

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

“Empleo del método geofísico Tomografía de Resistividad Eléctrica para la ubicación de un sitio de recarga de acuífero en Xochimilco”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTA:

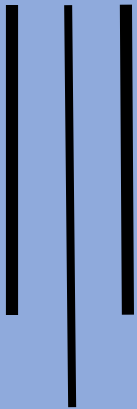
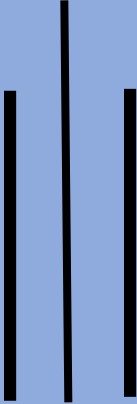
JOSÉ ANTONIO BARRERA MENDOZA

DIRECTORA:

M.I. ANA ALEJANDRINA CASTRO RODRIGUEZ

Ciudad Universitaria

Septiembre de 2015





UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN
CIENCIAS DE LA TIERRA
OFICIO/FING/DICT/532/2015

SR. JOSÉ ANTONIO BARRERA MENDOZA

Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento que la opción de titulación: **POR TESIS**, así como el tema y contenido propuestos por la **M.I. Ana A. Castro Rodríguez** en calidad de **Director de Tesis**, han sido aprobados por el comité de titulación de la carrera de **Ingeniería Geofísica** y se muestran a continuación

EMPLEO DEL MÉTODO GEOFÍSICO TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA PARA LA UBICACIÓN DE UN SITIO DE RECARGA DE ACUÍFERO EN XOCHIMILCO

I	INTRODUCCIÓN
II	MARCO TEÓRICO
III	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO
IV	METODOLOGÍA
V	RESULTADOS Y DISCUSIÓN
VI	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Por otra parte, le comunico que le ha sido asignado el siguiente jurado que tendrá como función básica, avalar su trabajo escrito y autorizar la réplica oral requerida para la obtención del título profesional, de acuerdo al Reglamento de Opciones de Titulación vigente.

PRESIDENTE:	ING. FRANCISCO A. ARROYO CARRASCO
VOCAL:	M.I. ANA A. CASTRO RODRÍGUEZ
SECRETARIO:	DR. ANDRÉS TEJERO ANDRADE
1ER. SUPLENTE:	ING. ALEJANDRO GARCÍA SERRANO
2DO. SUPLENTE:	ING. ALBERTO ARIAS PAZ

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de Administración Escolar, en el sentido que se imprima en lugar visible de cada ejemplar del trabajo escrito, el título de este.

Asimismo, le recuerdo que para optar por el título profesional, es necesario haber acreditado el 100% de los créditos establecidos en el plan de estudios, haber realizado el Servicio Social de acuerdo con la Legislación Universitaria y haber aprobado el examen de comprensión de lectura de un idioma extranjero, en términos de lo dispuesto por el Consejo Técnico.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

CD. Universitaria, D. F. a 22 de Mayo de 2015

El Presidente del Comité de Titulación de Ingeniería Geofísica

DR. JOSÉ ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIÚ

ccp Coordinador de la Carrera
ccp Interesado

ÍNDICE

Resumen / Abstract	iii
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Problemática presentada en la zona de estudio.....	2
1.3. Justificación de las técnicas empleadas.....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1 General.....	4
1.4.2 Específicos.....	4
2. Marco teórico	5
2.1. Hidrogeología.....	5
2.2. Métodos Geofísicos en Hidrogeología.....	6
2.3. Método Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).....	8
2.3.1. Antecedentes y generalidades.....	8
2.3.2. Fundamentos teóricos.....	9
2.3.3. Resistividad aparente y factor geométrico.....	12
2.3.4. Resistividad eléctrica del subsuelo.....	13
2.3.5. Conductividad eléctrica.....	14
2.3.6. Profundidad de investigación.....	15
2.3.7. Configuraciones electródicas lineales.....	16
2.3.8. Pseudo-sección de resistividad aparente.....	20
2.3.9. Equipo.....	21
3. Descripción de la zona de estudio	22
3.1. Localización geográfica.....	22
3.2. Aspecto geológico.....	24
3.3. Climatología.....	27
3.4. Hidrogeología e hidrología.....	29
4. Metodología	31
4.1. Análisis de tamaño de partículas por tamizado.....	31
4.2. Adquisición de datos de TRE.....	32
4.3. Inversión de datos 2D.....	33
4.3.1. Modelo directo (Resistividad aparente).....	36
4.3.2. Modelo inverso (Resistividad real).....	37
4.3.3. Criterios de convergencia.....	39
4.3.4. Filtros.....	40
4.3.5. Archivo URF (Universal Resistivity File).....	41

5. Resultados y discusión.....	43
5.1. Sondeo mecánico.....	43
5.2. Comparación de los arreglos electródicos empleados.....	45
5.3. Análisis de perfiles.....	46
5.3.1. Arreglo electródico Wenner–Schlumberger.....	46
5.3.2. Arreglo electródico Dipolo-Dipolo.....	49
6. Conclusiones y recomendaciones.....	54
Referencias.....	57

Resumen

En la zona de estudio, ubicada dentro de un predio denominado Deportivo de San Luis Tlaxialtemalco, en el poblado que lleva el mismo nombre, dentro de la Delegación Xochimilco, se llevó a cabo un estudio de prospección del subsuelo mediante la aplicación del método geofísico Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), el cual se correlacionó con un sondeo mecánico realizado en la zona. Este estudio abarca desde una perspectiva geofísica la caracterización del subsuelo con la finalidad de localizar un sitio en el cual la recarga artificial de agua se vea favorecida litológicamente hablando. Al final del estudio se propone la zona que de acuerdo con los resultados obtenidos es la más propicia para la recarga inducida.

Abstract

At the study area, located in a property called “Deportivo de San Luis Tlaxialtemalco”, at the town of the same name, in Xochimilco, a prospective study was carried out underground by applying the Electrical Resistivity Tomography method (ERT), said method relates to a mechanical survey in the area. This study covers from a geophysical perspective an underground characterization, with the aim of locate a site where the artificial water recharge is favored lithologically talking. At the end of the study, is proposed the area, which according with obtained results is the most propitious to induced recharge.

1.- Introducción

1.1.- Antecedentes

Los avances alcanzados por las diversas técnicas de prospección geofísica en la exploración de aguas subterráneas han brindado una gran ayuda al entendimiento de los problemas que se presentan con frecuencia en la hidrogeología.

La prospección geofísica se describe como un grupo de técnicas de adquisición que permiten inferir de forma indirecta un diagnóstico del subsuelo a través de la interpretación de una serie de datos obtenidos previamente en campo, los cuales representan la respuesta de alguna propiedad física de los materiales que conforman al subsuelo, tales como la propagación de ondas sísmicas en la corteza terrestre, la resistividad de las rocas y sedimentos que conforman el subsuelo, la densidad y la susceptibilidad magnética, entre otras.

Los métodos geofísicos aplicables a la investigación hidrogeológica son variados; sin embargo es necesario aplicar en cada caso el método más apropiado, o bien pensar en la posible combinación de más de un método, para determinar cuál es el más útil para cumplir con los objetivos planteados y obtener mejores resultados al momento de la interpretación.

Una clasificación para dicho grupo de métodos geofísicos es la que se muestra a continuación Alvarez., (1990):

- Métodos gravimétricos
- Métodos magnéticos
- Métodos sísmicos
- Métodos electromagnéticos
- Métodos eléctricos
- Métodos de registros geofísicos de pozo.

Para los fines de la presente tesis se consideró uno de estos grupos, siendo este el de los métodos eléctricos.

Los métodos eléctricos pueden clasificarse según Lakubovskii y Liajov (1980) en métodos de campo variable de baja frecuencia y no estacionarios (frecuencias entre 10^{-2} Hz y 10^4 Hz), métodos de campo variable con empleo de altas frecuencias (10^5 Hz y 1 GHz) y métodos de campo constante (frecuencia 0).

El método empleado en este trabajo es la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), el cual se encuentra dentro de los métodos de campo constante, en la categoría de métodos de corriente continua, también llamados métodos de resistividad eléctrica.

1.2.- Problemática presentada en la zona de estudio

Actualmente existe un problema que persiste en las grandes ciudades, como lo es la Ciudad de México, son las inundaciones, a pesar de contar con un complejo sistema de drenaje en ocasiones no es suficiente para desechar los grandes volúmenes de agua que circula por las calles en temporada de estiaje ocasionando severos daños al patrimonio de las personas.

Aunado a esto, el crecimiento de la mancha urbana en la ciudad es cada vez más pronunciado, lo que ocasiona que las personas busquen un lugar en donde asentarse sin importar si es o no de alto riesgo, tal es el caso de la zona de estudio que se presenta en este trabajo, ya que en este lugar el poblado está situado en las laderas de una elevación topográfica, esto provoca que en época de estiaje el agua proveniente de las zonas más elevadas fluya a través de las calles, la mayoría de las cuales están cubiertas de asfalto lo que impide que el agua pueda infiltrarse en el subsuelo, trayendo como consecuencia inundaciones en las zonas de menor elevación topográfica.

A raíz de lo mencionado en el párrafo anterior, se consideraron tres problemas principales, siendo el más importante de ellos el daño a la integridad física que estas inundaciones pueden ocasionar a los habitantes del lugar, seguido del daño que el agua produce en la infraestructura del poblado, y por último el daño ambiental provocado al acuífero del lugar dado que el poblado está situado en una zona de recarga. Debido al gran crecimiento de la población (figura 1), cada vez existen más calles cubiertas con asfalto, lo cual, como se mencionó anteriormente impide la infiltración del agua al subsuelo.



Figura 1. Representación gráfica de la problemática presentada en la zona de estudio.

1.3.- Justificación de las técnicas empleadas

En este trabajo fue necesario el empleo de algunas técnicas geocientíficas (principalmente geofísicas y geológicas), ello con el fin de llevar a cabo una correlación de cada una de ellas y de esa manera cumplir con los objetivos de forma certera.

Para cumplir con dichos objetivos propuestos en el siguiente apartado, se emplearon dos metodologías. A continuación se presenta un desglose en el cual se describe brevemente el aporte de cada una de ellas a este trabajo de investigación.

Sondeo mecánico: Se trata de una técnica de reconocimiento geotécnico directo, llevada a cabo para conocer las características del subsuelo, esto con la finalidad de tener una herramienta para correlacionar los resultados de la TRE mediante la caracterización de un barreno obtenido en la zona de estudio y obtener así una mayor certeza de los resultados.

Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE): Técnica geofísica de reconocimiento indirecto empleada con la finalidad de obtener una aproximación de las capas o estratos horizontales que pudieran encontrarse en el subsuelo, a través de la medición de un parámetro físico (Resistividad Eléctrica) a partir de diversos sondeos a través de una línea de estudio definida.

1.4.- Objetivos

1.4.1.- General

- Obtener mediante el empleo de la Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D (TRE) la ubicación de un sitio pertinente para el diseño de un pozo de absorción.

1.4.2.- Específicos

- Obtener una correlación satisfactoria entre el sondeo mecánico y los resultados obtenidos de la TRE.
- Determinar la resolución de que cada arreglo electródico empleado brinda en la zona de estudio.

2.- Marco Teórico

2.1.- Hidrogeología

La hidrogeología es la rama de la geología que se encarga de estudiar la formación y el origen de las aguas subterráneas, su movimiento, su interacción con el medio que las contiene (acuífero), su estado (líquido, sólido y gaseoso), sus propiedades, y las condiciones que rigen las medidas de aprovechamiento, regulación y evacuación del vital líquido (Mijailov, 1989).

Con el objetivo de dar solución a distintos problemas tanto de la economía nacional, el suministro de agua, la protección a la naturaleza, el riego y en conjunto el aprovechamiento racional de los recursos hídricos, la metodología hidrogeológica toma en cuenta métodos y procedimientos afines con las condiciones hidrogeológicas tales como la evaluación de los recursos, calidad, régimen y algunas particularidades del movimiento que efectúa el agua subterránea (Klimentov y Kónonov, 1982).

Dicha evaluación de los recursos hídricos (subterráneos) se lleva a cabo a través del estudio de los acuíferos.

Un **acuífero** es una formación geológica capaz de contener agua en una cantidad considerablemente apreciable y de permitir que dicha agua circule con facilidad a través de ella.

Existen cuatro tipos de acuífero, los cuales se clasifican en función de la capacidad que cada uno tenga para almacenar y transmitir agua.

- a. Acuífero: (Del latín “*aqua*”= agua y “*fero*” = llevar) se refiere a aquellas formaciones geológicas capaces de almacenar y transmitir agua sin mayores complicaciones.
- b. **Acuitardo**: (del latín “*tardare*”= retardar) se trata de formaciones geológicas semipermeables, las cuales pueden contener agua, inclusive en grandes cantidades, sin embargo, la transmiten muy lentamente y bajo condiciones especiales permiten una recarga artificial.
- c. Acuicludos: (del latín “*claudere*”= cerrar) consiste en aquellas formaciones porosas pero impermeables, que pueden almacenar agua, pero no son capaces de transmitirla.
- d. Acuífugo: (del latín “*fugere*”= huir) que son aquellas rocas con porosidad nula, por lo tanto no son capaces de transmitir ni almacenar agua.

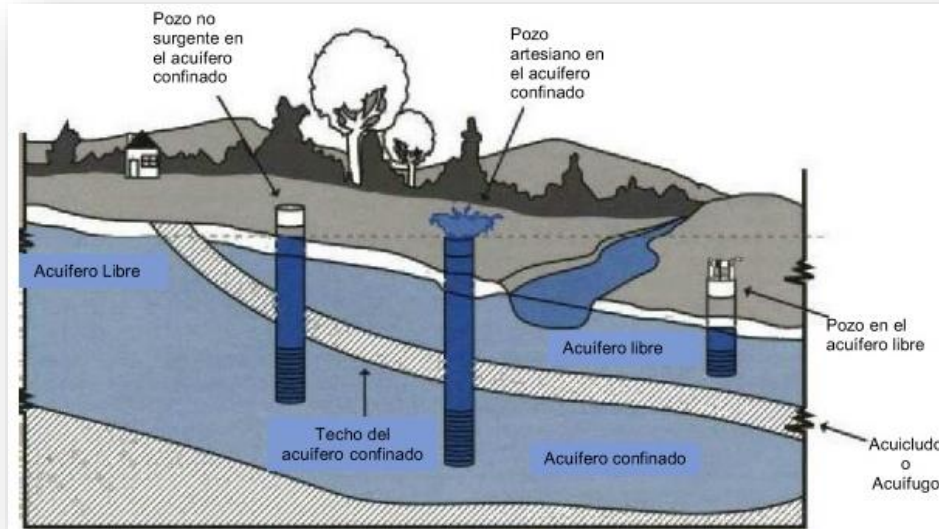


Figura 2. Clasificación de acuíferos desde el punto de vista hidráulico.

2.2.- Métodos Geofísicos en Hidrogeología

Como ya se mencionó en la parte introductoria de este trabajo, la **prospección geofísica** es una técnica encargada de estudiar la naturaleza del interior de la tierra desde el punto de vista físico.

En resumen, la **hidrogeología** es la rama de la geología que se encarga de evaluar la disponibilidad, calidad y movimiento del agua subterránea.

Una vez definidos ambos conceptos es evidente la relación que ambas ramas poseen para poder lograr en este caso el objetivo de la hidrogeología con la ayuda de la prospección geofísica. Entonces a partir de este momento se referenciará a la geofísica como una herramienta de investigación a través de la cual un objetivo en concreto de la hidrogeología puede llevarse a cabo de forma satisfactoria.

En este caso para encontrar un sitio factible para construir pozos de recarga, se parte de un modelo geofísico, el cual posteriormente se correlaciona con un modelo geológico, dando lugar con dicha correlación a un modelo hidrogeológico el cual nos permita de forma certera proponer un lugar adecuado para cumplir con los objetivos propuestos, resultando el siguiente diagrama.

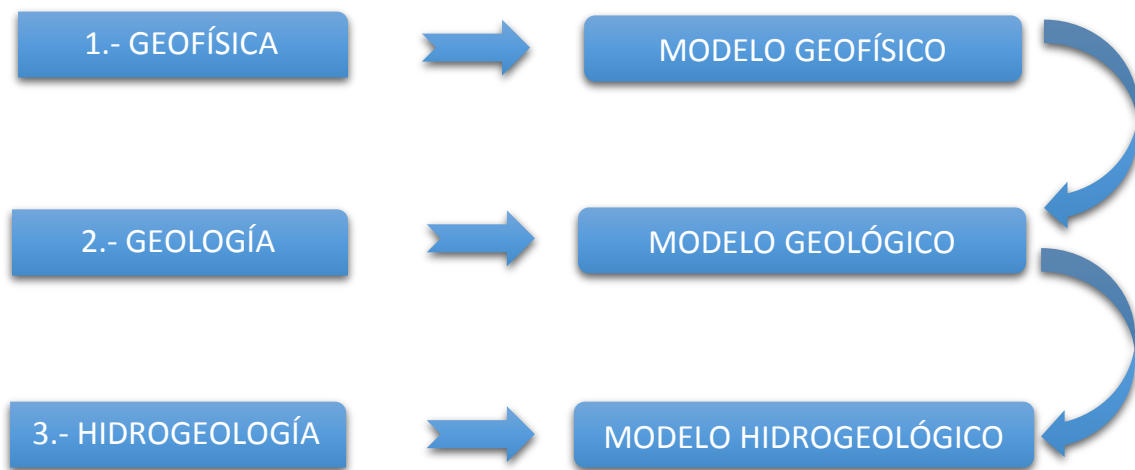


Figura 3. Correlación interdisciplinaria

La relación que existe entre el modelo geofísico y el modelo geológico surge a partir de las propiedades físicas de los componentes geológicos del subsuelo.

