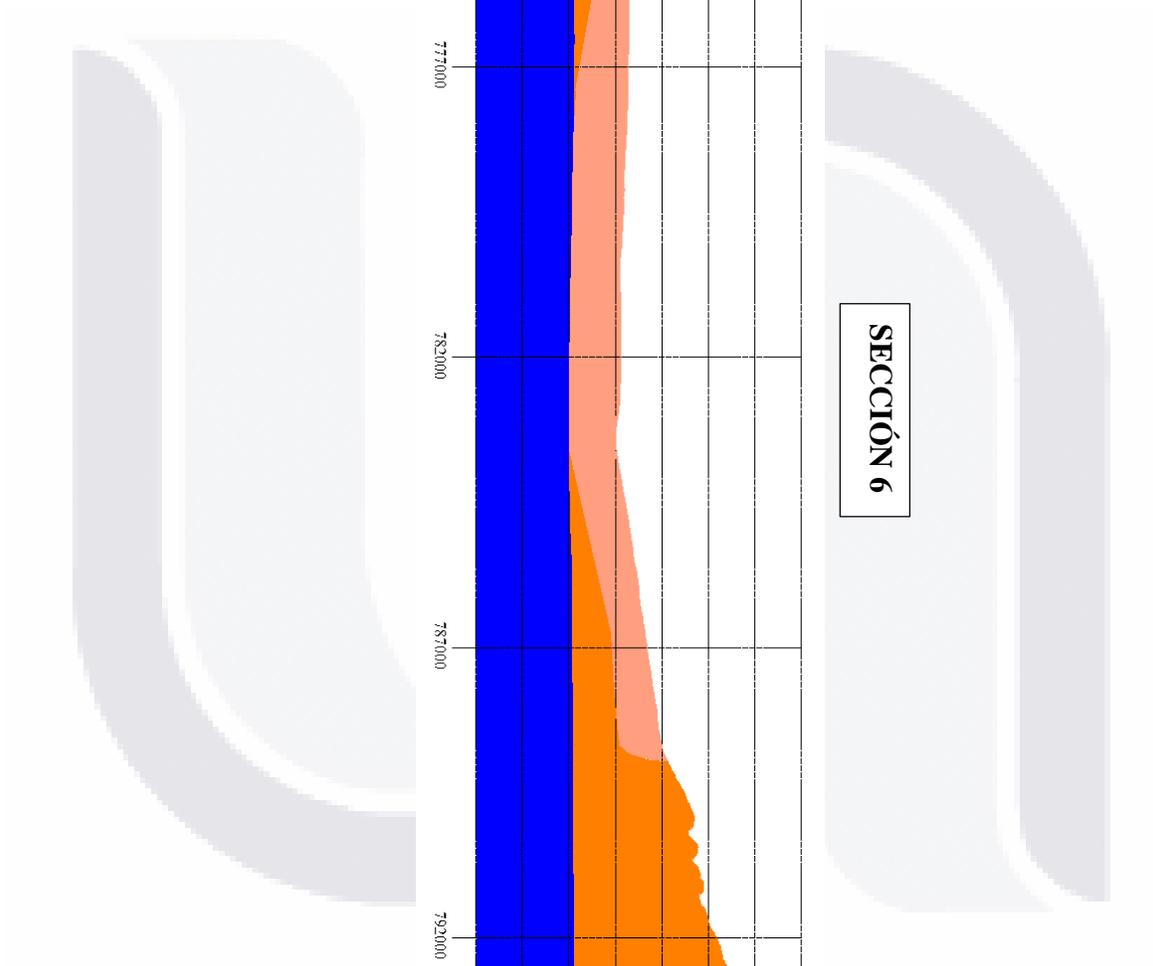




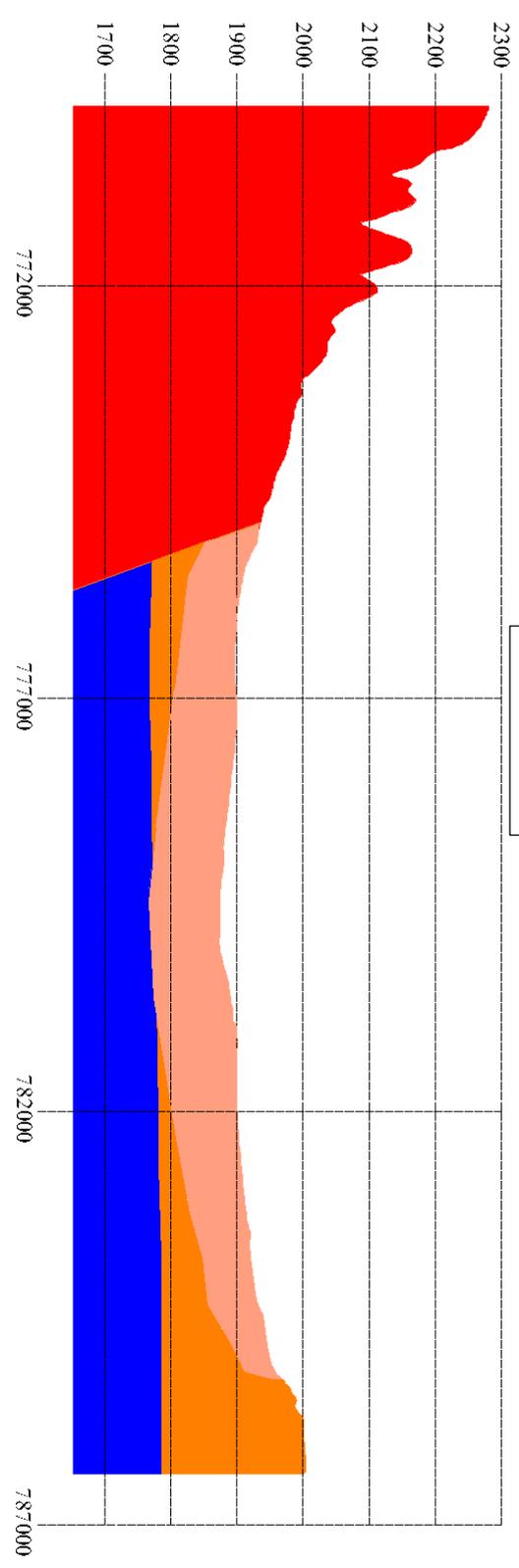
SECCIÓN 9



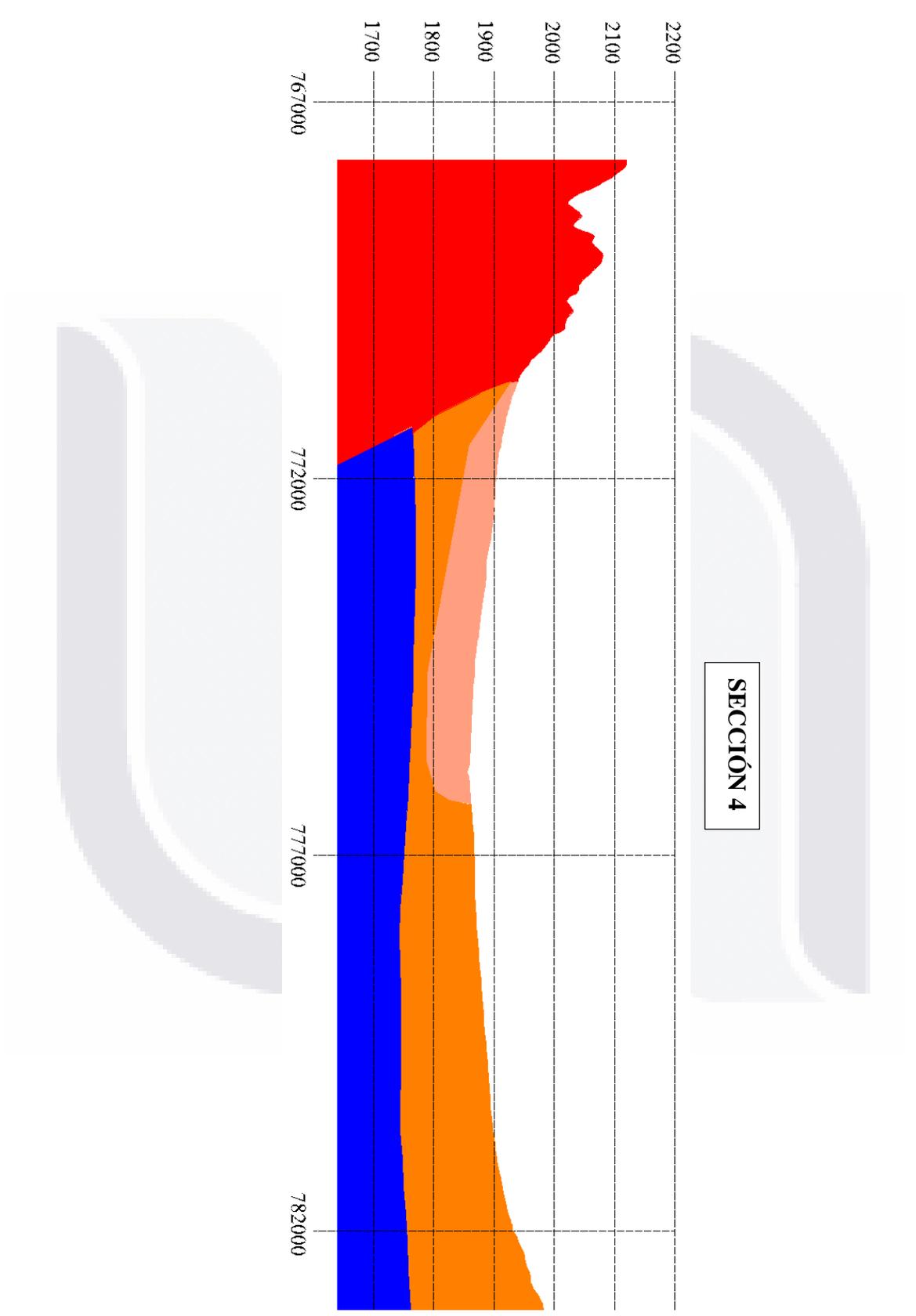
