



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Caracterización Geoeléctrica de la Cantera
Oriente con SEV y Segundas Diferencias de
Potencial**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Janette Tovar Jara

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Aide Esmeralda López González



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado CARACTERIZACION GEOELECTRICA DE LA CANTERA ORIENTE CON SEV Y SEGUNDAS DIFERENCIAS DE POTENCIAL que presenté para obtener el título de INGENIERO GEOFÍSICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

JANETTE TOVAR JARA
Número de cuenta: 311088669

ÍNDICE

Dedicatoria y agradecimientos	6
<i>Introducción</i>	9
Capítulo 1. Marco Teórico	11
1.1 Prospección Eléctrica	11
1.2 Resistividad Aparente	13
1.3 Factor Geométrico	14
1.4 Sondeo Eléctrico Vertical	14
1.5 Arreglos empleados durante los levantamientos de campo	16
1.6 Problema Directo y Problema Inverso para SEV	17
1.7 Resistividad aparente de Segundas Diferencias de Potencial	19
1.8 Filtro Savitzky-Golay	21
1.9 Software para Inversión ZONDIP para 1D	25
Capítulo 2. Área de Estudio	27
2.1 Localización del Área de Estudio Jardín de la Escuela de Lenguas, Lingüística y Traducción (ENALLT)	27
2.2 Cantera Oriente A3 de la Reserva del Pedregal de San Ángel (REPSA)	28
2.3 Revisión de la Geología del Área de Estudio Cantera Oriente A3 REPSA del Jardín de la Escuela de Lenguas, Lingüística y Traducción (ENALLT)	30
2.3 Acuífero de la CDMX	35
2.5 Humedad y Lluvias en el sur de la CDMX	38
2.6 Resistividades aparentes de los materiales del subsuelo	39
Capítulo 3. Metodología	40
3.1 Instrumentación Geofísica	40
3.2 Adquisición de datos de campo	41
3.3 Procesamiento de los Datos	51
3.4 Preparación de los Cortes Geológicos basados en el Pozo 266 Metro Copilco	55
Capítulo 4. Modelación Teórica	56
4.1 Modelo para el Arreglo Schlumberger	56
4.2 Modelo para el Arreglo Dipolo Dipolo	57

4.3 Modelo para el Arreglo Dipolo Dipolo usando dos capas _____	60
Capítulo 5. Resultados _____	61
5.1 Resultados. Jardín de la Escuela Nacional de Lenguas, Lingüística y Traducción (ENALLT)_	61
5.2 Resultados. Primer Levantamiento en REPSA _____	66
5.3 Resultados. Segundo Levantamiento en REPSA _____	74
Capítulo 6. Conclusiones y Discusión _____	82
6.1 Levantamiento en el Jardín de la Escuela Nacional de Lenguas, Lingüística y Traducción (ENALLT) _____	82
6.2 Primer Levantamiento en REPSA. _____	82
6.3 Segundo Levantamiento en REPSA _____	83
Capítulo 7. Anexos _____	85
7.1 Tablas de Humedad y Evaporación Media Mensual en Ciudad Universitaria _____	85
7.2 Levantamiento arreglo Schlumberger en la ENALLT _____	86
7.3 Levantamiento arreglo Dipolo Dipolo en la ENALLT _____	86
7.4 Primer Levantamiento REPSA Schlumberger _____	87
7.5 Valores finales del Primer Levantamiento REPSA Dipolo Dipolo _____	88
7.7 Primer Levantamiento. Segundas Diferencias de Potencial _____	89
7.8 Segundo Levantamiento en REPSA para el arreglo Dipolo Dipolo _____	90
7.9 Datos para las SDP con el arreglo DD Segundo Levantamiento _____	92
7.10 Pozo 266 Metro CU _____	94
Referencias _____	95