Las propiedades físicas de una formación rocosa granular dentro del ámbito hidrogeológico dependen principalmente de la matriz rocosa, de las propiedades del aire, así como del resto de los fluidos contenidos en ella, mismos que rellenan los poros de la roca y le brindan un grado favorable de permeabilidad a la formación (figura 4).

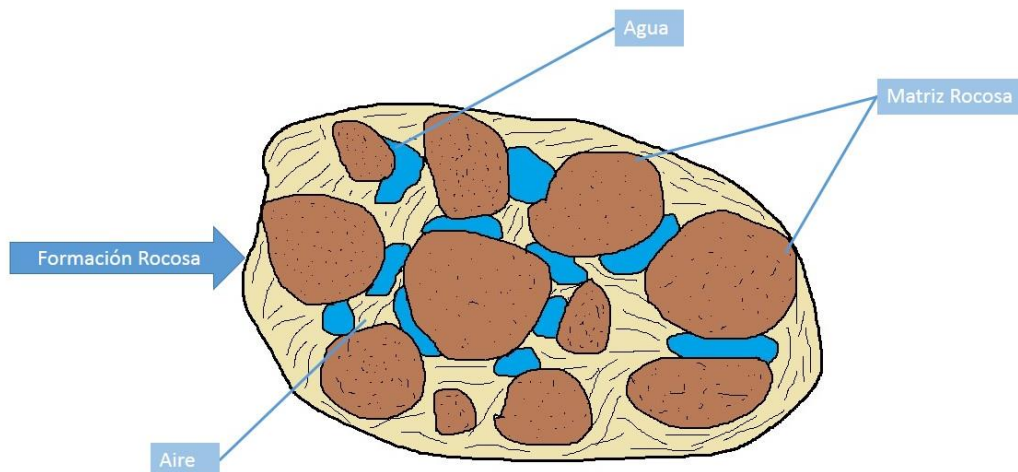


Figura 4. Constitución de un fragmento rocoso típico (Elaboración propia)

Para una formación rocosa fracturada la permeabilidad es debida al desarrollo de un sistema de fisuras. La presencia de dichas fisuras en formaciones de origen ígneo es muy común, esto es debido a la rigidez, la cual genera un comportamiento mecánico frágil que favorece el desarrollo de sistemas de fracturas en el medio cuando la formación es sometida a un campo de esfuerzos.

2.3.- Método Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

En este apartado se describen algunas generalidades del método TRE, los fundamentos físico-matemáticos que lo rigen, y la forma en la cual opera, abarcando desde la geometría, hasta el comportamiento de los electrodos en el medio.

2.3.1.- Antecedentes y generalidades

El origen de la palabra *tomografía* data del griego *tomos*, que significa corte o sección. Bajo este concepto se define entonces a la tomografía eléctrica como un conjunto de datos medidos los cuales están relacionados a integrales lineales a lo largo del tendido proyectando alguna propiedad física del subsuelo, en este caso la resistividad eléctrica dentro de un ámbito espacial limitado a partir de un gran número de medidas realizadas desde la superficie del terreno. El principal desarrollo de este relativamente reciente método geofísico se debe en gran manera al desarrollo computacional con el que se cuenta actualmente y desde luego al tratamiento matemático de los datos obtenidos. Para poder efectuar un estudio de TRE es necesario un instrumento capaz de efectuar un gran número de mediciones consecutivas de forma rápida y eficiente ya que todos los electrodos se encuentran conectados al mismo equipo de medición.

En los últimos años este método ha sido de gran importancia en los estudios de problemas relacionados con el medio ambiente, ingeniería civil, geología, minería, arqueología y como es el caso de la presente tesis, hidrogeología. Esto es debido en gran parte a las grandes ventajas que presenta, siendo algunas de estas la rapidez en el tratamiento de los datos, que se trata de una técnica no invasiva y el relativo bajo costo comparado con otros métodos.

Para la medición de la resistividad suelen emplearse distintos arreglos electródicos de los cuales se dará detalle en el apartado 2.3.6. Una vez que se ha obtenido la información del subsuelo el siguiente paso es procesar los datos obtenidos (**resistividad aparente**), mediante un programa de computo, el cual realizara una inversión de los datos, esto con la

finalidad de obtener un modelo matemático que arroje una resistividad teórica que se ajuste de la mejor manera a la resistividad observada en campo.

El resultado final obtenido por la TRE consta de una sección distancia-profundidad en la cual se presenta la distribución de la resistividad real del subsuelo para su posterior análisis geológico haciendo una comparación entre la imagen invertida y la geología del área de estudio.

2.3.2.- Fundamentos teóricos

La TRE es un método geofísico de corriente continua cuyo objetivo fundamental es investigar la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo mediante la inyección de corriente eléctrica continua mediante una fuente artificial (figura 5). El método se basa en la generación de un campo eléctrico de corriente continua, la cual circula mediante los electrodos de corriente (A y B), en los cuales se inyecta una cantidad de corriente determinada al subsuelo, posteriormente se mide la diferencia de potencial eléctrico mediante los electrodos de potencial (M y N)(figura 6).

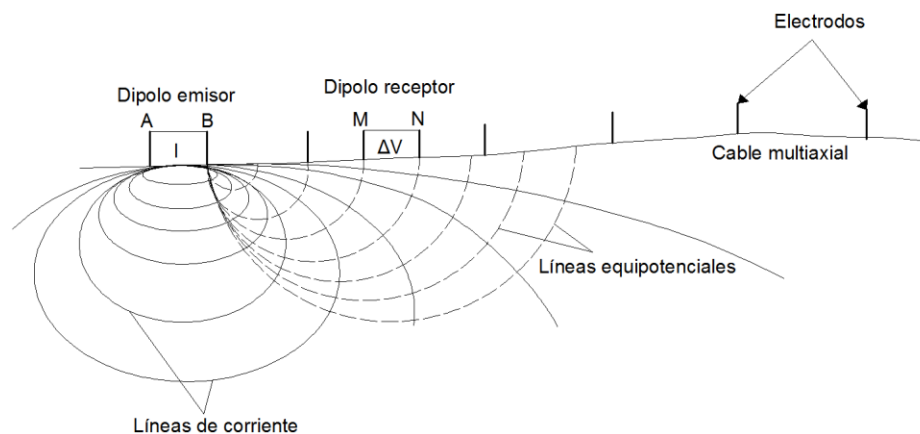


Figura 5. Modelo geoelectrico de corriente continua

Aplicando la Ley de Ohm, la cual dice que debido a la existencia de materiales que dificultan el paso de la corriente eléctrica a través de los mismos el valor de la tensión o voltaje es directamente proporcional a la intensidad de la corriente, se determina que esta diferencia de potencial se ve afectada por las resistividades de los distintos materiales del subsuelo que atraviesa el campo eléctrico.

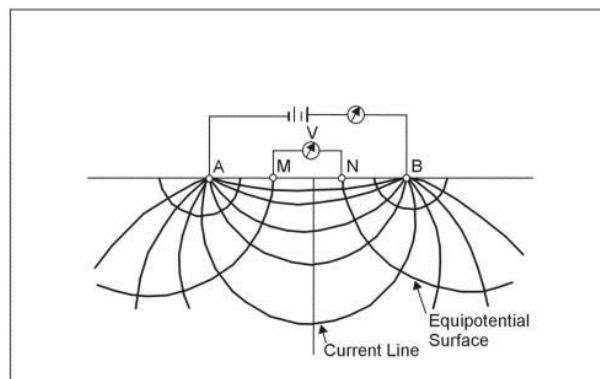


Figura 6. Representación gráfica de los electrodos de potencial y de corriente (arreglo Wenner Schlumberger)

Para hacer un análisis de las corrientes eléctricas que circulan a través del subsuelo se emplean las leyes físicas que las rigen, teniendo en cuenta que se contempla a la tierra como un semiespacio homogéneo con resistividad ρ . Como ya se mencionó anteriormente, al inyectarse una corriente eléctrica al subsuelo, esta genera un campo eléctrico y para poder llevar a cabo un análisis de este fenómeno se recurre a las ecuaciones de Maxwell.

Dichas ecuaciones son las siguientes:

$$\left. \begin{aligned} \vec{\nabla}_x \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \text{(a)} \\ \vec{\nabla}_x \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} & \text{(b)} \end{aligned} \right\} [2.1]$$

Donde:

- E: intensidad del campo eléctrico (V/m)
- B: inducción magnética (T)
- H: intensidad magnética (A/m)
- D: desplazamiento de la corriente eléctrica (C/m²)
- J: densidad de corriente eléctrica (A/m²)

Con la finalidad de relacionar entre sí las ecuaciones de Maxwell, a continuación se hace uso de las ecuaciones constitutivas de los materiales.

$$\left. \begin{aligned} \vec{J} &= \sigma \vec{E} \quad (a) \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} \quad (b) \\ \vec{D} &= \varepsilon \vec{E} \quad (c) \end{aligned} \right\} [2.2]$$

Donde:

- ε : permitividad eléctrica (F/m)
- μ : permeabilidad magnética (H/m)
- σ : conductividad eléctrica (S/m)

Posteriormente, haciendo uso de la Ley de Ohm se relaciona al vector densidad de corriente (\vec{J}) y al campo eléctrico (\vec{E}) mediante el inverso de la resistividad (ρ) que es la conductividad eléctrica del medio (σ).

Dentro de las suposiciones que se consideran en los estudios de prospección eléctrica, los valores ε y μ se estiman como constantes, esto es debido a la consideración mencionada anteriormente en la que se toma al subsuelo como un medio con pérdidas muy pequeñas dado que los valores experimentales difieren muy poco de los valores en el vacío ($\varepsilon = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m y $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m).

Asimismo, considerando que el campo eléctrico en corriente continua permanece en estado estacionario, la primera ley de Maxwell se expresa de tal forma que el campo eléctrico es rotacional y de esta manera es posible describirlo para un potencial eléctrico (ΔU). Esto se expresa mediante la ecuación [2.3] que significa que el rotacional del campo eléctrico es cero, de esta manera el campo vectorial puede ser expresado como el gradiente de un campo escalar, denominado campo potencial, representado por la ecuación [2.4].

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \quad [2.3]$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} U \quad [2.4]$$

De esta manera al inyectar una cantidad de corriente eléctrica determinada al subsuelo (considerado como un medio homogéneo) mediante los electrodos, la propagación del campo eléctrico describe una superficie semiesférica. La integral de la

densidad de corriente (\vec{J}) en dicha superficie semiesférica debe ser igual a la cantidad de corriente suministrada al medio, esto es debido a que (\vec{J}) esta direccionada de forma normal y tiene siempre el mismo valor en todos los puntos de dicha superficie (Quintana, 2013).

Entonces, si r es el radio de la semiesfera: $2\pi r^2 J = I$ [2.5]

Y se sustituye la densidad de corriente: $J = \sigma E = \frac{I}{2\pi r^2}$ [2.6]

De esta manera el campo eléctrico: $|E| = \frac{I}{\sigma 2\pi r^2} = \frac{I\rho}{2\pi r^2}$ [2.7]

Así, para cualquier electrodo el valor del campo eléctrico es inversamente proporcional al radio de la semiesfera (r).

Para hacer el cálculo de la diferencia de potencial entre dos puntos, conocidos como (M y N) respectivamente, se hace uso de la ecuación [2.4] de la siguiente manera:

$$\Delta U_N^M = - \int_N^M E dl \quad [2.8]$$

El siguiente paso para obtener la expresión que será útil para realizar el cálculo del potencial entre M y N, consiste en considerar a r_1 y r_2 como distancias respectivas de los puntos M y N, resultando la siguiente fórmula:

$$\Delta U_N^M = \frac{I\rho}{2\pi} \int_1^2 \frac{dr}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad [2.9]$$

Con la cual se calcula la diferencia de potencial (voltaje) que existe entre los electrodos receptores (M y N) una vez que fue inyectada la corriente eléctrica al subsuelo.

2.3.3 Resistividad aparente y factor geométrico

Mediante la ecuación [2.26] empleada para el cálculo de la diferencia del potencial eléctrico en el apartado anterior, se aborda el caso del **problema directo** que consiste en obtener una expresión que permita representar la distribución de las resistividades aparentes del subsuelo. En el caso general de un dispositivo con una configuración lineal que consiste de

dos electrodos de potencial (M y N) y dos electrodos de corriente (A y B), de esta manera la ecuación [2.9] puede expresarse como se muestra a continuación:

$$\Delta U_N^M = \Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad [2.10]$$

Surge entonces a partir de esta ecuación el término **factor geométrico (K)**, el cual depende de la distancia entre los electrodos y está definido por la siguiente expresión:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad [2.11]$$

Así la ecuación [2.28] representa el valor de la resistividad de un medio homogéneo y una configuración de cuatro electrodos, sin embargo no existe en la realidad un subsuelo homogéneo, entonces las resistividades obtenidas por la ecuación son resistividades aparentes que dependen directamente de la configuración geométrica de los electrodos y de la naturaleza de los materiales en los cuales el campo eléctrico generado tiene influencia. De esta manera se presenta la solución al problema directo; es decir, la obtención de la ecuación [2.28] que permite generar un modelo del comportamiento de la resistividad aparente siendo este uno de los primeros pasos para obtener el modelo de resistividad real.

2.3.4. Resistividad eléctrica del subsuelo

La ecuación [2.28] permite realizar el cálculo de la resistividad aparente, y es la ecuación de la que se parte al momento de calcular la **resistividad real**. El cálculo de dicha resistividad cuando se presenta una heterogeneidad es muy simple, sin embargo, entre mayor sea el número de heterogeneidades, la resolución para este problema requiere de un cálculo numérico más complejo. Una forma de dar solución a este problema es mediante la generación de una malla que represente al subsuelo con la finalidad de obtener una solución numérica más adecuada que la propuesta por el modelo unidimensional (*Pekeris, 1904*).

La determinación de la resistividad real consiste en obtener un modelo que proporcione la distribución de la resistividad real en el subsuelo mediante la resistividad aparente teórica, obtenida a partir de cierto dispositivo electródico y la resistividad aparente experimental, medida con el mismo dispositivo.

2.3.5. Conductividad eléctrica

Junto con la resistividad eléctrica (ρ), la conductividad eléctrica (su opuesta), se tienen dos de los más importantes parámetros físico-químicos que actualmente se pueden emplear en el área de la caracterización del subsuelo con fines hidrogeológicos. Se conoce como conductividad al factor que relaciona la corriente eléctrica que fluye a través de un medio con la intensidad del campo eléctrico aplicado, sus unidades son Siemens por metro [S/m], y describe la facilidad o la dificultad de las cargas eléctricas de moverse libremente a través de un medio.

Partiendo de la Ley de Ohm, donde J es la densidad de corriente y E el correspondiente campo eléctrico aplicado, siendo ambas cantidades de origen vectorial, la conductividad σ , puede no ser homogénea y si anisotrópica, su valor puede variar con las diferencias de temperatura, presión y distintos parámetros relacionados con el medio, por ejemplo, según Reynolds (1997), en rocas con porosidad alta, la resistividad es a menudo asociada con la porosidad mediante la ley de Archie.

Asumiendo la ausencia de metales en el medio, **la conductividad de formación** está directamente relacionada con la conductividad del agua presente en el medio, y la cantidad presente de este líquido (volumen) en el material que conforma al subsuelo. A diferencia de los metales, en el agua subterránea la conducción de una corriente eléctrica será a través de los iones, y dependerá entonces de los **Sólidos Totales Disueltos**, es aquí donde se define la Ley de Archie, en la cual se menciona que en un medio poroso, libre de arcilla y cuya matriz no sea conductora se cumplen las siguientes expresiones:

$$\sigma_f^v = \emptyset \sigma_w^v \quad \text{ó} \quad \sigma_f = \emptyset^{\frac{1}{v}} \sigma_w \quad [2.12]$$

En donde σ_w es la conductividad del agua, \emptyset la porosidad y σ_f la conductividad total de la formación y la constante v , cuyo valor usual es 0.5. De esta manera si la conductividad de la formación, así como la del agua subterránea, pueden ser obtenidas a través de métodos geofísicos, entonces es posible hacer una estimación de la porosidad.