SECCIÓN 7

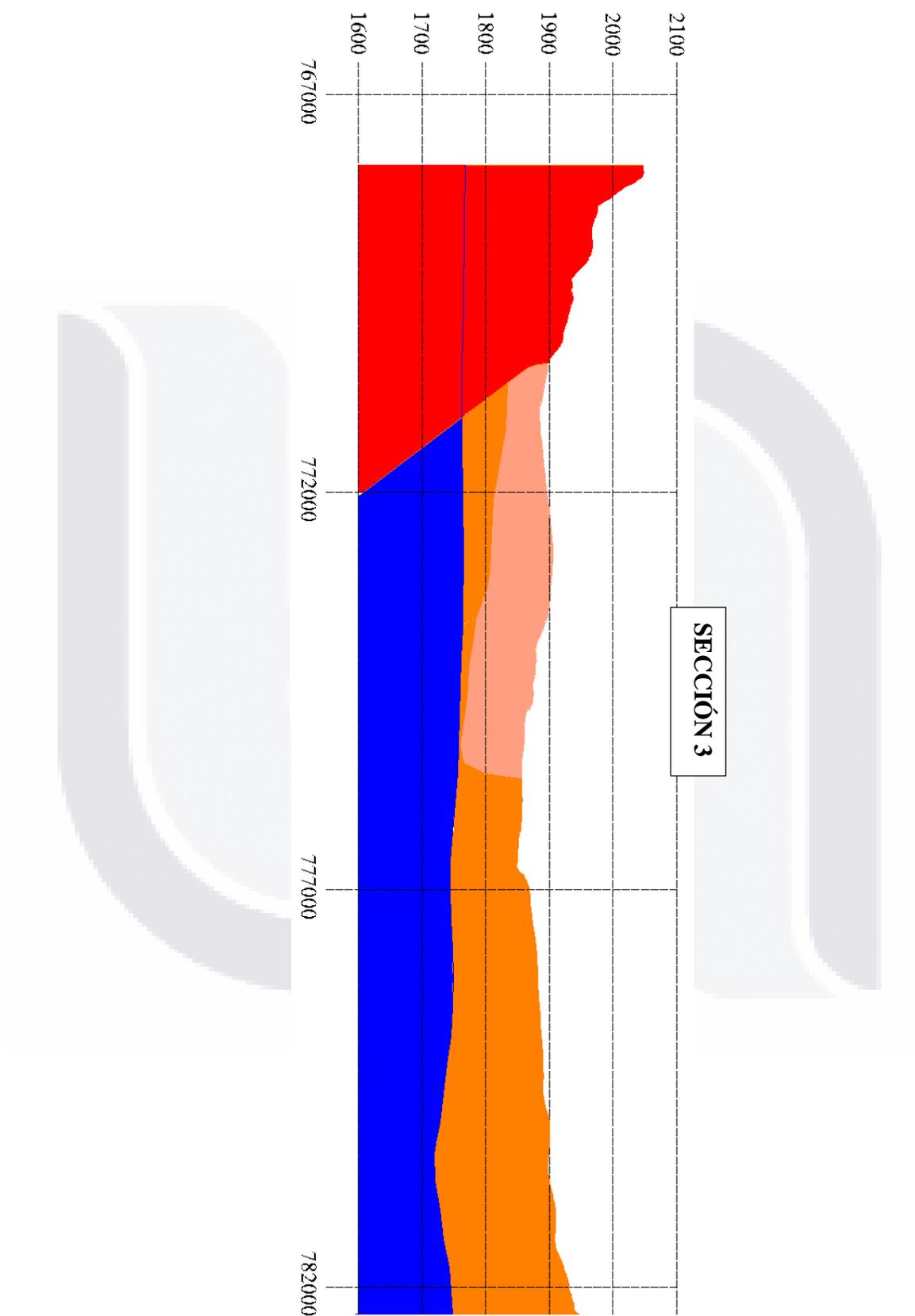


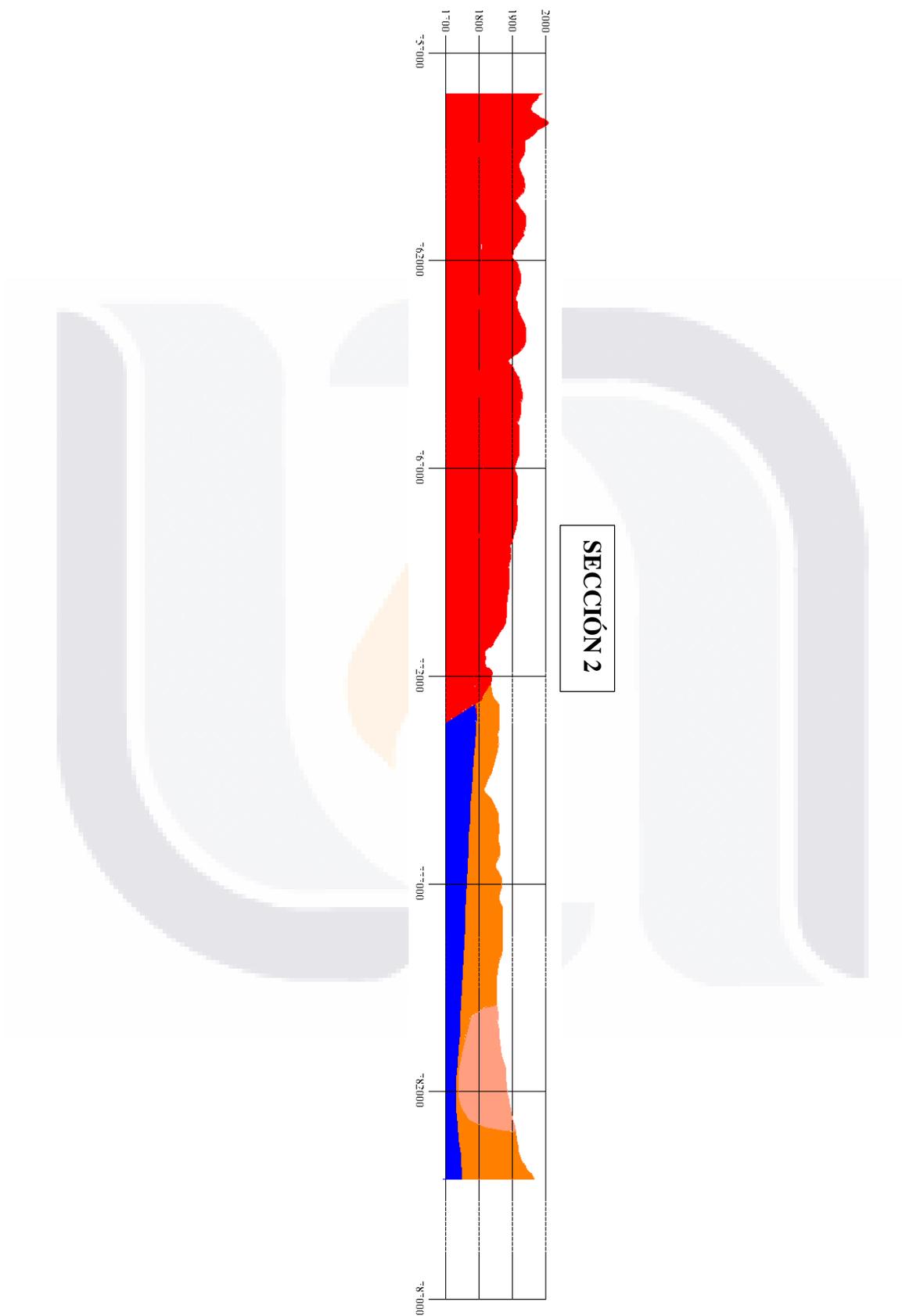
SECCIÓN 6

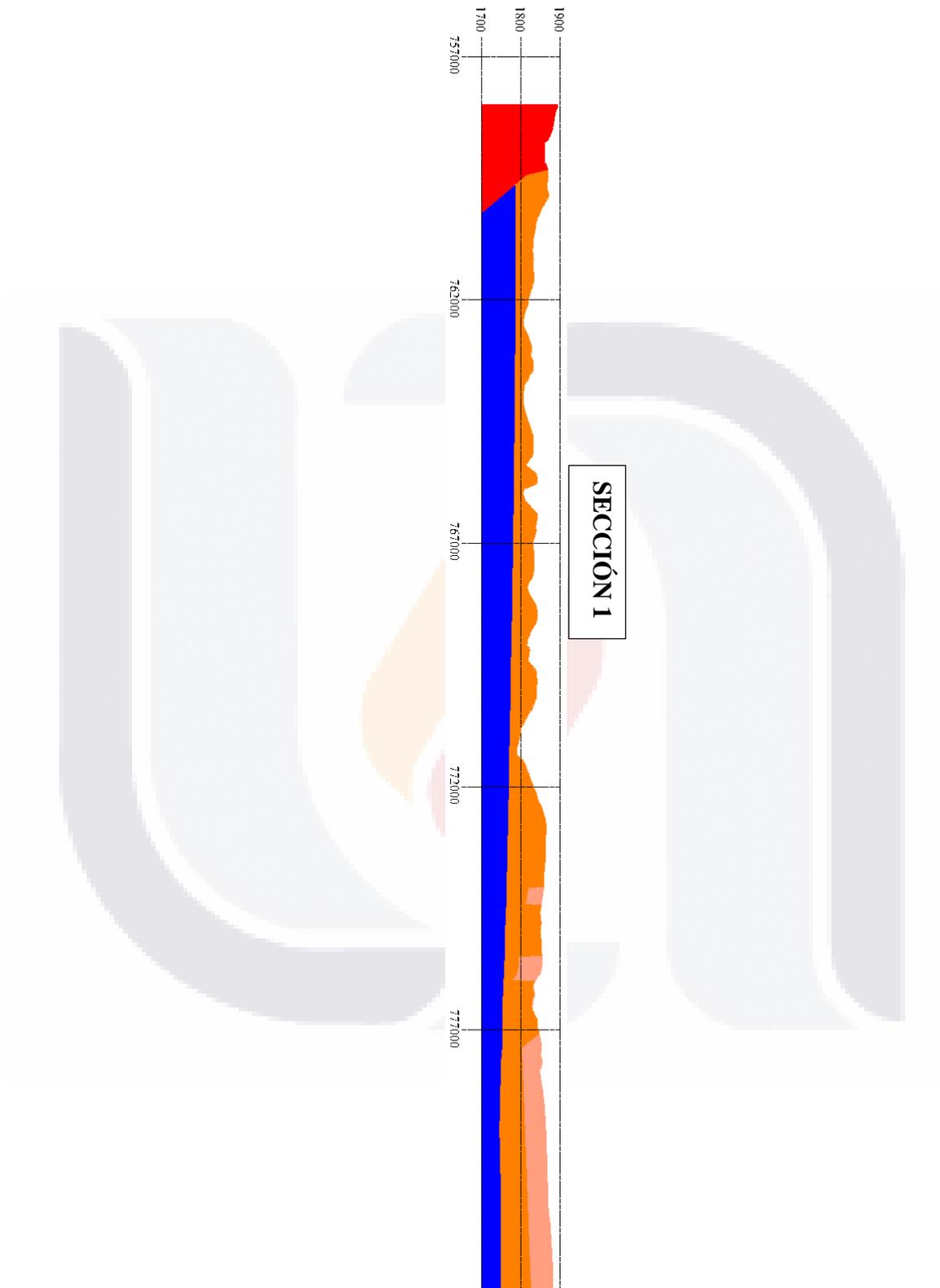