Relación de Figuras

Figura 1.1 Ventana de VES Notepad. _____	26
Figura 2.1 Localización de ENALLT. _____	27
Figura 2.2 Reserva del Pedregal en Ciudad Universitaria y Cantera Oriente A3. _____	28
Figura 2.3 Cantera Oriente A3. _____	29
Figura 2.4 Derrame de lavas del Xitle. _____	31
Figura 2.5 Columna Estratigráfica de la Sierra Chichinautzin. _____	32
Figura 2.6 Provincias Fisiográficas de México. _____	35
Figura 2.7 Humedad Relativa y Evaporación Media Mensual en CU. _____	38
Figura 3.1 Instrumentación y equipo de campo. _____	40
Figura 3.2 Localización del Jardín de la ENALLT. _____	41
Figura 3.3 Arreglo Schlumberger en el Sitio de Pruebas en el Jardín la ENALLT. _____	42
Figura 3.4 Orientación del Arreglo Dipolo Dipolo en el Jardín de la ENALLT. _____	43
Figura 3.5 Localización de la Cantera Oriente A3. _____	44
Figura 3.6 Arreglo Schlumberger empleado para el SEV realizado en el Primer Levantamiento de la Cantera Oriente A3 _	45
Figura 3.7 Arreglo Dipolo Dipolo para el Primer Levantamiento del Canal 1 o Fuente Izquierda. _____	47
Figura 3.8 Arreglo Dipolo Dipolo para el Primer Levantamiento del Canal 2 o Fuente Derecha. _____	48
Figura 3.9 Arreglo Dipolo-Dipolo para el Segundo Levantamiento. _____	50
Figura 3.9 Corte Geológico Pozo 266 Metro CU. _____	55
Figura 4.1 Curvas de resistividades aparentes Modelación Schlumberger. Gráfica que ilustra el modelo y la inversión del modelo propuesto para el arreglo Schlumberger _____	57
Figura 4.2 Curvas de resistividades aparentes Modelación Dipolo-Dipolo _____	58
Figura 4.3 Modelación de dos capas para el arreglo Dipolo Dipolo. _____	60
Figura 5.1 Gráficas de Resistividades aparentes y Cortes Geoeléctricos del arreglo Schluberger ENALLT. _____	62
Figura 5.2 Gráficas de Resistividades aparentes y Cortes Geoeléctricos del arreglo Dipolo Dipolo ENALLT. _____	63
Figura 5.3 Gráficas de SDP del arreglo Dipolo Dipolo ENALLT. _____	65
Figura 5.4 Gráficas de Resistividades aparentes y Cortes Geoeléctricos del arreglo Schluberger Cantera A3 Primer Levantamiento. _____	67
Figura 5.5 Gráficas de Resistividades aparentes y Cortes Geoeléctricos del arreglo Dipolo Dipolo Cantera A3 Primer Levantamiento. _____	69
Figura 5.6 Gráfica de SDP Cantera A3 Primer Levantamiento _____	71
Figura 5.7 Gráficas de Resistividades aparentes y Cortes Geoeléctricos del arreglo Dipolo Dipolo Cantera A3 Segundo Levantamiento. _____	75
Figura 5.8 Gráfica de SDP y Cortes Geoeléctricos Cantera A3 Segundo Levantamiento. _____	78
Figura 5.9 Gráfica de SDP y Cortes Geológico Cantera A3 Segundo Levantamiento. _____	80