2.3.6. Profundidad de investigación y función de sensibilidad

En los estudios de resistividad, un concepto de suma importancia es el de **profundidad de investigación**, mismo que fue introducido por Marcel Schlumberger y Conrad en 1932. La profundidad a la cual un método de resistividad permite llegar, depende de la disposición de los electrodos de potencial y de corriente, cabe mencionar que dicha profundidad no guarda una relación directa con la profundidad de la penetración de la corriente, la cual está determinada por la distancia entre los electrodos de corriente Barker, (1989).

Para tener una cantidad (aproximada) que caracterice de alguna manera a la profundidad de investigación, se emplea la función de sensibilidad, con la cual es posible determinar mediante las derivadas de Fréchet el comportamiento del potencial medido por el arreglo basado en los cambios de resistividad en una sección del subsuelo, de esta manera, si se obtienen valores altos de la función de sensibilidad será mayor la influencia de la región del subsuelo en la medición Loke, (2010).

Al momento de emplear la función de sensibilidad se asume que el suelo está compuesto por capas horizontales cuyos límites se extienden al infinito en los ejes x y y resultando la siguiente expresión.

$$F_{1D} = \frac{2}{\pi} \frac{z}{(a^2 + 4z^2)^{1.5}} \quad [2.13]$$

Dicha ecuación es conocida como profundidad de investigación y se estima su valor máximo en $0.35a$, siendo a el espaciamiento entre el electrodo de corriente y el electrodo de potencial, y el valor mínimo tiende a cero de manera asintótica, esta es una forma de aproximar la profundidad de investigación; sin embargo, Edwards (1977) y Barker (1991) consideran otra estimación en la cual se denomina “profundidad mediana de investigación” y consideran que la tierra por encima de esta profundidad ejerce la misma influencia en el comportamiento del potencial medido que la zona que se encuentra por debajo, cabe mencionar que dicha profundidad no guarda una relación de dependencia con la resistividad aparente dado que se considera un medio homogéneo.

2.3.7. Configuraciones electrónicas lineales

La disposición geométrica de los electrodos de corriente y de potencial en el terreno al momento de realizar un estudio de prospección geoelectrica se define como **arreglo electrónico**. A continuación se en listan los arreglos fundamentales:

- Wenner
- Schlumberger
- Wenner- Schlumberger
- Dipolo- Dipolo
- Polo- Dipolo

Dichos arreglos difieren entre sí por la distancia entre los electrodos en cada uno de ellos, así como la posición de los electrodos de corriente con respecto a los electrodos de potencial. A continuación se presenta una descripción breve de cada una de las configuraciones electrónicas mencionadas.

- Configuración Wenner

En el arreglo Wenner los electrodos A y B (de corriente) mantienen una distancia “a” de los electrodos M y N (de potencial). La virtud de este arreglo consiste en que el espacio entre los electrodos de potencial y de corriente se incrementa constantemente en la misma proporción reduciendo así la necesidad de sensibilidad del aparato de medición, por otra parte reduce considerablemente el ruido eléctrico inducido de forma natural por los factores ambientales del terreno. En la figura 9 es posible apreciar un esquema de esta configuración.

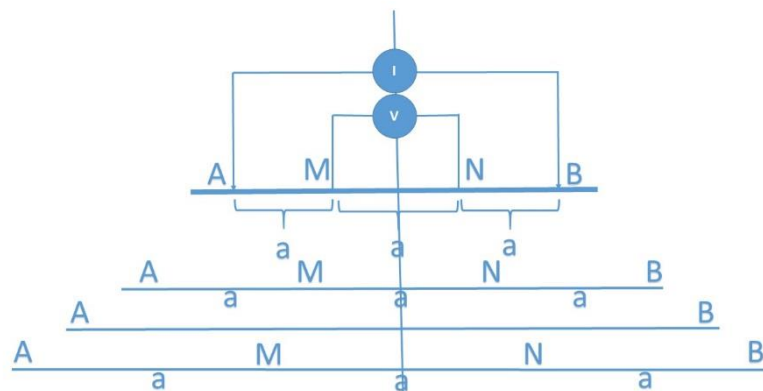


Figura 7. Arreglo Wenner

El valor de la resistividad aparente queda definido por la siguiente expresión:

$$\rho = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad [2.14]$$

- Configuración Schlumberger

En este arreglo la distancia entre los electrodos de potencial M y N se mantiene constante, siendo la distancia entre los electrodos de corriente la que varía, de esta manera en el nivel n=1 la distancia entre los electrodos de corriente es “a”, en el nivel n=2 dicha distancia es “2a”, siguiendo esta secuencia para “n” numero de niveles. De forma gráfica.

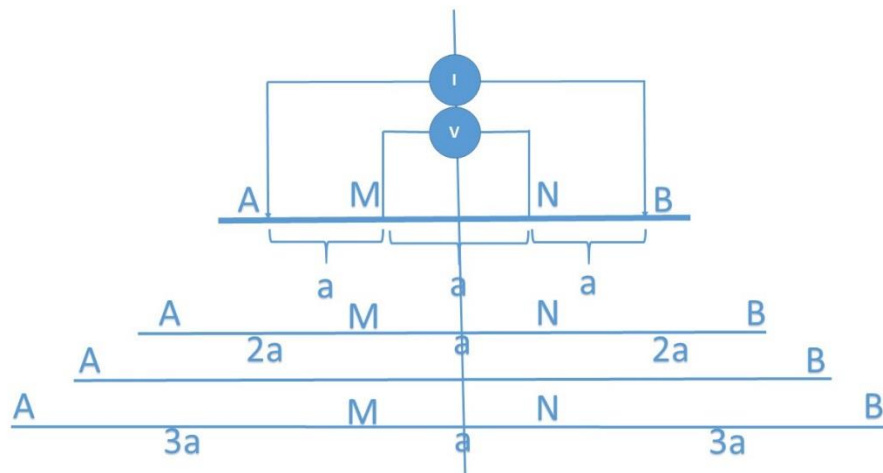


Figura 8. Arreglo Schlumberger

- Configuración Wenner-Schlumberger

En este arreglo existe un movimiento lateral que se le aplica al arreglo convencional Schlumberger, de esta manera se observa que en el primer nivel el comportamiento es idéntico al de un arreglo Wenner, mientras el electrodo de corriente A permanece constante en el espacio y los electrodos de potencial constantes en separación, así las distancias AM y NB varían de acuerdo al nivel “n”.

El Cálculo de la resistividad aparente queda expresado de la siguiente manera:

$$\rho_a = \pi n(n + 1)a \frac{\Delta V}{I} \quad [2.15]$$

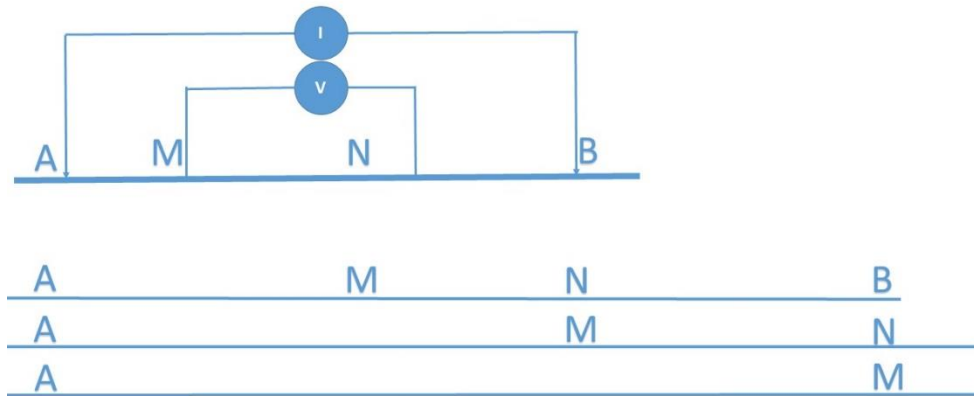


Figura 9. Arreglo Wenner-Schlumberger

- Configuración Dipolo – Dipolo

En este arreglo eléctrico los electrodos de potencial M y N y los electrodos de corriente A y B conservan entre sí una distancia constante, la distancia entre los polos formados por cada par de electrodos varía. La distancia empleada para los perfiles de resistividad es BM. Es un arreglo que produce una gran cantidad de mediciones. Los electrodos son alineados de tal manera que forman dipolos.

El cálculo de la resistividad aparente se representa mediante la siguiente expresión:

$$\rho_a = \pi n(n + 1)(n + 2)a \frac{\Delta V}{I} \quad [2.16]$$

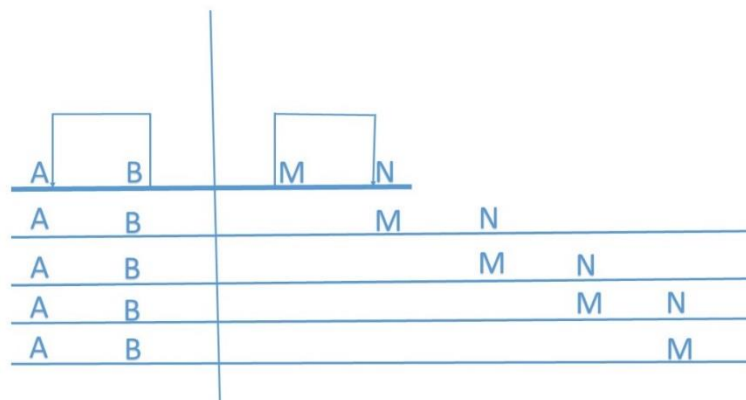


Figura 10. Arreglo Dipolo- Dipolo

- Configuración Polo - Dipolo

Este arreglo consiste en la colocación de solo un electrodo de corriente y dos electrodos de potencial formando dipolos a muchas separaciones de la distancia bipolar. La corriente es inyectada a través del electrodo de corriente cerrando el circuito con otro electrodo que se coloca a una distancia muy grande, la suficiente para que surja el efecto de que se encuentra en el infinito, de esta manera no influye sobre los dipolos de medición, en los cuales la señal eléctrica es recibida y se efectúa la medición de la respuesta del terreno. La profundidad de investigación guarda una relación directa con la separación de los electrodos.

La siguiente expresión representa el cálculo de la resistividad aparente.

$$\rho_a = 2\pi n(n + 1)a \frac{\Delta V}{I} \quad [2.17]$$

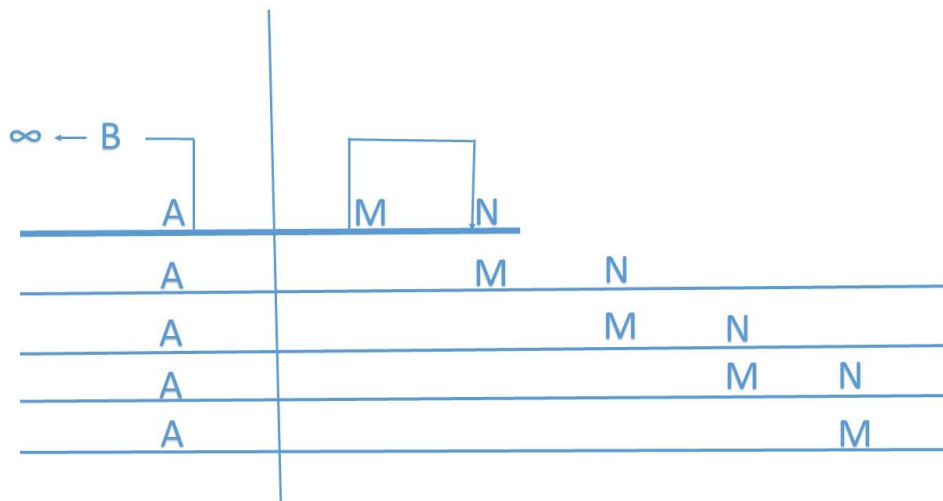


Figura 11. Arreglo Polo - Dipolo

Cabe mencionar que durante el desarrollo del trabajo en campo se emplearon dos de estas configuraciones, siendo estas la configuración Wenner - Schlumberger y la configuración Dipolo - Dipolo, más adelante se detalla él porque de esta elección.

2.3.8. Pseudo-sección de resistividad aparente

Una vez que los datos han sido obtenidos mediante el empleo de alguna configuración electródica, lo que se obtiene son las variaciones laterales y verticales de la resistividad, una manera eficiente de representar dichas variaciones, es mediante una pseudo-sección. De forma general las pseudo-secciones suelen construirse como se muestra en la figura 14.

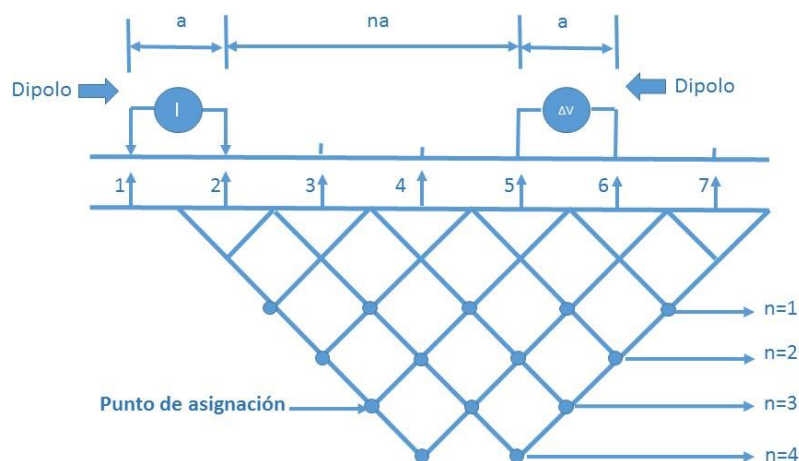


Figura 12. Representación gráfica de la construcción de una pseudo-sección geoelectrica para una configuración Dipolo-Dipolo. Modificada de Julián Cuesta

Aunque resulta de gran utilidad, se debe hacer énfasis en que la construcción de la pseudo-sección geoelectrica es un método gráfico, es por ello que no necesariamente implica que la profundidad de investigación de la parte teórica sea exactamente la misma que la obtenida prácticamente; sin embargo, es de gran ayuda al momento de realizar la estimación de la misma. Existe otro método alternativo, en el cual, se considera la profundidad mediana de investigación propuesta por Edwards, (1997), este método basa sus principios en la función de sensibilidad de Frechet, y es el método empleado en gran parte de los programas de inversión que existen actualmente.

Las pseudo-secciones brindan una idea muy general de la distribución de las resistividades en el subsuelo, sin embargo, nunca se debe considerar una pseudo-sección como la imagen real del subsuelo, esto es debido a que la imagen esta distorsionada debido a los distintos tipos de ruido que pueden afectar la medición, tales como el ruido ambiental, ruido por el equipo, etc.

2.3.9. Equipo

Para llevar a cabo el estudio de TRE se empleó un resistímetro versátil de la marca “IRIS INSTRUMENTS”, el modelo empleado fue el “SYSCAL Pro” de 48 canales, el cual combina un transmisor, un receptor y una unidad de continuidad en un solo equipo. Funciona gracias a la alimentación de una batería de 12 V. La manera en la cual son realizadas las mediciones es automatizada, aunque es necesario que el operador haga una selección del límite de valores deseados, dicha selección se almacena en la memoria interna del dispositivo.

El “SYSCAL Pro” (Figura 15) utiliza cables “inteligentes” para controlar un conjunto de electrodos conectados en línea recta a lo largo de la superficie de medición. El número de electrodos (24 y/o 48) puede ser incrementado de acuerdo con las especificaciones del tendido, especificadas por el operador.

Los diez canales mencionados anteriormente, permiten al dispositivo llevar a cabo hasta diez lecturas consecutivas, esto con la finalidad de incrementar la eficiencia en el trabajo de campo.

En este caso se emplearon 48 electrodos de aproximadamente 50 cm de altura y 1 pulgada de espesor con una separación electródica de 4 m.



Figura 13. Resistímetro empleado. Syscal

3.- Descripción de la zona de estudio

3.1 Localización geográfica

El poblado en donde se llevó a cabo el estudio de prospección geoelectrica se llama San Luís Tlaxialtemalco, está ubicado al sureste de la delegación Xochimilco, en el Distrito Federal.