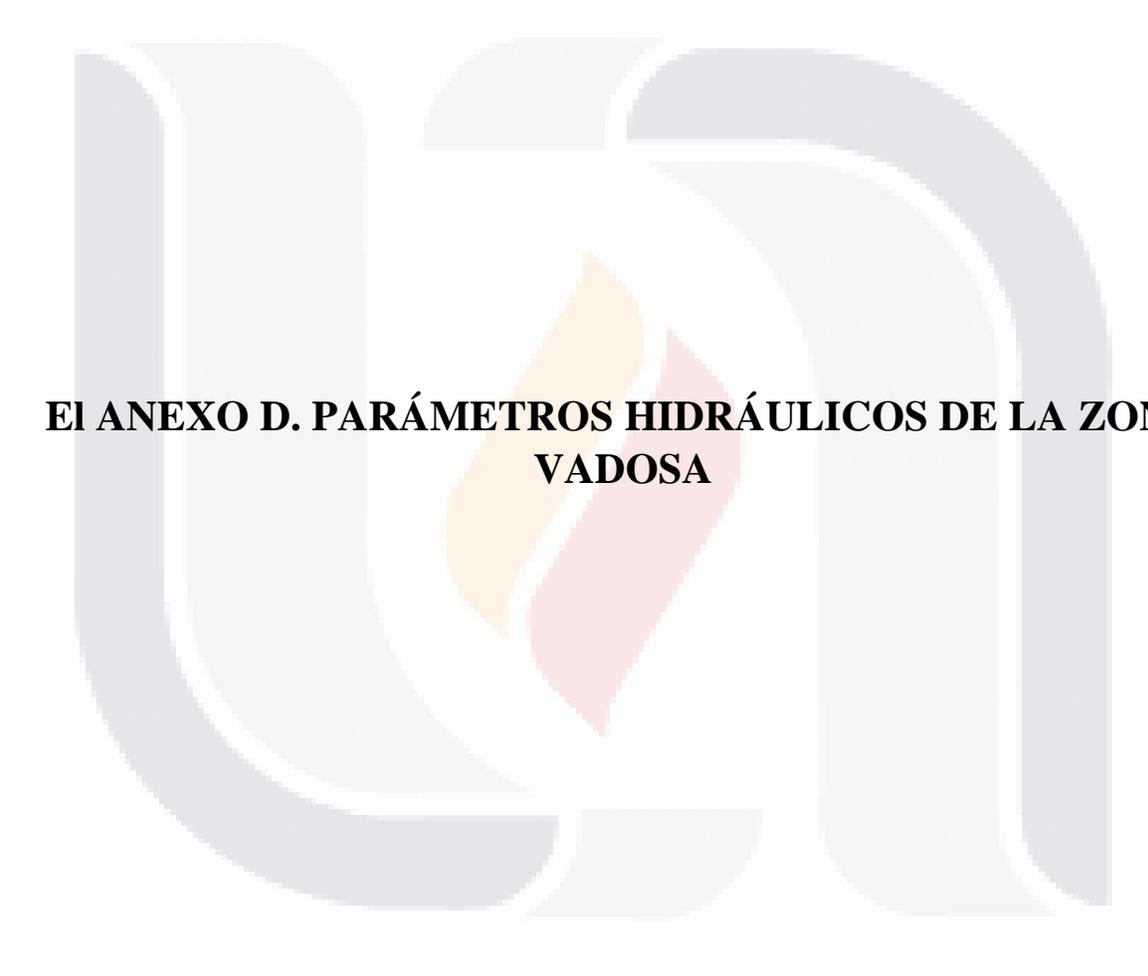
SECCIÓN 5











**EI ANEXO D. PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LA ZONA
VADOSA**

Para un suelo con propiedades				
% Grava	% Arena	% Limo	% Arcillas	% Total
0.00	86.00	14.00	0.00	100.00
Se obtuvieron los siguientes parámetros				
Clasificación ARENA ARCILLOSA				
θ_r	0.0512	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.0036
θ_s	0.3767	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.0051
α	0.0330	1/m	Error	0.0347
n	2.0008		Error	0.0109