Relación de Cuadros

Cuadro 1.3 Parámetros y sus respectivas funciones para el Filtro Savitzky-Golay empleado en Python. _____	24
Cuadro 2.1 Claves Cartográficas y Litología. _____	32
Cuadro 2.2 Unidades Litoestratigráficas e la Sierra Chichinautzin. _____	33
Cuadro 2.3 Litología y Estratigrafía correspondientes al Pozo 266 Metro CU. _____	34
Cuadro 2.4 Litología y Valores de resistividad. _____	39
Cuadro 3.1 Resistividades y profundidades del Corte Geológico Pozo 266 Metro CU. _____	55
Cuadro 5.1 Espesores y resistividades de los Cortes geoelectricos DD ENALLT. _____	64
Cuadro 5.2 Espesores y resistividades de los Cortes geoelectricos Arreglos DD y Schlumberger Primer Levantamiento REPSA. _____	73
Cuadro 5.3 Espesores y resistividades de los Cortes geoelectricos arreglo Dipolo Dipolo Segundo Levantamiento REPSA. _____	81
Cuadro 7.1 Humedad Relativa Media Mensual Ciudad Universitaria. _____	85
Cuadro 7.2 Evaporación Media Mensual Ciudad Universitaria. _____	85
Cuadro 7.3 Posiciones y datos observados en campo para los arreglos Schlumberger ABMC y ABCN. _____	86
Cuadro 7.4 Fuentes BAMC y BACN para arreglo Dipolo Dipolo ENALLT. _____	86
Cuadro 7.5 Datos Primer Levantamiento REPSA Schlumberger ABMN. _____	87
Cuadro 7.6 Datos Primer Levantamiento REPSA Schlumberger BANM. Datos filtrados de Resistencia (V/I) y Resistividad Aparente (Rhoa) del Primer Levantamiento con el arreglo Schlumberger con Canal 2 ABMN (Tovar Jara, 2024). _____	87
Cuadro 7.7 Datos Primer Levantamiento DD REPSA ABMN Canal 1. _____	88
Cuadro 7.8 Datos Primer Levantamiento DD REPSA BANM Canal 1. _____	88
Cuadro 7.9 Datos Primer Levantamiento DD REPSA ABMN Canal 2. _____	88
Cuadro 7.10 Datos Primer Levantamiento DD REPSA BANM Canal 2. _____	88
Cuadro 7.11 Datos para el cálculo de las Segundas Diferencias de Potencial (SDP) para la Fuente Izquierda. _____	89
Cuadro 7.12 Datos para el cálculo de las Segundas Diferencias de Potencial (SDP) para la Fuente Derecha. _____	89
Cuadro 7.14 Posiciones de cada electrodo _____ para el arreglo Dipolo Dipolo para el Canal 2. _____	90 90
Cuadro 7.13 Posiciones de cada electrodo _____ para el arreglo Dipolo Dipolo para el Canal 1. _____	90 90
Cuadro 7.15 Arreglo DD para la Fuente Izquierda BAMN. Se incluyen sus dos canales BAMC y BACN con los valores Raw y los valores filtrados mediante una iteración de SG (SG1) tanto de los valores de Resistencia (V/I) como los de Resistividad aparente (Rhoa) (Tovar Jara, 2024). _____	91
Cuadro 7.16 Arreglo DD para la Fuente Derecha BAMN. _____	91
Cuadro 7.17 Datos SDP Segundo Levantamiento REPSA. Tabla que muestra los datos empleados para el cálculo de las Segundas Diferencias de Potencial (SDP) Segundo Levantamiento REPSA (Tovar Jara, 2024). _____	93

Trabajo realizado con el apoyo del Programa UNAM-
DGAPA-PAPIME

Clave del proyecto: PE106521

Dedicatoria y agradecimientos

Le doy gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México y especialmente a la Facultad de Ingeniería por darme la oportunidad de entrar en sus aulas y brindarme el apoyo siempre que lo necesité. Adorada Facultad de Ingeniería, siempre te voy a llevar en mi recuerdo, gracias por todo.

También, agradezco a mis profesores, que siempre estaban dispuestos a ayudarme y brindarme sus conocimientos con ánimo y sin restricción. Quisiera agradecer especialmente a mi asesora, la Dra. Aide Esmeralda, por siempre ser una guía y gran mentora y que siempre estuvo ahí conmigo enfrentando las dificultades que representó este trabajo. Gracias por tenerme tanta paciencia y siempre darme consejos, no sólo académicos, sino también de vida. Gracias infinitas.