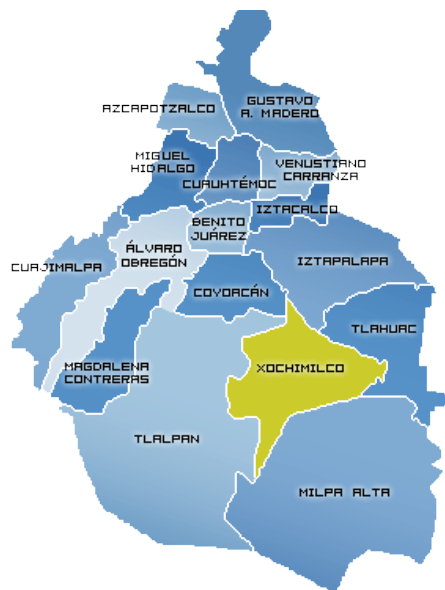


Figura 14. Xochimilco en el Distrito Federal. Tomada de http://empresas-de-seguridad.mx/Imagenes/MX/map_MexicoCiudad_Xochimilco.gif

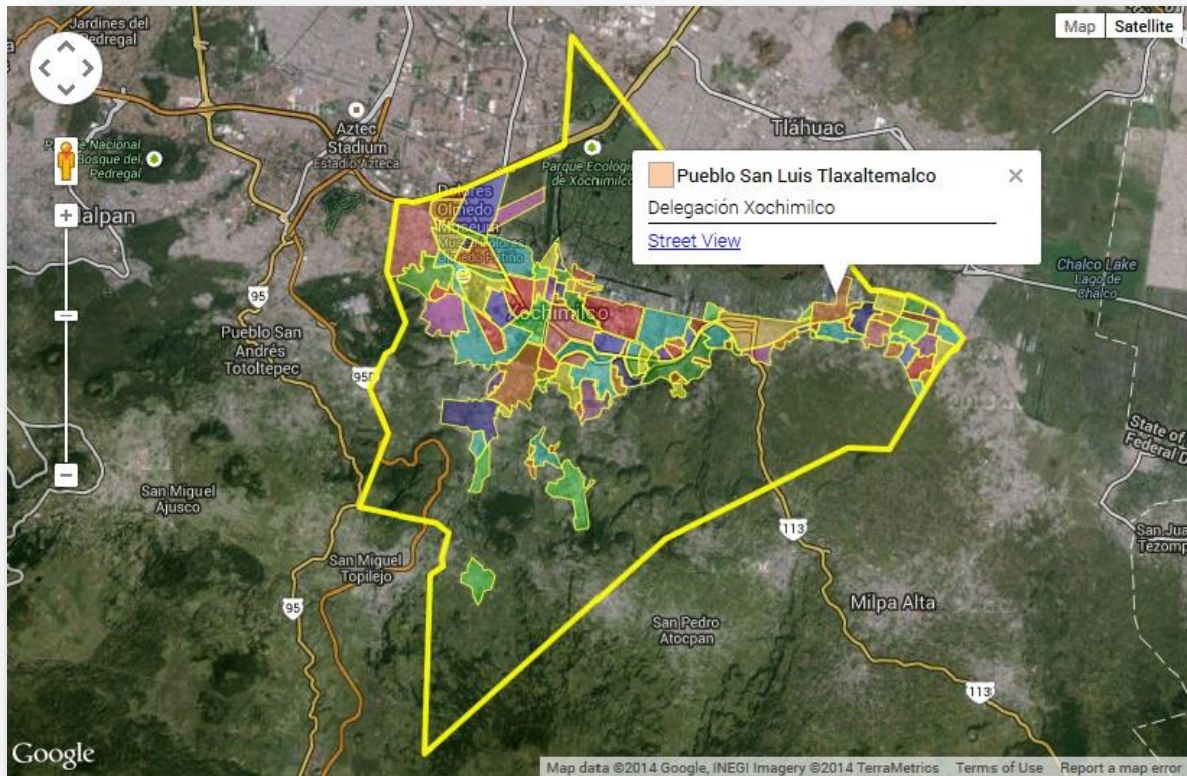


Figura 15. San Luis Tlaxialtemalco en Xochimilco. Modificada de <http://eldefe.com/mapa-colonias-delegacion-xochimilco/>

El estudio se llevó a cabo en un par de canchas de fútbol soccer localizadas en la esquina que forman las calles Acueducto y Calvario en el poblado de San Luis Tlaxialtemalco.

Las coordenadas UTM son las siguientes: Zona 14 Q, coordenada Este: 496300.33 mE, coordenada Norte: 2129229.26 mN y una altura aproximada de 2220 m sobre el nivel medio del mar.

A continuación se muestra la Figura 18, en la cual es posible apreciar con mayor detalle la zona de estudio del presente trabajo.



Figura 16. Localización de la zona de estudio en el poblado de San Luis Tlaxialtemalco. Modificada de <http://eldefe.com/mapa-colonias-delegacion-xochimilco/>

3.2. Aspecto geológico

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México está conformada totalmente por rocas de la era Cenozoica, caracterizada por la predominación de rocas volcánicas extrusivas, mismas que dieron origen a las sierras que conforman el Eje Volcánico Transversal.

El poblado en el cual se localiza la zona de estudio (San Luis Tlaxialtemalco) pertenece al Área Natural Protegida “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”, dicha área cuenta con una superficie de 2522 hectáreas aproximadamente, de las cuales la mayor parte corresponden a la zona de chinampas de Xochimilco y a los poblados de San Gregorio Atlapulco y San Luis Tlaxialtemalco Secretaría del Medio Ambiente, (2006 - 2012).

El territorio de la delegación Xochimilco está ubicado fisiográficamente dentro de la subprovincia número 57 de los lagos y volcanes Anáhuac, y a su vez pertenece a la provincia geológica del Eje Neo - volcánico, en el extremo sur de la Cuenca de México.

El origen de esta zona se remonta al periodo Plio-Cuaternario; durante su formación, el extremo sur del Valle de México fue modificado debido a la formación de la sierra del Chichinautzin, evento que dio origen a la cuenca endorreica de México.

Posteriormente aconteció principalmente el depósito de materiales de origen volcánico, y principalmente en la zona lacustre, materiales de origen aluvial y orgánico. Solo dos periodos de la era Cenozoica se encuentran presentes en el área de estudio, siendo estos el Terciario y el Cuaternario.

Geomorfológicamente la zona de estudio se encuentra en la parte sur del Área Natural Protegida, clasificada como pie de monte o zona de transición entre la zona montañosa y la zona lacustre, misma que se divide de sur a norte en llanura aluvial, llanura lacustre – salina y llanura lacustre.

Topográficamente la zona se ubica al pie del área montañosa conformada por los cerros Xochitepec y Cantil y los volcanes Teoca, Tzompole y Teutli.

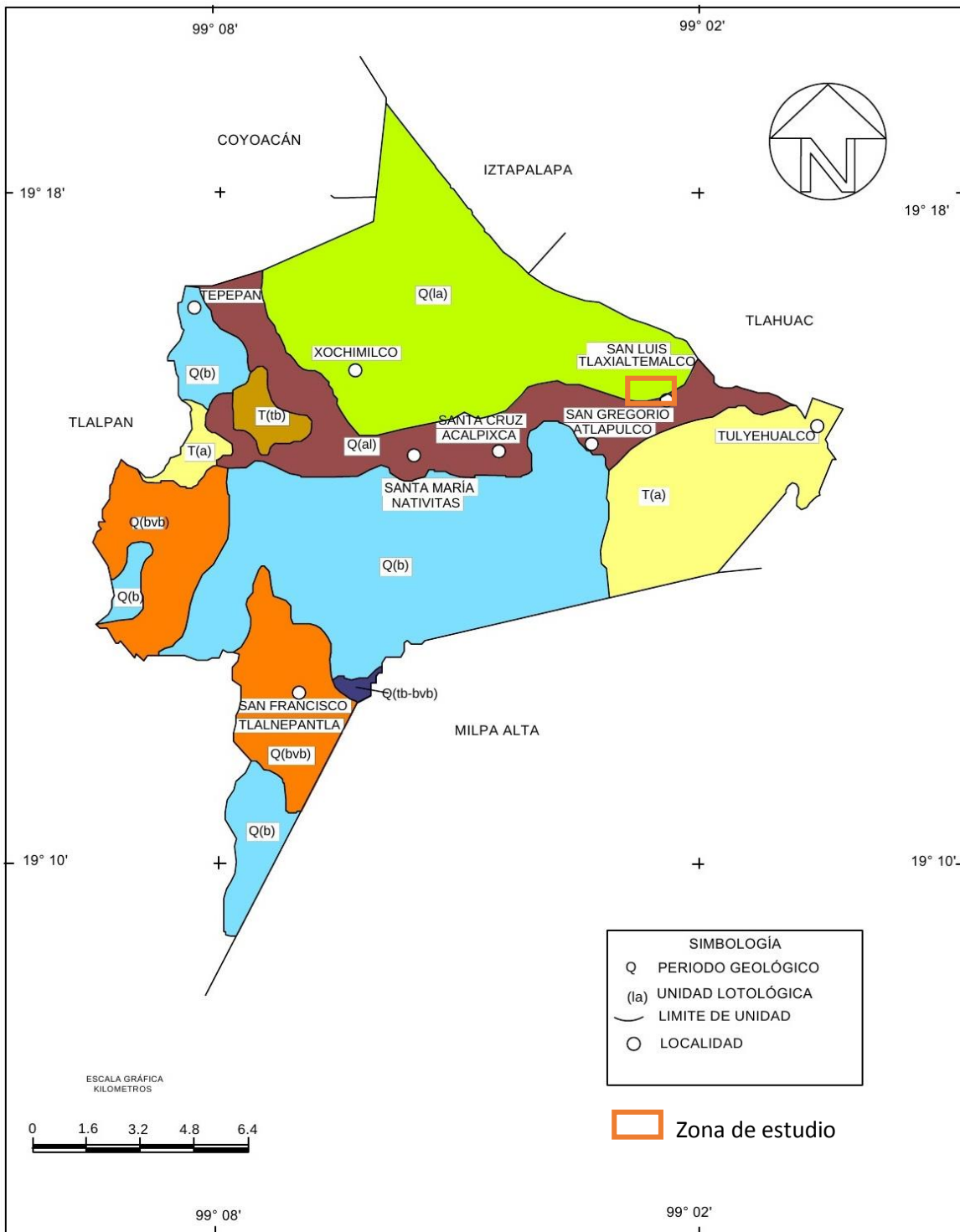
Las rocas ígneas extrusivas presentes en el área de estudio afloraron durante los periodos mencionados anteriormente y están compuestas por lava que salió del volcán, posteriormente fue enfriada y solidificada sobre la superficie terrestre, y finalmente cubierta por la actual capa de suelo.

A continuación se muestra la tabla uno y un mapa en los cuales se presenta la distribución de la geología en la delegación Xochimilco.

Tabla 1. Simbología del mapa de la geología

Geología							
Clave	Era Nombre	Periodo		Roca o suelo Nombre	Unidad litológica		% de la superficie delegacional
		Clave	Nombre		Clave	Nombre	
C	Cenozoico	Q	Cuaternario	Suelo	(al)	Aluvial	12.85
					(la)	Lacustre	30.75
				Ígnea extrusiva	(b)	Basalto	29.04
					(bvb)	Brecha volcánica Básica	13.37
		Ts	Terciario Superior	Ígnea extrusiva	(a)	Andesita	12.84
(tb)	Toba básica	1.15					

Fuente: INEGI. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Geológica, 1:250 000, serie I.



Modificado de : CGSNEGI. Carta geológica 1:250000. Año 2007. Cuaderno Estadístico Delegacional de Xoch.

Figura 17. Geología de la Delegación Xochimilco

3.3.- Climatología

El tipo de clima que caracteriza a la delegación Xochimilco es el templado – húmedo cuya simbología climática se representa de forma general por las siglas C (W), wb (e) g. La época de estiaje se presenta en verano en los meses de mayo a octubre principalmente con una cantidad aproximada de 700 mm anuales de precipitación y una temperatura media anual de 16.2 °C.

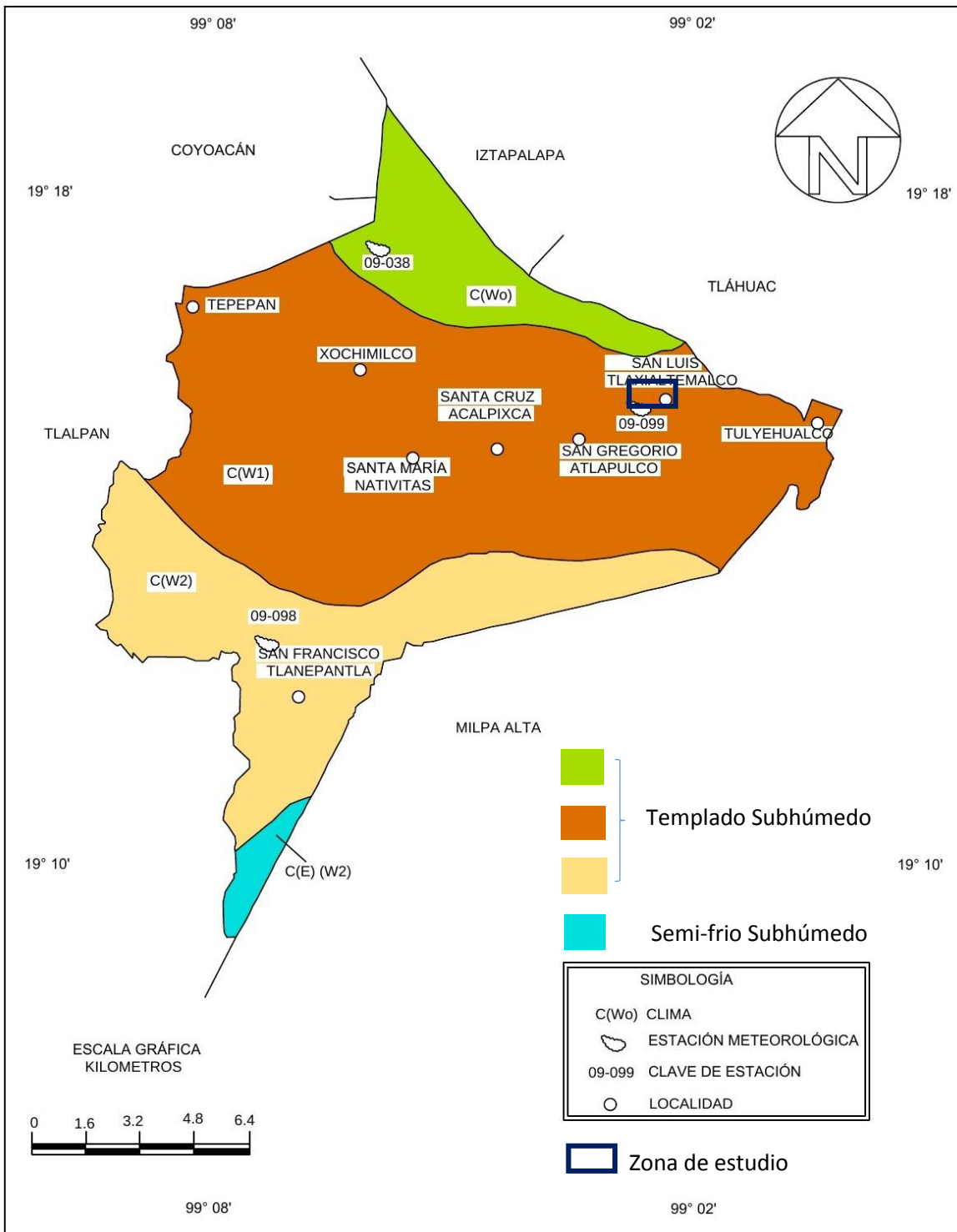
Existen dentro del territorio delegacional tres estaciones meteorológicas distribuidas en los siguientes poblados: en San Francisco Tlalnepantla la estación meteorológica número 09-098, en San Gregorio Atlapulco la estación 09-099 y por último en el límite norte de la Delegación, en Muyuguarda, se encuentra la estación número 09-038.

De acuerdo con información obtenida de la base de datos del INEGI la variación del clima dentro de la delegación Xochimilco está distribuida como lo muestra a continuación el siguiente mapa y sus tablas adjuntas.

Tabla2. Climatología del área de estudio

Climatología		
Tipo o subtipo	Símbolo	% de la superficie delegacional
Templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad	C(w ₂)	20.52
Templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media	C(w ₁)	68.31
Templado subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad	C(w ₀)	8.54
Semifrío subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad	C(E)(w ₂)	2.63

Fuente: **INEGI**. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta de Climas, 1:1 000 000, serie I.



MODIFICADO DE: INEGI CARTA DE CLIMAS 1:1000000, AÑO 2007. Cuaderno Estadístico Delegacional de Xochimilco

Figura 18. Climatología de la Delegación Xochimilco

3.4.- Hidrogeología e hidrología

El acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) pertenece a la región hidrológica No. 26 Alto Pánuco, el área aproximada es de 84956 m², y posee un gasto medio anual aproximado de 527.4 m³/s.