Para un suelo con propiedades				
% Grava	% Arena	% Limo	% Arcilla	% Total
11.45	85.31	3.24	0.00	100.00
Se obtuvieron los siguientes parámetros				
Clasificación ARENA				
θ_r	0.0510	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.0035
θ_s	0.3778	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.0056
α	0.0343	1/m	Error	0.0369
n	3.6694		Error	0.0153

Para un suelo con propiedades				
% Grava	% Arena	% Limo	% Arcilla	% Total
4.00	94.20	1.00	0.80	100.00
Se obtuvieron los siguientes parámetros				
Clasificación ARENA				
θ_r	0.0513	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.0042
θ_s	0.3769	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.007
α	0.0341	1/m	Error	0.0521
n	4.0170		Error	0.0215

Para un suelo con propiedades				
% Grava	% Arena	% Limo	% Arcilla	% Total
1.28	69.65	29.06	0.00	100.00
Se obtuvieron los siguientes parámetros				
Classification LIMO ARENOSO				
θ_r	0.0266	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.0079
θ_s	0.4037	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.0174
α	0.0431	1/m	Error	0.0838
n	1.4608		Error	0.0167

Para un suelo con propiedades				
% Grava	% Arena	% Limo	% Arcilla	% Total
3.28	82.40	14.32	0.00	100.00
Se obtuvieron los siguientes parámetros				
Clasificación ARENA				
θ_r	0.0348	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.006
θ_s	0.3944	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.0133
α	0.0479	1/m	Error	0.0821
n	2.1692		Error	0.024

Para un suelo con propiedades				
% Grava	% Arena	% Limo	% Arcilla	% Total
9.13	70.10	20.72	0.00	100.00
Se obtuvieron los siguientes parámetros				
Clasificación ARENA ARCILLOSA				
θ_r	0.0278	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.0076
θ_s	0.4022	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.0186
α	0.0515	1/m	Error	0.0989
n	1.6463		Error	0.0231

Para un suelo con propiedades				
% Grava	% Arena	% Limo	% Arcilla	% Total
10.20	69.13	20.67	0.00	100.00
Se obtuvieron los siguientes parámetros				
Clasificación ARENA ARCILLOSA				
θ_r	0.0277	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.0076
θ_s	0.4024	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.0187
α	0.0515	1/m	Error	0.0991
n	1.6383		Error	0.023

Para un suelo con propiedades				
% Grava	% Arena	% Limo	% Arcilla	% Total
16.35	66.61	17.05	0.00	100.00
Se obtuvieron los siguientes parámetros				
Clasificación ARENA ARCILLOSA				
θ_r	0.0296	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.0072
θ_s	0.3998	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.017
α	0.0514	1/m	Error	0.0964
n	1.7567		Error	0.0241

Para un suelo con propiedades				
% Grava	% Arena	% Limo	% Arcilla	% Total
1.79	71.10	27.11	0.00	100.00
Se obtuvieron los siguientes parámetros				
Clasificación ARENA ARCILLOSA				
θ_r	0.0254	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.0082
θ_s	0.4070	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.0211
α	0.0485	1/m	Error	0.0976
n	1.5108		Error	0.0205

Para un suelo con propiedades				
% Grava	% Arena	% Limo	% Arcilla	% Total
5.25	76.52	18.23	0.00	100.00
Se obtuvieron los siguientes parámetros				
Clasificación ARENA ARCILLOSA				
θ_r	0.0305	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.007
θ_s	0.3987	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.0162
α	0.0511	1/m	Error	0.0943
n	1.8214		Error	0.0243

Para un suelo con propiedades				
% Grava	% Arena	% Limo	% Arcilla	% Total
0.00	72.83	27.17	0.00	100.00
Se obtuvieron los siguientes parámetros				
Clasificación ARENA ARCILLOSA				
θ_r	0.0256	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.0082
θ_s	0.4065	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Error	0.021
α	0.0490	1/m	Error	0.098
n	1.5195		Error	0.0207