A mis padres y a mi hermana por siempre estar ahí cuando necesitaba de su apoyo y ánimo para continuar con mis proyectos, porque nunca faltaron los momentos en los que de verdad sentía que ya no podía más, pero sus palabras siempre me alentaron y me dieron ese empujón para seguir. Gracias con todo mi corazón.

A mis amigas, sobre todo a Sol, por siempre ser tan alegre y trabajadora. Me ayudaste sin darte cuenta. Siempre tenías mucha alegría y me la contagiabas. Gracias a ti, las prácticas eran divertidas. Te quiero mucho y te deseo lo mejor en todo lo que emprendas.

Agradezco a mis sinodales, por su apoyo y por sus observaciones oportunas en este trabajo, me fueron de gran ayuda, ya que me orientaron en detalles que yo pasé desapercibidos. Gracias por todo su apoyo y amabilidad.

Y, finalmente, este trabajo fue realizado con el apoyo del programa UNAM-DGAPA-PAPIIT con clave IA100522Proyecto PAPIIT IA105222I, además de agradecer a la Cantera Oriente A3 de la REPSA, ya que sin su apoyo no se hubiera podido llevar a cabo la realización de esta tesis.

Resumen

Se proponen dos arreglos geoeléctricos, uno con la configuración Schlumberger y el otro con la de un Dipolo Dipolo, para realizar dos levantamientos geofísicos. Uno de ellos se efectuó en el Jardín de la Escuela Nacional de Lenguas, Lingüística y Traducción en Ciudad Universitaria y, el segundo, se llevó a cabo en la Zona de Amortiguamiento A3, correspondiente a la Cantera Oriente de la Reserva del Pedregal, también en Ciudad Universitaria. Además, se plantea el uso de las Segundas Diferencias de Potencial (SDP) con los valores obtenidos con los arreglos Dipolo Dipolo para comparar los resultados entre los arreglos convencionales y los cálculos de las SDP y determinar cuál es el mejor para detectar los cambios de la resistividad del subsuelo.

Respecto a la metodología, se realizaron dos levantamientos en la Cantera Oriente A3 de la Reserva del Pedregal de San Ángel en Ciudad Universitaria y un levantamiento en la zona de pruebas en el Jardín de la Escuela Nacional de Lenguas, Lingüística y Traducción del campus central de Ciudad Universitaria. Para estas dos zonas se planearon dos arreglos, uno perteneciente al arreglo Schlumberger, el cual se emplearía como arreglo de comparación, y un segundo arreglo, el Dipolo Dipolo, el cual se planeó como un arreglo tradicional, pero tomado con dos fuentes, una llamada Fuente Izquierda y la otra como Fuente Derecha.

Así, se obtuvieron los datos para curvas de resistividades aparentes tanto para los arreglos Schlumberger como para el arreglo Dipolo Dipolo y, mediante un software libre de inversión geofísica, se generaron las curvas de resistividades reales. Además, se realizaron los cálculos para generar las curvas de Segundas Diferencias de Potencial y, con los datos de los levantamientos con el arreglo Dipolo Dipolo, se hicieron los cálculos adicionales para obtener las Segundas Diferencias de potencial, esto con el fin de poder estudiar los cambios de resistividad en el subsuelo debidos a la humedad y para la detección, tanto de cuerpos de agua superficiales como del Nivel Freático del sitio, estimado a partir del Pozo 266 Metro CU.

Lo que se pudo observar en los resultados fue que las variaciones más notorias de las resistividades aparentes ocurrieron en los estratos más superficiales, entre los 30-40 m y, en el caso de mayores profundidades, se observó un cambio muy abrupto del valor de resistividad hasta los 60-68 m de profundidad, siendo estas resistividades correspondientes a valores bajo-resistivos. Por lo anterior, puede inferirse que los estratos más superficiales no sólo son húmedos, sino que corresponden a cuerpos de agua someros y que el nivel freático sí se localiza en la profundidad estimada, aunque en la temporada de diciembre, en la que se hizo el segundo levantamiento, es muy posible que su nivel se encuentre más superficial a lo estimado.