Al mismo tiempo el acuífero ZMCM se encuentra dividido en cuatro regiones o zonas hidrológicas siendo éstas las siguientes:

- I. Xochimilco
- II. Churubusco
- III. Ciudad de México
- IV. Texcoco (de manera parcial)

Dentro de las trece regiones hidrológicas en las que se ha dividido el país la ZMCM se encuentra en la región número XIII CONAGUA, (2009).

Existe una capa arcillosa entre el acuífero y la superficie de la ciudad, la cual conforma un acuitardo con un espesor de aproximadamente 50 m. Las máximas profundidades a las cuales llega el acuífero son de 800 m y en él se encuentran pozos de extracción con profundidades entre los 100 y los 400 m CONAGUA,(2009).

En los alrededores de la zona de estudio aún existen algunos ríos, mismos que han sido desviados de su cauce natural con la finalidad de recibir las descargas de las aguas industriales y principalmente domésticas de los poblados que se encuentran asentados en la zona alta, contaminando su cauce y las aguas de los lugares a donde llegan. Entre las corrientes que reciben este tipo de agua en las cercanías de la zona de estudio son los ríos San Lucas y Santiago.

Al acuífero de la Ciudad de México se le extrae agua para diversos usos. Al inicio de su explotación los niveles freáticos se encontraban más someros; esta característica fue desapareciendo conforme la explotación del acuífero se fue incrementando. Ahora los niveles freáticos se han abatido, lo que ha ocasionado una compresión del material geológico que hace que el agua circule a una menor velocidad, produciendo un drenado vertical de las arcillas hacia el acuífero Martínez,(2007).

El mayor caudal obtenido de acuerdo con la Dirección de Construcción y Operación Hidráulica en Xochimilco es de 86 Mm³/año a través de los 64 pozos que actualmente se encuentran en operación.

La zona de estudio pertenece al área de recarga del acuífero en su porción sureste. Desafortunadamente, esta área de recarga en los últimos años ha tenido un incremento de la mancha urbana, que ha conducido a que disminuya en gran proporción la recarga al acuífero.

Por otro lado, las partes bajas de esta zona de recarga, sufren inundaciones debido a que el agua ya no entra en contacto con el suelo sino con pavimento que hace difícil su infiltración. Es por ello que surge la necesidad de colocar pozos de absorción que coadyuven de manera artificial a la recarga natural que debería presentarse en el área, así como también, al problema de inundación que se tiene en temporada de estiaje.

4.- Metodología

A continuación se presenta una descripción de la metodología empleada para llevar a cabo las actividades del presente trabajo de tesis. Se presentan los estudios realizados de manera cronológica, así como la aportación que se espera de cada uno de ellos al estudio.

4.1.- Sondeo mecánico

Con la finalidad de tener una evidencia física directa, que permitiera conocer de qué manera está conformado el subsuelo en el área de estudio y posteriormente hacer una comparación con las secciones geoelectricas obtenidas mediante la TRE, se efectuó un sondeo mecánico, el cual profundizó 30 m aproximadamente.

El barreno se obtuvo a una distancia de aproximadamente 10 metros de la línea donde realizó la TRE, no se obtuvo del mismo lugar de la línea de TRE debido a que esta se encuentra localizada en un campo de fútbol soccer en donde no se cuenta con permiso para realizar perforaciones. La profundidad máxima registrada por la empresa a cargo de realizar la perforación (MULTIGEO) fue de 30.10 m.

La clasificación de campo obtenida al momento de realizar la perforación, con un total de 24 muestras, es la descrita en la tabla número 3.

Tabla3. Clasificación de campo

<i>Profundidad (m)</i>	<i>Material</i>
0 – 0.40	Mezcla asfáltica
0.4 – 1	Gravas
1 - 3.40	Arena limosa café
3.40 – 4	Arena limosa con grava
4 – 4.60	Arena limosa café compactada
4.60 – 5.20	Arena limosa con grava
5.20 – 5.80	Basalto con arena media
5.80 – 6.40	Gravas con arena media
6.40 – 8.20	Basalto con arena y limo
8.20 – 8.95	Basalto con arena media
8.95 – 30.10	Basalto

4.2.- Adquisición de datos de TRE

Una vez efectuado el sondeo mecánico se procedió a realizar el estudio de TRE; para ello fue necesario ubicar un lugar adecuado, el cual fuese representativo del total de la zona de estudio, esto con la finalidad de obtener una buena caracterización del subsuelo donde se pretende instalar el pozo de recarga artificial. En la figura 21 se muestra la línea que se eligió para el estudio. Dicha línea fue elegida por ser la de mayor longitud dentro del área de interés.



Figura 19. Línea de TRE

El levantamiento fue realizado en dos campos de fútbol soccer que forman parte del deportivo de San Luis Tlaxiátemalco en el mes de Junio del año 2014. El trabajo de campo para llevar a cabo la TRE tuvo una duración de dos días, en el primero se realizó una visita al lugar con la finalidad de encontrar la zona más pertinente para el estudio y también hacer revisiones a cerca de los permisos necesarios para la colocación de los electrodos. El segundo día se llevó a cabo la TRE, ya con la línea ubicada se procedió a colocar el equipo de medición, y posteriormente se llevó a cabo esta última. Se realizó una línea de perfil eléctrico con dirección 49° NE/SW y una longitud de 192 m aproximadamente.

Se emplearon los arreglos Wenner – Schlumberger y Dipolo - Dipolo con la finalidad de obtener una buena combinación de resolución lateral y vertical del subsuelo, esto es debido a las diferentes características resolutivas que cada arreglo posee. Ambos arreglos se llevaron a cabo con 48 electrodos equidistantes a 4 m esto con base en el largo de la línea seleccionada y la resolución deseada en el estudio.



Figura 20. Colocación de los electrodos a cada 4m



Figura 21. Colocación del cable inteligente

4.3.- Inversión de datos 2D

Una vez que se realizaron los estudios prácticos del sondeo mecánico y TRE, fue necesario llevar a cabo el procesado de ambos datos, esto con la finalidad de que la representatividad de cada uno de los métodos empleados sea la más cercana a la realidad del subsuelo.

Para el procesamiento de los datos obtenidos a partir de la TRE se empleó el programa Earth Imager 2D (Advanced Geosciences, Inc.) para llevar a cabo el proceso de inversión, mismo que permitió generar un modelo de la distribución de resistividades a través de una sección del subsuelo, la cual se ajustó con las mediciones de resistividad obtenidas en la superficie.

El proceso de inversión puede representarse de acuerdo a la figura 24:

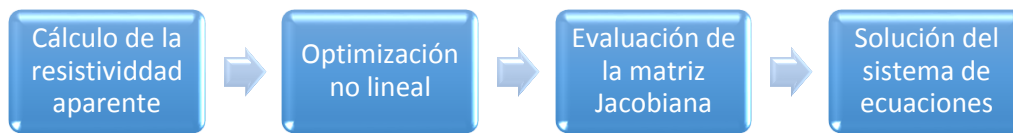


Figura 22. Proceso de inversión

De acuerdo con Menke, (1989), la teoría de inversión es un conjunto de técnicas estadísticas y matemáticas que facilitan la obtención de la información confiable de algún sistema físico a través de experimentaciones sobre el sistema, con la finalidad de encontrar el modelo que mejor se ajuste al comportamiento real del sistema.

El proceso de inversión consiste en una función que defina con que exactitud el modelo de inversión generado se ajusta a las mediciones realizadas en campo, de esta manera también se determina qué nivel de incertidumbre se tiene en el modelo. Hasta el momento se ha hecho mención de dos elementos necesarios para el proceso de inversión, a saber, un modelo directo, mediante el cual se realiza el cálculo de la resistividad para sección 2D, también de una función objetivo que indica los criterios de ajuste del modelo a las mediciones de campo. Un tercer elemento necesario para llevar a cabo dicho proceso de inversión es un algoritmo de búsqueda, el cual determina de qué manera el modelo de inversión es generado.

Uno de los métodos más bondadoso empleado para determinar la resistividad de los bloques en el modelo de inversión es el de mínimos cuadrados, basado en la siguiente ecuación:

$$(J_i^T J_i + \lambda_i C^T C) \Delta r_i = J_i^T g_i \quad [4.1]$$

Siendo J_i la matriz Jacobiana de las derivadas parciales, g_i el vector encargado de controlar la diferencia entre los valores medidos y los valores calculados por el algoritmo el número de iteración, λ_i el factor de amortiguamiento, encargado de determinar de forma relativa la importancia de reducir y/o eliminar datos desajustados, así como la determinación de la suavidad del modelo. Δr_i es el vector encargado de contener las

variaciones de los valores del modelo de resistividad en cada iteración; i , r_i son los valores del modelo de resistividad previo en cada iteración. Con la finalidad de evitar inestabilidad en el modelo, se utiliza un filtro C denominado filtro de rugosidad, empleado para el ajuste suavizado del modelo de resistividad resultante.

Existen otros métodos iterativos implementados también en el software, tales como el método de diferencias finitas o elemento finito, y la matriz de sensibilidad Jacobiana empleado para obtener el modelo de inversión a través de algún método numérico.

La cantidad de cálculos a realizar por la computadora es muy basta, lo cual resulta en un largo tiempo de cálculo, el cual no solo depende de la cantidad de datos, sino de la capacidad computacional del equipo. Con el objetivo de reducir dentro de lo posible dicho tiempo de cálculo Loke y Barker, (1995) emplean un método denominado *método de cuasi-Newton*, el cual, reduce el tiempo de cálculo, a continuación se describe el método, el cual, a grandes rasgos consiste en realizar el cálculo computacional de la matriz Jacobiana para cada i -ésima iteración, la cual es reemplazada posteriormente por la siguiente iteración obtenida a partir de:

$$B_{i+1} = B_i + U_i P_i^T \quad [4.2]$$

$$u_i = (\Delta y_i - B_i p_i) + P_i^T P_i \quad [4.3]$$

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i \quad [4.4]$$

En donde:

B_{i+1} se trata de la aproximación de la matriz Jacobiana para cada $i+1$ iteración, y_i es el modelo resultante en cada i -ésima iteración y Δy_i es la variación en el modelo resultante después de cada i -ésima iteración. En su artículo Loke y Barker, (1995) hacen mención de un modelo de inversión en dos dimensiones, basado en el criterio de mínimos cuadrados, el cual, consiste en efectuar una división de la superficie en un número de bloques rectangulares, con el objetivo de llevar al mínimo la diferencia que existe entre los valores medidos y los valores teóricos calculados para la resistividad aparente; esto se logra a través del ajuste de la resistividad de cada uno de estos bloques de manera iterativa.

El valor de sensibilidad es una medida de la cantidad de información acerca de la resistividad de un modelo de bloques contenido en un conjunto de datos medidos (Urbieta Gómez, 2009). Dependiendo del nivel de sensibilidad del área en la cual se ubique el punto de atribución en la pseudosección puede o no ser recomendable el uso de esta aproximación, de acuerdo con Urbieta, (2001), la aproximación por el método de mínimos cuadrados produce resultados satisfactorios para aquellas modalidades en donde el punto de atribución en la pseudosección se encuentra ubicado en un área con altos valores de sensibilidad.

4.3.1- Modelo directo (Resistividad aparente)

La finalidad del modelo directo está en obtener una expresión que represente la diferencia de potencial entre cualquier par de puntos con el objetivo de obtener la distribución de las resistividades del subsuelo. Esto se logra a través de la variación de potencial en el semiespacio, de esta manera, para un caso general con una configuración electródica común (lineal), en la cual se cuenta con dos electrodos de corriente (A, B) y dos electrodos de potencial (M, N) la variación del potencial queda expresada de la siguiente manera:

$$\Delta U_N^M = \Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \quad [4.5]$$

De la ecuación [4.5] resulta el valor de resistividad para el punto medio del dispositivo, expresado de la siguiente manera y expresado en (*Ohm/m*):

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K \quad [4.6]$$

Siendo K el coeficiente geométrico del arreglo, el cual, como se mencionó anteriormente, depende de la distancia que exista entre los electrodos, de esta forma:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad [4.7]$$

En conjunto, las ecuaciones anteriores, representan la solución del problema directo, a saber, la obtención del modelo de resistividades aparentes. Dichos cálculos resultan bastante sencillos cuando el comportamiento del subsuelo tiende al de un subsuelo homogéneo, sin embargo, los cálculos se van complicando a medida que aumenta la heterogeneidad del subsuelo, es aquí cuando es necesario recurrir a la resolución de las ecuaciones mediante el empleo de métodos numéricos recursivos Pekeris, (1940).

Mediante la resolución de la siguiente ecuación diferencial parcial se obtuvo un modelo de resistividades en dos dimensiones:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) = I(x, y, z) \quad [4.8]$$

En donde V es el potencial eléctrico en forma escalar, σ es la conductividad eléctrica y $I(x, y, z)$ representa la corriente eléctrica en función de (x, y, z) . Mediante el empleo de métodos numéricos tales como el de diferencias finitas o el de elementos finitos se lleva a cabo la discretización de la ecuación diferencial, esto con la finalidad de obtener las variaciones puntuales en todas las direcciones del semiespacio.

El método de Diferencias finitas consiste en hacer una discretización del subsuelo mediante el empleo de bloques rectangulares, a través de una malla o rejilla determinando el potencial en cada una de ellas. Por otra parte, la técnica de Elementos finitos lleva a cabo la discretización del volumen de terreno en elementos de resistividad constante, sin la

necesidad de que adquieran una forma rectangular, para obtener los potenciales en los nodos de la malla. Dentro de esta malla, cada celda contiene un valor constante de resistividad real a través del cual se propaga la ecuación de transporte y es posible realizar el cálculo de la resistividad aparente.

4.3.2- Modelo inverso (Resistividad real)

La finalidad del modelo inverso es obtener un modelo que describa la distribución de las resistividades reales del subsuelo que ajuste de la manera más confiable los valores de las resistividades aparentes teóricas a los valores de resistividad medidos en campo. La obtención de dicho modelo se basa en un subsuelo conformado por una serie de prismas bidimensionales adyacentes a los que Loke y Barker, (1995) denominan dominios.

Debido a que el procedimiento convencional para calcular la resistividad de los bloques consiste en la aplicación de un método iterativo de optimización no lineal, si se presenta un problema no lineal, este se linealiza a través de cambios en los valores de resistividad, dichos cambios hacen posible la discretización mediante celdas de resistividad constante.

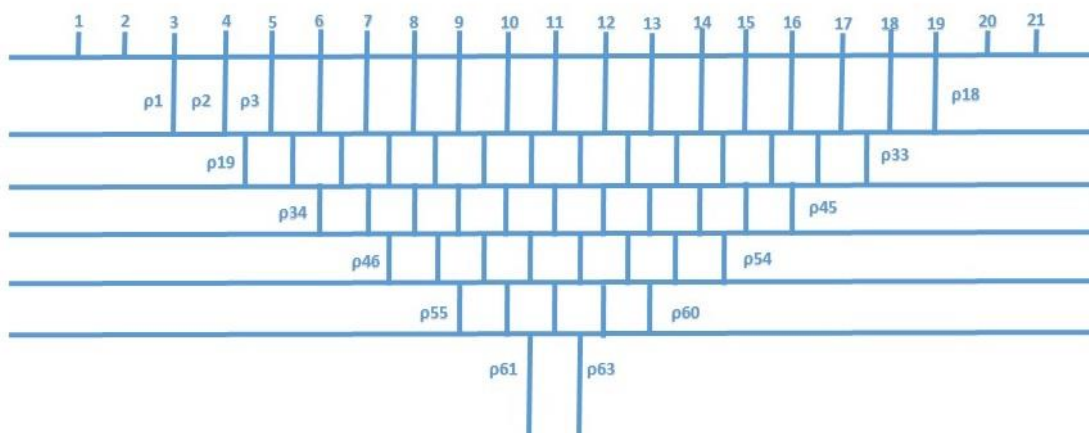


Figura 23. Arreglo de bloques rectangulares del modelo 2D. Modificado de (Loke y Barker, 1995)

En la figura 25, el número de bloques es proporcional a la cantidad de datos de resistividad aparente de la pseudosección, posteriormente la profundidad al centro del interior de cada bloque es remplazada en la profundidad media de investigación, la cual, dependerá de la configuración eléctrica empleada Edwards, (1997).

A continuación se describe de Tejero, Facultad de Ingeniería, UNAM, (2002), el proceso matemático de inversión, basado en el método numérico de mínimos cuadrados, el cual parte del algoritmo matemático desarrollado por Loke y Barker, (1995) para calcular la imagen de resistividad.

Mediante la siguiente expresión se representa la resistividad aparente, la cual, por conveniencia para futuros desarrollos matemáticos del modelo, se expresa en términos de primer orden de una expansión de Taylor.

$$\rho_a = F(\mathbf{p}) + \sum_{k=1}^M \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_k} \delta p_k \quad [4.9]$$

En la ecuación 4.9, \mathbf{p} representa al vector de los parámetros cuya dimensión es \mathbf{M} , ρ_k representa la resistividad real de cada prisma y la función $F(\mathbf{p})$, que define la resistividad aparente.