Abstract

Two geoelectrical arrays are proposed, one with the Schlumberger configuration and the other with a Dipole Dipole configuration, to carry out two geophysical surveys. One of them was carried out in the Garden of the National School of Languages, Linguistics and Translation at Ciudad Universitaria and the second one was carried out in the Buffer Zone A3, corresponding to the Cantera Oriente of the Pedregal Reserve, also at Ciudad Universitaria. In addition, the use of Second Potential Differences (SDP) with the values obtained with the Dipole Dipole arrays is proposed to compare the results between the conventional arrays and the SDP calculations and determine which is the best to detect changes in subsurface resistivity.

Regarding the methodology, two surveys were carried out in the Cantera Oriente A3 of the Reserva del Pedregal de San Ángel in Ciudad Universitaria and one survey in the test area in the Garden of the National School of Languages, Linguistics and Translation of the central campus of Ciudad Universitaria. For these two areas, two arrays were planned, one belonging to the Schlumberger array, which would be used as a comparison array, and a second array, the Dipole Dipole, which was planned as a traditional array, but taken with two sources, one called Left Source and the other as Right Source.

Thus, data for apparent resistivity curves were obtained for both the Schlumberger arrays and the Dipole Dipole array and, using free geophysical inversion software, the real resistivity curves were generated. In addition, calculations were performed to generate the Second Potential Difference curves and, with the data from the Dipole-Dipole array surveys, additional calculations were made to obtain the Second Potential Differences, in order to be able to study the changes in resistivity in the subsoil due to humidity and to detect both surface water bodies and the site's water table, estimated from Well 266 Meter CU.

What could be observed in the results was that the most notable variations in apparent resistivities occurred in the most superficial strata, between 30-40 m and, in the case of greater depths, a very abrupt change in the resistivity value was observed up to 60-68 m depth, these resistivities corresponding to low-resistive values. From the above, it can be inferred that the most superficial strata are not only humid, but correspond to shallow bodies of water and that the water table is located at the estimated depth, although in the December season, in which the second survey was carried out, it is very possible that its level is shallower than estimated.

Introducción

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en dos levantamientos con Sondeo Eléctrico Vertical dentro de la Cantera Oriente A3 de la Reserva del Pedregal de San Ángel (REPSA), en Ciudad Universitaria, y con dos tipos de arreglos, el Schlumberger y el Dipolo Dipolo. Además de mostrar los resultados de las Segundas Diferencias de Potencial, generados a partir de los datos del arreglo Dipolo Dipolo. También, se hizo un levantamiento como prueba en el jardín de la Escuela Nacional de Lenguas, Lingüística y Traducción con los arreglos Schlumberger y Dipolo Dipolo. Los datos obtenidos fueron de las resistividades aparentes del subsuelo y éstos fueron obtenidos utilizando un equipo que permitía el uso de dos canales o fuentes.

Los datos de campo obtenidos con el arreglo Dipolo Dipolo fueron los que más ruido presentaron, por lo que fueron procesados mediante eliminación de outliers y, posteriormente, se les aplicó un Filtro Savitsky-Golay (Filtro SG). Para el Primer Levantamiento en la REPSA, los datos requirieron un Filtro SG de una ventana de longitud de siete y un polinomio de ajuste de cuatro y, para el Segundo Levantamiento, se utilizó una ventana con longitud de 15 y un polinomio de orden tres.

Posteriormente, tanto a los datos obtenidos con el arreglo Schlumberger como los del arreglo Dipolo Dipolo, se les hizo la inversión geofísica mediante el software ZONDIP 1D, el cual ajusta los datos mediante el Método de Newton. Con los datos generados con esta inversión se generaron las gráficas de los cortes geoelectrónicos y se obtuvo la estimación de los espesores de los estratos del subsuelo.

Respecto al cálculo de las Segundas Diferencias de Potencial (SDP), éstas se elaboraron en una hoja de cálculo en Excel, mediante las ecuaciones tomadas de López González (2014) para obtener el Factor Geométrico de Segundas Diferencias de Potencial, donde se consideró un cociente con el producto y la resta de los dos factores geométricos, correspondientes a cada fuente, de modo que el valor de las SDP se obtuvo mediante el producto entre el Factor Geométrico y la resta de las Resistividades aparentes.

Así, las curvas resultantes de todos los procesamientos fueron graficadas en un programa generado en Python y en estas gráficas fue posible visualizar las curvas de resistividad aparente, los cortes geoelectricos y las curvas de las Segundas Diferencias de Potencial. Respecto al nivel freático, el cual se tenía estimado a una profundidad de 68 m, también se indicó dentro de cada gráfica, junto con los límites de capa de cada estrato, considerando los datos de la litología del Pozo 266 Metro CU. Esto se hizo con el fin de observar las profundidades de cada elemento y que se pudieran hacer comparaciones con los resultados obtenidos en cada curva.

Localización del área de estudio

La Cantera REPSA se encuentra ubicada en Ciudad Universitaria, al sur de la Ciudad de México y representa una zona de reserva ecológica de gran valor tanto para esta ciudad como para las diversas disciplinas encargadas de su estudio. Es importante conocer y caracterizar este espacio, ya que se cuenta con poca o nula información sobre el mismo. Por lo cual, este trabajo busca ofrecer un estudio para el reconocimiento de la profundidad del nivel freático, mediante el método geofísico de Sondeo Eléctrico Vertical, ya que éste permite obtener valores de resistividades aparentes de los materiales del subsuelo y del agua subterránea, pudiendo así estimarse la profundidad del nivel freático, que es el objetivo de estudio de este texto.

Objetivos

Realizar un procesamiento geofísico con los datos de campo obtenidos mediante los arreglos Schlumberger y Dipolo Dipolo para caracterizar la zona de estudio de la Cantera Oriente A3 perteneciente a la Reserva del Pedregal de San Ángel, en Ciudad Universitaria, al sur de la Ciudad de México. Esto con el fin de localizar un horizonte con las características geoelectricas de un cuerpo de agua o su nivel freático.

Emplear el cálculo de Segundas Diferencias de Potencial con los datos obtenidos con los levantamientos de Sondeo Eléctrico Vertical mediante el arreglo Dipolo Dipolo para caracterizar el nivel freático y las posibles variaciones de la humedad del subsuelo en la Cantera Oriente A3 de la Reserva del Pedregal de San Ángel.

Comparar los resultados de los arreglos Schlumberger, Dipolo Dipolo y de las Segundas Diferencias de Potencial con la información bibliográfica del Pozo 266 Metro CU para determinar la localización, en profundidad, del nivel freático y las posibles litologías presentes en el subsuelo.

Localizar una tubería, a aproximadamente 0.50 m de profundidad, en el Jardín de la Escuela Nacional de Lenguas, Lingüística y Traducción en Ciudad Universitaria, mediante los arreglos Schlumberger y Dipolo Dipolo, con el objetivo de tener un medio de comparación que no presente tanto ruido y tienda a ser más homogéneo.

Capítulo 1. Marco Teórico

1.1 Prospección Eléctrica

Definición

La prospección geofísica es un conjunto de técnicas usadas para la exploración del subsuelo con el objetivo de estudiar y extraer minerales y otras sustancias útiles, como el agua subterránea, el carbón y el petróleo. La manera en que se realiza una prospección es haciendo mediciones y observaciones desde la superficie terrestre, para así poder localizar cuerpos desde el interior de la Tierra mediante el contraste de sus propiedades físicas con las del medio que los rodea, donde es importante considerar que el suelo es un medio conductor (Orellana, 1982).