Una vez representada la resistividad aparente, es necesario definir la diferencia entre la resistividad observada ρ_o y la estimada ρ_e , la cual, es estimada hasta el elemento j th. De esta manera el error cuadrático de la función queda expresado de la siguiente manera:

$$\delta \rho_{aj} = \rho_{aj}^o - \rho_{aj}^e \quad [4.10]$$

$$E^2 = \sum_{j=1}^N \delta \rho_{aj}^2 = \sum_{j=1}^N (\rho_{aj}^o - \rho_{aj}^e)^2 = \sum_{j=1}^N \left(\rho_{aj}^o - F_j(\mathbf{p}) - \sum_{k=1}^M \frac{\partial F_j(\mathbf{p})}{\partial p_k} \delta p_k \right)^2 \quad [4.11]$$

Ecuación en la cual \mathbf{N} representa el número de mediciones. En síntesis, la ecuación 4.11 queda expresada con respecto al vector \mathbf{p} de la siguiente manera:

$$\frac{\partial E^2}{\partial p_i} = 2 \sum_{j=1}^N \left(\rho_{aj}^o - F_j(\mathbf{p}) - \sum_{k=1}^M \frac{\partial F_j(\mathbf{p})}{\partial p_k} \delta p_k \right) \left(-\frac{\partial F_j(\mathbf{p})}{\partial p_i} \right) = 0 \quad [4.12]$$

En la expresión anterior $i=1, 2, 3, \dots, \mathbf{M}$ y se define mediante el siguiente conjunto de ecuaciones normalizadas:

$$\sum_{k=1}^M \delta p_k \sum_{j=1}^N \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_j} \frac{\partial F_i(\vec{p})}{\partial p_i} = \sum_{j=1}^N \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_i} \delta p_{aj} \quad [4.13]$$

Esta última expresión es útil para obtener la solución de la forma matricial, esto en términos de $\delta(\vec{p})$ y de acuerdo con Loke y Barker, (1995) la expresión, así como el origen de los elementos de la matriz Jacobiana quedan determinados de la siguiente manera:

$$\delta p = (J^T j + \lambda C^T C)^{-1} J \delta \rho_a \quad [4.14]$$

$$J_{jk} = \frac{\partial F_j(p)}{\partial p_k} \quad [4.15]$$

En la expresión 4.14 λ representa al factor de amortiguamiento, C un filtro de suavizamiento y T representa la transpuesta de la matriz. Mediante la derivada de una función potencial Loke y Barker, (1995) presentan una solución a la ecuación 4.15 denominando a dicha solución como la *Deconvolución de Mínimos Cuadrados*, conocida como (LSD). En dicha solución, $F(\vec{p})$ es el resultado de la derivada de $U(\vec{r})$ con respecto a la resistividad real, es importante recordar que esto solo se aplica para cada prisma. El resultado de dicha derivada solo puede ser válido para pequeños contrastes en la resistividad de prismas adyacentes.

Debido a los diversos factores que intervienen al momento de llevar a cabo las mediciones (no linealidad) existe más de una solución válida al problema inverso, a diferencia del modelo directo. Dicha validez se controla mediante un error prescrito. Para reducir la *no linealidad* se recurre a métodos iterativos, los cuales, mediante la generación de diversas soluciones, en teoría con menor ambigüedad, satisfacen de mejor manera el problema planteado.

En ocasiones el modelo suele no ser el más adecuado, esto se refleja de diversas maneras, por ejemplo, la generación de resistividades negativas, sin embargo se debe tener cuidado con esta aseveración dado que las resistividades negativas pueden ser también resultado de otras implicaciones tales como los distintos tipos de ruido o variaciones geométricas tales como fallas o diques (Wilkinson, 2008).

4.3.3- Criterios de convergencia

Uno de los principales objetivos de la inversión de datos de TRE es reducir la diferencia que existe entre los datos medidos en campo y los datos calculados mediante la reconstrucción del modelo. Existen dentro de los principales softwares de inversión al menos dos parámetros que permiten al usuario cerciorarse que esta diferencia sea cada vez menor en cada iteración, estos parámetros son el error cuadrático medio (RMS) y la norma L2.

El RMS representa la diferencia que existe entre los valores calculados y los valores medidos en campo, el cálculo de dicho error se representa a continuación mediante la siguiente expresión:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (q_i - y_i)^2}{N}} \times 100\% \quad [4.16]$$

En la ecuación 4.16, N representa el número total de mediciones, y representa los datos medidos y q son los datos calculados. Este error debe ir decreciendo proporcionalmente al número de iteraciones.

4.3.4- Filtros

Un filtro es una operación lineal que aplicada a un proceso matemático modifica el resultado de dicho proceso. Dependiendo de la naturaleza del filtro el resultado obtenido del proceso puede ser controlado dependiendo de los fines que se busque, por ejemplo la eliminación de una señal anómala dentro de la adquisición de datos geofísicos, o bien resaltar el efecto de la señal sobre alguna estructura de interés con la finalidad de delimitarla de una mejor manera.

Para efectos del presente estudio, el motivo por el cual se empleó esta técnica es el de remover o suavizar algunas inconsistencias que se presentaron en el caso del arreglo Dipolo-Dipolo.

Debido a que el filtro aplicado en este trabajo es un filtro lineal, se describe de forma breve el funcionamiento de este tipo de filtros.

Los filtros lineales se llevan a cabo por medio de una ventana de magnitud definida, conocida como ventana móvil. El número de casillas que abarca dicha ventana recibe el nombre de kernel. Una característica significativa de este tipo de filtros es que asignan el mismo peso a todos los datos del sondeo sin importar si existen dentro ellos datos muy disparados de la media.

El filtro aplicado a los datos obtenidos del arreglo Dipolo-Dipolo es el filtro mediana que viene integrado en el software *Prosys II*. El filtro mediana asigna a cada punto el valor de las muestras que se encuentran alrededor de cada valor de la señal:

$$f(x) = Y_{med} \quad [4.17]$$

De esta manera los únicos valores que se modifican son solo aquellos que estadísticamente hablando, no corresponden a la mediana de la muestra. Cabe mencionar

que el filtro mediana no causa efectos negativos en los extremos, y tiene una tendencia a suavizar los bordes; motivo por el cual se determinó su empleo en este trabajo.

4.3.5- Archivo URF (Universal Resistivity File)

Dependiendo del equipo que se utilice para llevar a cabo el levantamiento de los datos de resistividad del subsuelo, existen distintos formatos de entrada, para el caso del presente trabajo en donde se empleó el Syscal Pro se utilizó el formato .URF creado por AGI, dicho formato de entrada fue elaborado en Excel con la ayuda de los software Prosys, el cual permitió llevar a cabo el arreglo correspondiente y Electre-pro, encargado de llevar a cabo la configuración de la geometría.

```

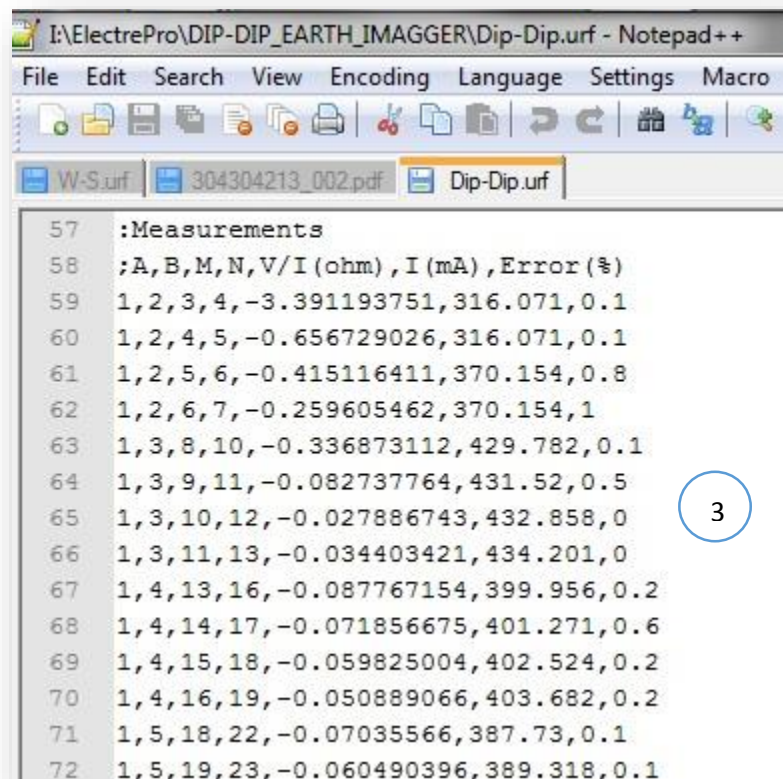
I:\ElectrePro\DIP-DIP_EARTH_IMAGGER\Dip-Dip.urf - Notepad++
File Edit Search View Encoding Language Settings Macro Run Plugins Window
W-S.urf 304304213_002.pdf Dip-Dip.urf
1 ;Linea 1 con arreglo Dip-Dip
2 ;2062014
3 Unit: meters
4 ;Levantamiento geofísico San Luis Tlaxialtemalco
5
6 :Geometry
7 ;ID,X,Y,Z
8 1,0,0,0
9 2,4,0,0
10 3,8,0,0
11 4,12,0,0
12 5,16,0,0
13 6,20,0,0
14 7,24,0,0
15 8,28,0,0
16 9,32,0,0
17 10,36,0,0
18 11,40,0,0
19 12,44,0,0
20 13,48,0,0
21 14,52,0,0
22 15,56,0,0
23 16,60,0,0
24 17,64,0,0
25 18,68,0,0
26 19,72,0,0
27 20,76,0,0
28 21,80,0,0
    
```

Figura 24. Encabezado y geometría del archivo .urf para el arreglo dipolo-dipolo

El archivo consta de tres partes principales, en la primera se escriben los datos generales de la línea o líneas que se procesarán, es decir el nombre o el arreglo con el cual fueron tomados, posteriormente se recomienda escribir como comentario la fecha y el lugar en el cual se realizó el levantamiento, en el tercer renglón se introducen las unidades en las cuales el software interpretará las distancias.

Posteriormente en la segunda parte del archivo se escribe la geometría del tendido en superficie, es decir la cantidad de electrodos que se empleó (ID) así como la ubicación espacial de cada uno de estos en un sistema coordenado tridimensional (X, Y, Z).

Finalmente en la tercera parte se detallan los aspectos geométricos del trazado, pero ya dentro del subsuelo, es decir el posicionamiento espacial de la señal, el cual dependerá en gran manera del arreglo empleado (A, B, M, N), después se escribe el valor numérico de (V/I) para cada posición y lo mismo se hace para (I), finalmente se escribe el valor numérico del error obtenido para cada medición.



```

I:\ElectrePro\DIP-DIP_EARTH_IMAGGER\Dip-Dip.urf - Notepad++
File Edit Search View Encoding Language Settings Macro
W-S.urf 304304213_002.pdf Dip-Dip.urf
57 :Measurements
58 ;A,B,M,N,V/I (ohm) , I (mA) , Error (%)
59 1,2,3,4,-3.391193751,316.071,0.1
60 1,2,4,5,-0.656729026,316.071,0.1
61 1,2,5,6,-0.415116411,370.154,0.8
62 1,2,6,7,-0.259605462,370.154,1
63 1,3,8,10,-0.336873112,429.782,0.1
64 1,3,9,11,-0.082737764,431.52,0.5
65 1,3,10,12,-0.027886743,432.858,0
66 1,3,11,13,-0.034403421,434.201,0
67 1,4,13,16,-0.087767154,399.956,0.2
68 1,4,14,17,-0.071856675,401.271,0.6
69 1,4,15,18,-0.059825004,402.524,0.2
70 1,4,16,19,-0.050889066,403.682,0.2
71 1,5,18,22,-0.07035566,387.73,0.1
72 1,5,19,23,-0.060490396,389.318,0.1
    
```

Figura 25. Medidas del archivo .urf para el arreglo dipolo-dipolo

5.- Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el sondeo mecánico y en la TRE. Se presentan también las interpretaciones de cada metodología, y se hace una comparación entre los dos arreglos electródicos empleados en la TRE, siendo estos Dipolo-Dipolo y Wenner - Schlumberger, con la finalidad de determinar cuál es el que resulta más conveniente para los objetivos del estudio.

5.1 Sondeo mecánico

Como resultado del análisis del sondeo mecánico se realizó un perfil estratigráfico de la zona de estudio, esto con ayuda del reporte técnico de la perforación, en el cual se reportan las profundidades alcanzadas y la litología correspondiente a cada una de ellas. Se delimitaron tres capas principales, siendo la primera de ellas una capa con espesor de 5.2 m la cual consiste en una mezcla de gravas medias y arenas limosas, la segunda capa con un espesor de 9.8 m. está conformada por grava y arena media y finalmente una tercer capa en la cual se encontró el basalto; mismo que continuó presentándose en el sondeo hasta los 37 m. de profundidad que tuvo como alcance el sondeo. A continuación se muestra un esquema representativo de dicho perfil estratigráfico.

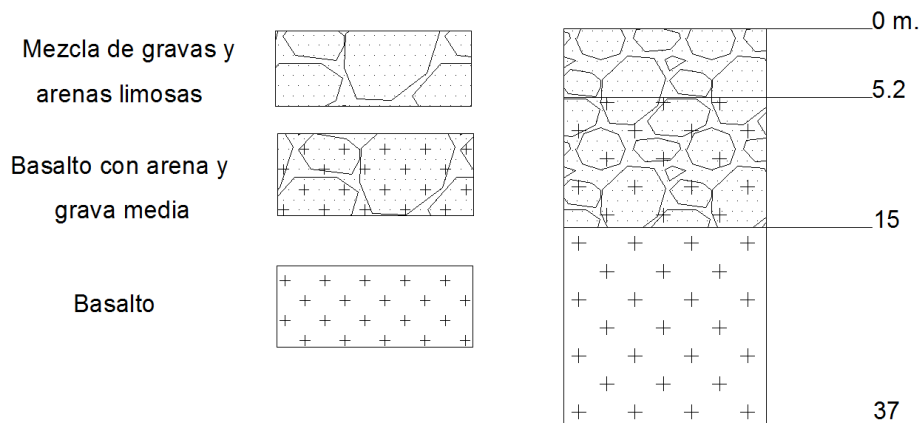


Figura 26. Perfil estratigráfico

Se obtuvieron un total de 11 muestras del sondeo mecánico, con las cuales fue posible correlacionar el informe técnico de la perforación, para tener mayor certeza de que los materiales identificados se encontraban a la profundidad mencionada. En la figura 27 se muestra el sitio en el cual fue llevada a cabo la perforación.



Figura 27. Localización del sondeo mecánico (punto rojo)

Con los resultados obtenidos del sondeo mecánico fue posible asegurar que el material presente debajo de la capa de suelo, es arena, grava y el basalto, en el cual se pretende instalar el pozo de absorción, se observó a demás el estado en el cual se encuentra dicho basalto. El intemperismo que presenta permite aseverar que en el estudio de TRE será posible encontrar un sitio, en el cual el basalto se encuentre más fracturado, esto con la finalidad de favorecer la infiltración del agua captada por el pozo.



Figura 28. Muestras de material en charola

5.2 Comparación de los arreglos electródicos empleados

La elección del mejor arreglo electródico para un sondeo en campo, depende de diversos factores, como lo son el tipo de estructura que se desea caracterizar, la sensibilidad del arreglo, del resistímetro, y en caso de existir, el nivel de ruido de la zona de estudio.

Dentro del ámbito hidrogeológico, dos de los arreglos electródicos más empleados son Wenner Schlumberger y Dipolo Dipolo.

Del amplio rango de características que posee cada una de las configuraciones electródicas, las principales por las cuales se emplearon en el presente trabajo Wenner Schlumberger y Dipolo Dipolo, fueron las siguientes:

- Profundidad de Investigación
- Respuesta del arreglo a las variaciones laterales y verticales de la resistividad
- Relación señal/ruido

Estos parámetros son ligados a la función de sensibilidad; la cual se encarga de representar de qué manera un cambio en la resistividad de una sección del subsuelo, influirá en la medida del potencial eléctrico. De esta manera el valor de la influencia del subsuelo sobre la medida del potencial eléctrico se incrementa con el valor obtenido de la función de sensibilidad. Cabe mencionar que nunca un rango de sensibilidades para un modelo de subsuelo puede ser idéntico a otro (Edwards, 1997).