También, dentro de la prospección geofísica hay divisiones entre los métodos, ya que en unos el campo es natural, como los métodos gravimétrico y magnético, los cuales emplean los campos de gravedad y magnético y, en los otros métodos como eléctrica y sísmica, el campo usado para el estudio es artificial, ya que se aplican corrientes eléctricas o se generan perturbaciones en el medio para realizar su estudio (Orellana, 1982) y, además, los métodos eléctricos resistivos usan fuentes con corriente directa o corriente alterna de baja frecuencia (Kearey, 2013)

En los métodos geoelectrónicos se consideran tres magnitudes electromagnéticas principales, las cuales son:

1. Permeabilidad magnética
2. Permitividad o constante dieléctrica
3. Resistividad

Por lo tanto, cuando se conocen las propiedades electromagnéticas de las rocas es posible aplicar los métodos eléctricos para hacer la caracterización del medio (Orellana, 1982).

Para esto, se debe considerar que el comportamiento físico de las rocas depende tanto de las propiedades antes mencionadas como de los minerales que las constituyen, del modo de agregación de sus minerales y de los poros presentes en su estructura, considerando su forma, su volumen y su relleno, el cual puede ser tanto aire como agua (Orellana, 1982). Además, la presión y la temperatura son factores que también participan, ya que ejercen una gran influencia sobre los elementos del comportamiento físico de las rocas conforme mayor sea la profundidad en la que éstas se encuentran (Orellana, 1982).

Por otro lado, Loke (2020) define la prospección eléctrica como un método geofísico cuyo objetivo es determinar la distribución de las resistividades en el subsuelo para obtener la resistividad verdadera, aunque es el potencial del campo eléctrico el que se obtiene durante los estudios de prospección eléctrica en un medio dado, es decir, el modelo directo.

Además, existen varios parámetros geológicos que marcan las variaciones de la resistividad en el subsuelo, como son los minerales y los fluidos, la porosidad y el grado de la saturación del agua en las rocas, por lo cual, es posible emplear este método de resistividad para estudios ambientales, hidrología, minería, geotecnia y en exploración de hidrocarburos (Orellana,1982, Loke, 2020).

La ley física fundamental usada para los estudios de resistividad es la ley de Ohm para el flujo de la corriente en un medio continuo. Así, lo que se mide durante un levantamiento en trabajo de campo es el potencial del campo eléctrico.

La ecuación de la Ley de Ohm, en forma vectorial, para el flujo de corriente en un medio continuo se expresa como:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

Ecuación 1.1

Donde:

\mathbf{J} Densidad de Corriente

σ Conductividad del medio

\mathbf{E} Intensidad del Campo Eléctrico

La resistividad del medio ρ es el valor más empleado en los levantamientos geofísicos, ya que se trata del recíproco de la conductividad σ (Loke, 2020). Es decir:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

Ecuación 1.2

1.2 Resistividad Aparente

Para el método geoelectrico se transmite corriente al subsuelo mediante dos pares de electrodos, C1 y C2, y mediante otros dos electrodos de potencial, P1 y P2, se obtiene la diferencia de potencial entre dos puntos. Así, se puede obtener la siguiente ecuación (1.3) adaptada para una configuración con cuatro electrodos para calcular la distribución del potencial en un medio homogéneo (Loke, 2020).

$$\Delta\phi = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{C_1P_1}} - \frac{1}{r_{C_2P_1}} - \frac{1}{r_{C_1P_2}} + \frac{1}{r_{C_2P_2}} \right) \quad \text{Ecuación 1.3}$$

A partir de los valores ya obtenidos de la corriente I y los valores del potencial $\Delta\phi$, es posible calcular los valores de resistividad aparente ρ_a , además de considerar que la resistividad aparente es dependiente de la configuración y distancias de los electrodos. Así, la resistividad puede quedar expresada como:

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Donde:

k es el Factor Geométrico

ΔV es la diferencia de potencial

I es la intensidad de corriente

ρ_a es la Resistividad aparente

La resistividad que se calcula no es el valor verdadero de la resistividad del subsuelo, sino un valor aparente, puesto que se obtuvo al considerar que se estaba estudiando un medio homogéneo, por lo que, en teoría, si se generara un arreglo de electrodos que siempre fuera igual se podría obtener el mismo valor de resistencia cada vez que se repitiera la medición (Loke, 2020). Lo más probable es que el medio donde se realice el levantamiento corresponda a un terreno conformado por diversos materiales y, como consecuencia, los valores de resistividad que se obtengan también serán una mezcla de esa diversidad (Sánchez, 2009). De ese modo, si lo que se quisiera fuera obtener el resultado de la resistividad real del subsuelo se tendrían que emplear los métodos de inversión (Loke, 2020).