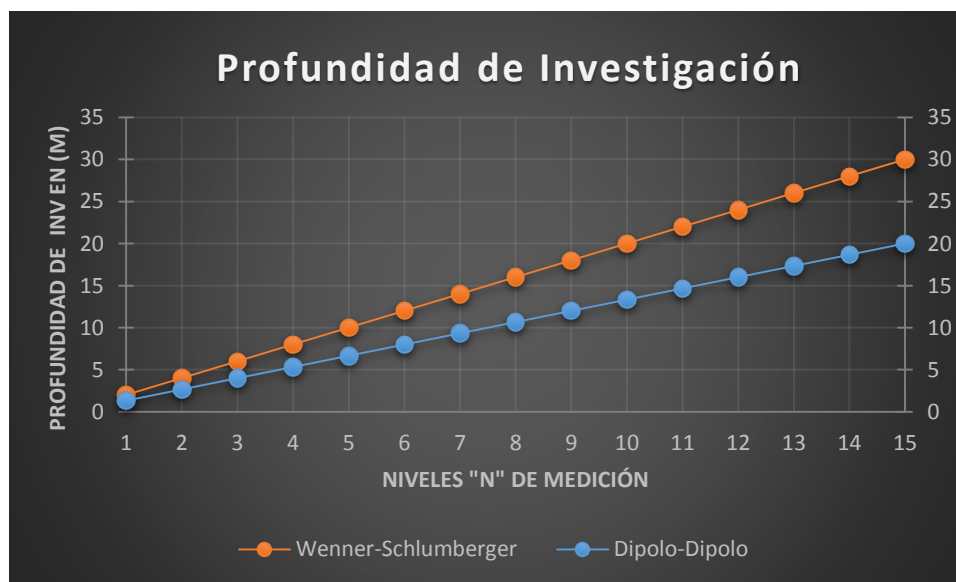


Figura 29. Profundidades medias de investigación para el arreglo Wenner Schlumberger y Dipolo- Dipolo, considerando un medio homogéneo, con una separación electródica de 5m (Modificada de Edwards 1977)

De acuerdo con Hidalgo, Heng Loke, Oscar FAnton, & Cara Rubí, la función de sensibilidad en el arreglo Dipolo - Dipolo es más susceptible a los cambios horizontales de resistividad y relativamente menos susceptibles a los cambios verticales, brindando de esta manera una mejor resolución vertical. Por el contrario, el arreglo Wenner Schlumberger reporta una mayor sensibilidad a las estructuras horizontales.

Por otro lado la señal eléctrica para el arreglo Wenner Schlumberger suele ser más alta que para el arreglo Dipolo-Dipolo debido a la relación que existe entre el voltaje y el factor “n” pues para la misma cantidad de corriente, el voltaje medido disminuye al mismo tiempo que “n” aumenta.

Para el caso del presente trabajo, se pretende definir las posibles estructuras que se encuentren en el subsuelo, así como su profundidad aproximada, y si es posible definir de manera escueta la presencia de fracturas en dichas estructuras que favorezcan la posibilidad de posicionar en el área un pozo con fines de llevar a cabo la recarga artificial del acuífero de la zona. Es por ello que se tomó la decisión de emplear las configuraciones Wenner Schlumberger esperando obtener de ella una mejor caracterización horizontal de las estructuras y el arreglo Dipolo-Dipolo con la finalidad de tener una mejor caracterización vertical de las mismas.

5.3 Análisis de perfiles

El estudio consta de dos perfiles geoelectrónicos realizados sobre la misma línea con una orientación de 52° al NE, como lo muestra la figura 17. En esta sección se muestran los resultados obtenidos de la inversión de los datos tomados en campo, así como la geometría de los arreglos empleados, con su respectiva secuencia de medición, y los parámetros de inversión empleados en el software de inversión.

5.3.1 Arreglo eléctrico Wenner-Schlumberger

El arreglo Wenner Schlumberger empleado consistió en una distribución de 48 electrodos tendidos sobre una línea con una separación entre ellos de 4 metros, a continuación se muestra una imagen representativa de dicho arreglo.

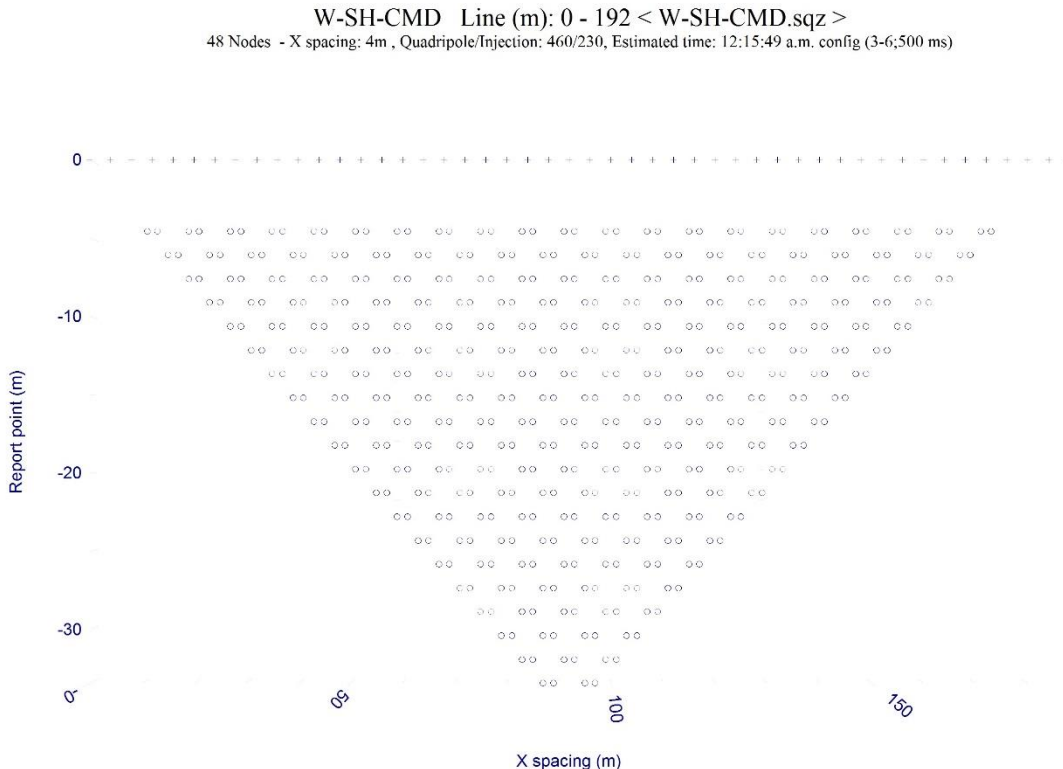


Figura 30. Distribución espacial del arreglo Wenner Schlumberger

A continuación se muestra el resultado obtenido del arreglo Wenner Schlumberger. En este perfil se resaltan 2 estructuras altamente contrastantes siendo la primera de ellas una estructura bajo resistiva en la parte superior a una profundidad de aproximadamente 4 metros; resultado del riego diario de la cancha de futbol empastada.

La segunda estructura da inicio alrededor de los 18 metros d profundidad, se trata de una estructura alto resistiva, a la cual se le relaciona con una estructura basáltica, esto es debido al previo estudio de la geología del lugar.

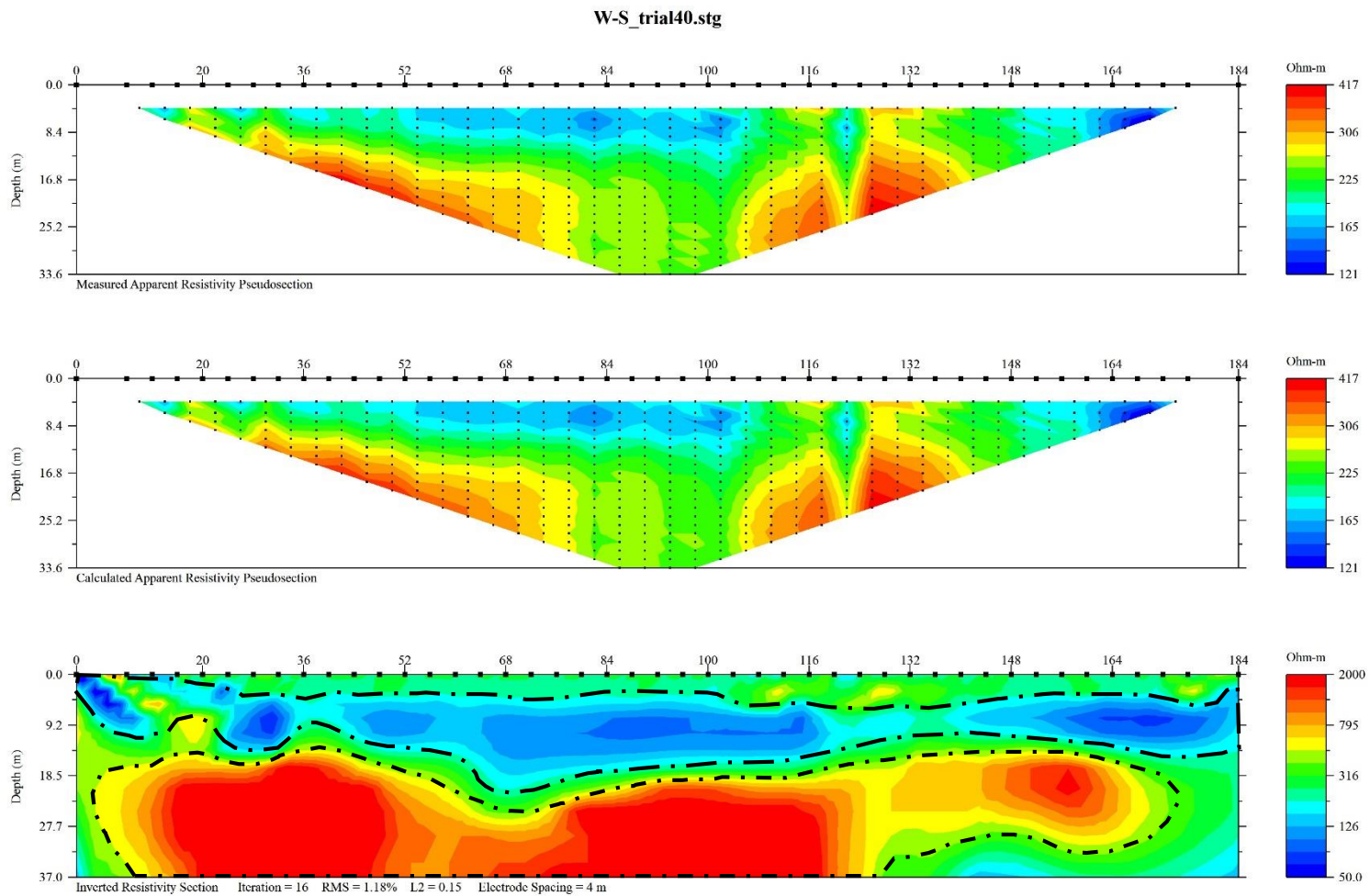


Figura 31. Modelo preliminar del arreglo Wenner Schlumberger

5.3.2 Arreglo electródico Dipolo - Dipolo

De la misma manera el arreglo Dipolo-Dipolo consistió en un tendido de 48 electrodos equidistantes con una separación de 4 metros uno del otro.

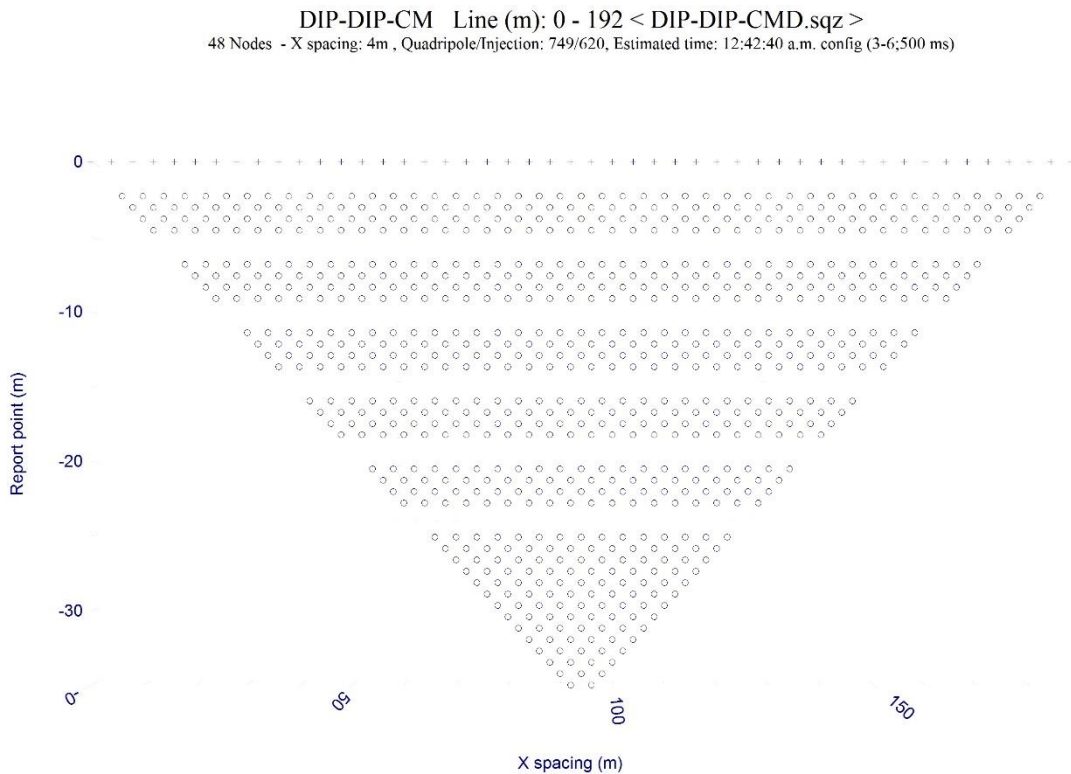


Figura 32. Distribución espacial del arreglo Dipolo - Dipolo

En este arreglo las dos estructuras mencionadas anteriormente se encuentran definidas prácticamente con las mismas condiciones, sin embargo existe una mejora en la resolución vertical, a pesar de que se pierde un poco la resolución horizontal.

A este arreglo se le aplicó el filtro mediana, integrado en el software *Prosys II*, esto con la finalidad de suavizar los bordes de la estructura inferior, los cuales resultaban muy abruptos.

A continuación se muestra la imagen preliminar para dicho modelo, así como las imágenes filtradas, con la finalidad de ver de qué manera afecta el filtro al modelo final y cómo se comporta de acuerdo al número de ventanas aplicado en el filtro. Se utilizaron ventanas de 8 y 12 puntos.

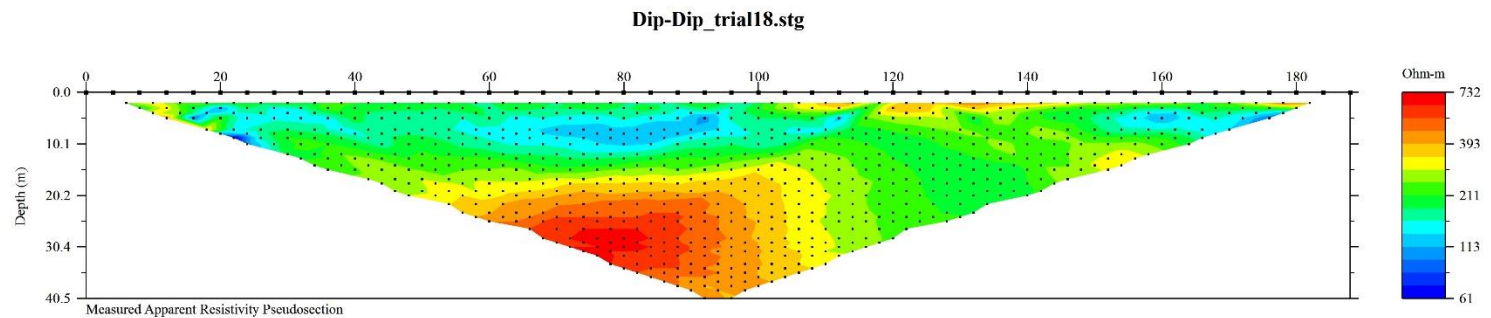


Figura 34. Preliminar de Dipolo Dipolo con filtro mediana y una ventana de tamaño 12

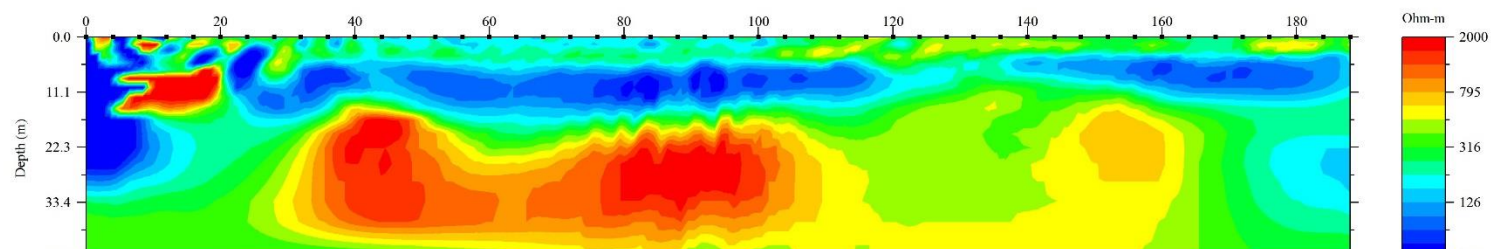
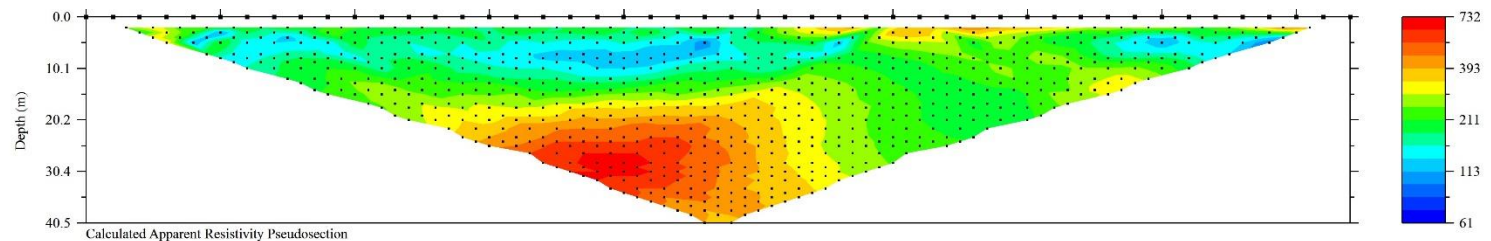


Figura 35. Preliminar de Dipolo Dipolo con filtro mediana y una ventana de tamaño 8

Figura 33. Modelo preliminar sin filtro aplicado

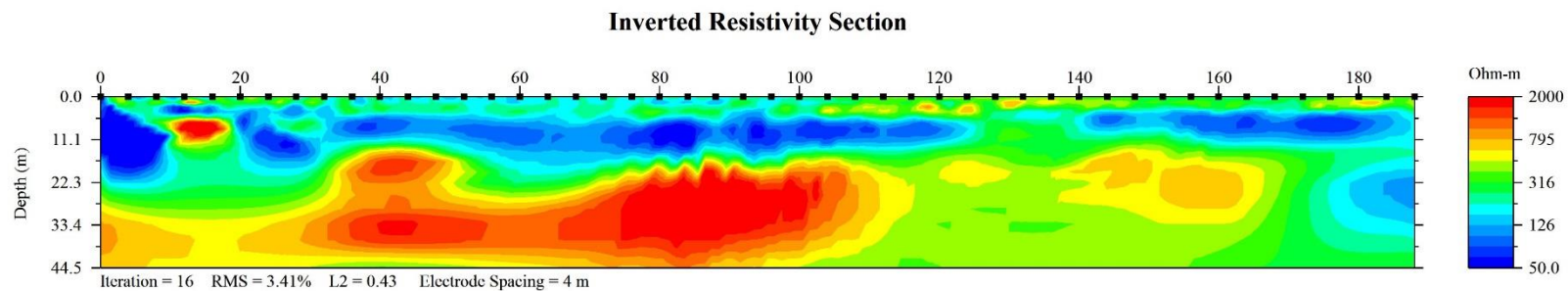


Figura 34. Preliminar de Dipolo Dipolo con filtro mediana y una ventana de tamaño 12

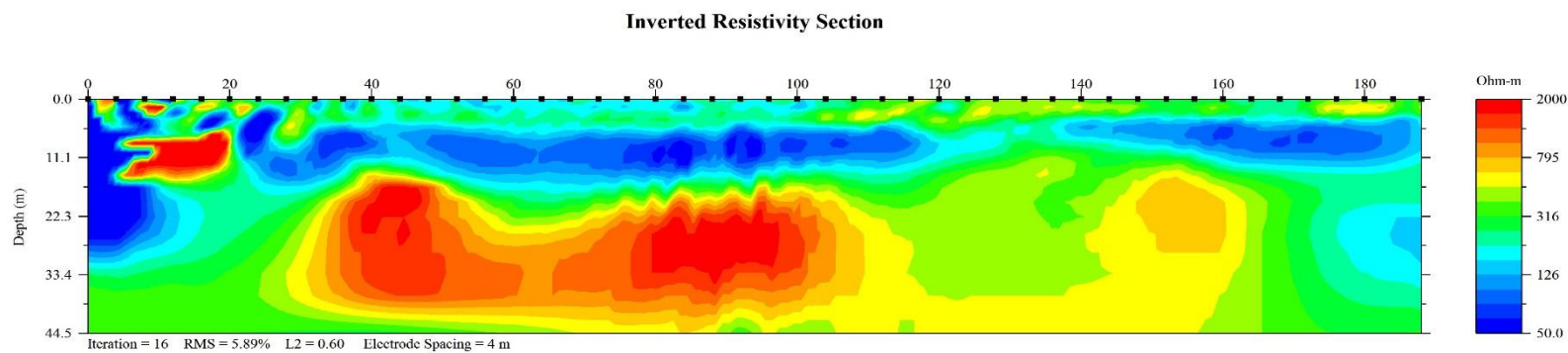


Figura 35. Preliminar de Dipolo Dipolo con filtro mediana y una ventana de tamaño 8

A partir de la sección obtenida del arreglo Wenner Schlumberger se elaboró la figura 36, en la cual se presentan los resultados del sondeo mecánico junto a la sección geoelectrónica, esto con la finalidad de calibrar dicha sección. En la figura se menciona la zona, que de acuerdo con la sección geoelectrónica es la más idónea para la ubicación del sitio de recarga. La elección se debió a que se presenta en el cuerpo basáltico una zona de baja resistividad, la cual se atribuye a una zona de fracturamiento, esto hace factible la infiltración del agua proveniente de la lluvia.

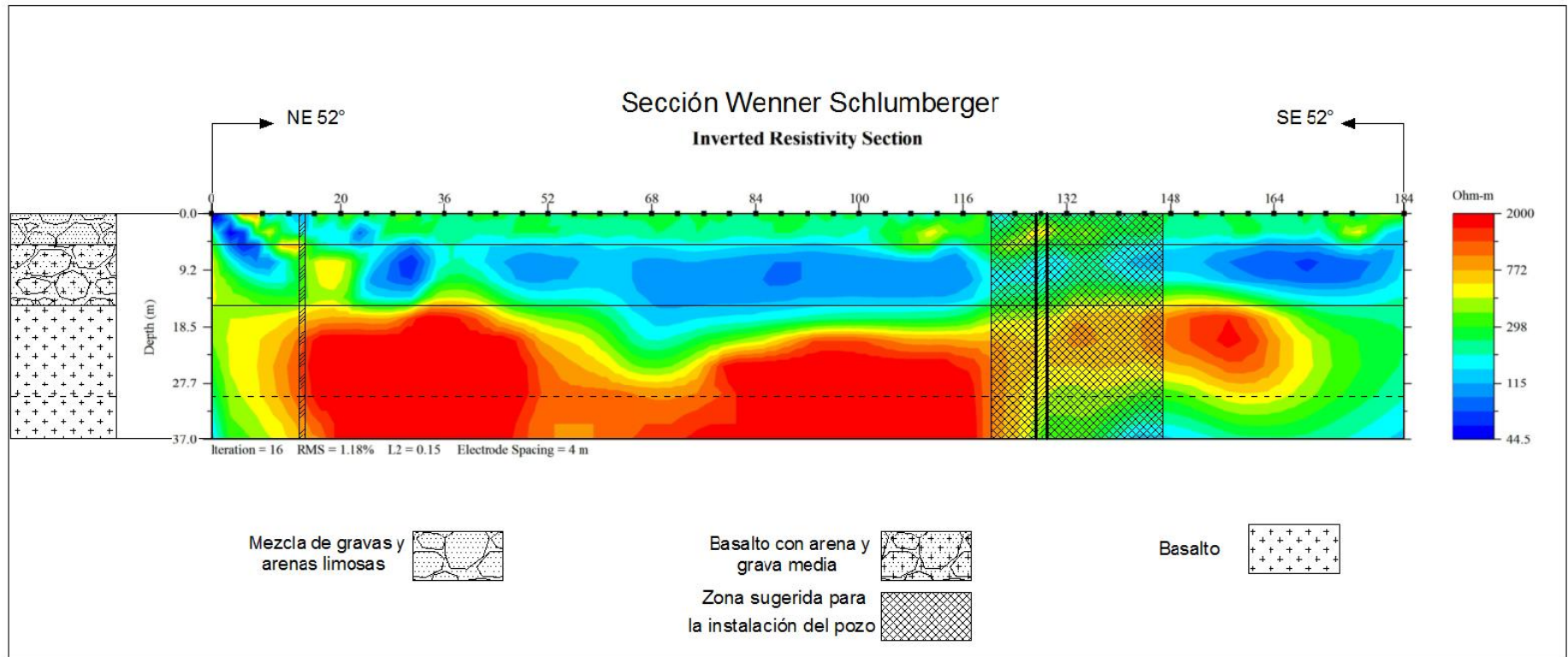


Figura 36. Zona sugerida para la instalación del pozo, vista en perfil

La figura 37 consiste en una sección en plata en la cual se presenta la line de TRE (en color rojo), y se hace una proyección en la cual se sugiere un área en donde se recomienda ubicar el pozo o pozos de recarga de acuerdo con los resultados obtenidos.



Figura 37. Zona sugerida para la instalación del pozo

6.- Conclusiones y recomendaciones

En este apartado se presenta el resultado final del trabajo de investigación realizado y se sugiere de desde el punto de vista geofísico y social el sitio más adecuado para colocar el pozo de absorción.

Cabe mencionar que la caracterización realizada en el presente trabajo de tesis se basa únicamente en los ámbitos geológico y geofísico para sugerir un lugar favorable para la construcción de un pozo que tendrá como propósito principal el disminuir significativamente las inundaciones presentadas en la zona durante la época de estiaje y como propósito secundario el efectuar una recarga artificial del acuífero de la zona, en caso de presentarse las condiciones necesarias para ello, las cuales se investigarán en trabajos posteriores.

A partir de las suposiciones descritas en el párrafo anterior, la prospección geofísica llevada a cabo con el método de TRE, en conjunto con la investigación geológica y estratigráfica realizadas en el sitio de estudio han permitido concluir los siguientes puntos:

- Con base en los perfiles geoeléctricos se ha establecido la zona en la cual se presenta un mayor grado de deterioración en el basalto, dicha zona está caracterizada por resistividades que van desde 500 hasta los 800 $\Omega\cdot\text{m}$ a una profundidad de aproximadamente 19 m (cuerpo 1).
- Las resistividades por encima de los valores mencionados en el punto anterior, a la misma profundidad sugieren que se trata del cuerpo basáltico con un menor grado de deterioro, en especial hacia la porción SE.
- Con ayuda del perfil estratigráfico obtenido a partir del sondeo mecánico, fue posible localizar una capa de basalto con arena y grava medias a una profundidad de 5.2 m, la cual al momento de interpretar el perfil de TRE se correlaciona perfectamente.
- Debido a los valores de resistividad obtenidos en el perfil geoeléctrico para la capa mencionada en el punto anterior, los cuales van desde 45 hasta 200 $\Omega\cdot\text{m}$ es posible aludir que se trata de una capa capaz de contener agua, esta conclusión surgió debido a que en la zona de estudio diariamente se riega el pasto de manera que se sugiere que el excedente del riego se encuentra en dicha capa (cuerpo 2).

- La idea de comparar los arreglos electródicos empleados permitió conocer de mejor manera la geometría del cuerpo basáltico localizado, esto es debido a que con el arreglo Dipolo - Dipolo fue posible corroborar mediante una mejor caracterización vertical que la zona propuesta, efectivamente es la que mayor deterioración del basalto presenta. Por otro lado con el arreglo Wenner Schlumberger se logró una mejor caracterización horizontal de la estructura.
- En cuanto a la metodología empleada, se concluye que fue útil, sin embargo para futuros estudios, cercanos al área de estudio se recomienda el levantamiento de al menos una línea más de TRE que sea ortogonal a la línea principal, esto con la finalidad de obtener una mejor correlación de los datos geofísicos.
- Debido a las dimensiones espaciales del sitio no fue posible profundizar más, sin embargo para estudios posteriores dentro de la zona, se recomienda realizar un roll allong, esto con la finalidad de encontrar la profundidad del nivel freático.

De acuerdo con las conclusiones mencionadas anteriormente, se presenta a continuación un esquema en el cual se menciona gráficamente el lugar sugerido para la localización del pozo, así como las consideraciones que se tomaron para sugerir dicho sitio. Para la presentación de los resultados finales se empleó la sección Wenner Schlumberger, debido a que es la que mejor representa el cuerpo basáltico en el cual ha de instalarse el pozo.

El sitio sugerido no se encuentra sobre la línea de investigación, esto es debido a que se encuentra una cancha popular de fútbol soccer, por ello se realizó una proyección perpendicular a la línea de TRE para llegar al lugar ideal, esto hizo tomando en cuenta que las variaciones litológicas presentadas en la zona no son demasiado abruptas, esto fue posible corroborarlo en el sondeo mecánico que se hizo, puesto que dicho sondeo tampoco se realizó sobre la línea de estudio, sin embargo se procedió a proyectar de forma perpendicular el punto en donde se realizó el sondeo hacia la línea de TRE y la correlación obtenida entre los perfiles eléctricos y el perfil del sondeo mecánico fue buena.

Se concluye en el presente trabajo, en el cual se propone que de acuerdo con los resultados obtenidos, que la zona más adecuada para instalar el pozo es la que se presenta en las figuras anteriores, dicha zona inicia a partir de los 120 m de longitud de la línea de TRE, hasta aproximadamente 177 m, obteniendo una sección de aproximadamente 57 m de longitud, en la cual las características para la instalación del pozo son adecuadas, a partir de dicha sección se hizo una proyección perpendicular a la línea de TRE hasta llegar a un lugar

en el que la construcción del pozo no invada alguna de las canchas de futbol soccer. Obteniendo así el área sombreada de la figura 39, en la cual se proponen dos sitios representados por un círculo azul. El sitio seleccionado por el diseñador del pozo debe ser seleccionado tomando en consideración la facilidad con la que el agua proveniente de las partes con mayor elevación topográfica, esto con la finalidad de que sea la mayor cantidad posible de agua la que se vaya hacia el pozo y de esta manera los problemas generados por las grandes escorrentías puedan minimizarse.

Referencias

- A. Álvarez Manilla, 1990, Apuntes de geofísica aplicada, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Distrito Federal
- Barkerr R. D., 1989 Depth of investigation of colinear symmetrical four electrode arrays, Geophysics
- Barker J. C., 1991, Investigation of tin-rare earth element placers in the Ray rive watershed
- Edwards. L.,1997, A modified pseudo section for resistivity and induced polarization
- Gobierno del Distrito Federal, 2006, Gaceta oficial del Distrito Federal, México Distrito Federal
- IU. V. Lakubovskii & L.L. Liajov, 1980, Exploración eléctrica , Editorial Nedra, Moscú
- Klimentov P. P. et al, 1982, Metodología de las investigaciones hidrogeológicas, Moscú
- L. Mijailove, 1989, Hidrogeología, Mir Moscú
- Loke y Barker M. H.,1995, Rapid least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections , Geophysics 682-690
- Loke, M. H., 2010, Tutorial 2D and 3D electrical imaging surveys, geotomo
- Martinez, F. L., 2007, Metodología de la evaluación de riesgos y vulnerabilidad de suelos para actividades no industriales en el Distrito Federal
- Menke. V., 1989, Geophysical data analysis, Discrete inverse theory, International geophysics series
- Pekeris, C., 1940, Direct method of interpretation in resistivity prospecting
- Reynolds, JM, 1997, An introduction to applied and environmental geophysics, Toronto
- Quintana Berlanga Álvaro R. 2013, Aplicación de la Tomografía Eléctrica en la Caracterización del Deslizamiento de Doña Mencía, Universidad de Granada, España
- Secretaria del medio ambiente , 2006-2012, Libro blanco, México
- Tejero, A.C.M., 2002 Cavity detection in the south western hilly portion of Mexico city by resistivity imaging, México, Distrito Federal
- Urbietta M. J., 2001, La tomografía eléctrica en los métodos de corriente continua, Tesis de licenciatura, Facultad de ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
- Wilkinson, 2008, Extreme sensivity of crosshole, electrical resistivity tomography measurements to geometric errors, Geophysical Journal International