Además, debido al objetivo tratado en este trabajo, es importante abordar lo que Loke (2020) menciona respecto a que las rocas ígneas y metamórficas suelen tener altos valores de resistividad y, en gran medida, estos valores van a depender del grado de fracturamiento y del porcentaje de estas fracturas que se encuentren rellenas con agua y sales. Por otra parte, Loke (2020) también indica que las rocas sedimentarias son más porosas, lo que les permite tener gran contenido de agua y sales, llevándolas a tener valores de resistividad mucho más bajos, mientras que los sedimentos no consolidados tienen los valores de resistividad aún más bajos, incluso menores que los valores de resistividad de las rocas sedimentarias.

1.3 Factor Geométrico

Este factor geométrico K depende el arreglo basado en una configuración con cuatro electrodos.

$$k = \frac{2\pi}{\left(r_{C1P1} - r_{C2P1} - r_{C1P2} + r_{C2P2} \right)} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

Pero puede simplificarse su expresión con esta ecuación:

$$k = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad \text{Ecuación 1.6}$$

1.4 Sondeo Eléctrico Vertical

De acuerdo con Sánchez (2009), un Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) consiste en realizar una serie de mediciones de resistividades aparentes de manera sucesiva, variando los espaciamientos entre los electrodos de corriente y de potencial que conforman el arreglo. Cuando se aumenta la distancia entre los electrodos emisores y receptores, los valores de resistividad obtenidos corresponden a mayores profundidades, pero siempre manteniendo un punto central para el arreglo de electrodos.

Los valores que se obtiene se grafican de manera logarítmica, donde las distancias entre los electrodos se localizan en el eje de las abscisas y los valores de resistividad aparente se ubican en el eje de las ordenadas. A las curvas que se obtiene con estos gráficos se les denomina Curvas de Resistividad Aparente. Es a partir de estas curvas que se hace el análisis de las capas del subsuelo, sus espesores y sus resistividades (Sánchez, 2009). Así, de acuerdo con Orellana (1982), la finalidad de un SEV es descubrir cómo se encuentra la distribución de las resistividades de forma vertical, justo debajo del punto en donde se hizo el sondeo.

De manera deseable e idealizada, un medio debe estar formado con capas o estratos que sean tanto lateralmente horizontales como con resistividades homogéneas, justamente para que las resistividades puedan ser interpretadas, aunque en muchas ocasiones, las áreas de estudio no cumplen con estas características (Sánchez, 2009, Orellana, 1982).

Además, Sánchez (2009) comenta que a partir de las curvas de resistividad aparente se obtienen los cortes geoelectricos. Éstos deben contener el número n de capas, n valores de resistividad de las capas y $n-1$ espesores, ya que no se conoce el espesor de la última capa. Es decir, un corte geoelectrico es una especificación de los espesores y de sus resistividades (Orellana, 1982). De ese modo, es posible analizar el número de estratos del subsuelo junto con sus espesores.

También, es cierto que a partir de un levantamiento de SEV sólo puede obtenerse una sola curva de resistividad aparente, pero ésta puede permitirnos la interpretación de distintos cortes geoelectricos (Sánchez, 2009). Esta situación puede explicarse mediante los conceptos de Principio de equivalencia y el Principio de supresión.

Antes de explicar estos dos principios es importante mencionar dos conceptos más, los cuales son la Resistencia Transversal que es producto del espesor por la resistividad de este y su ecuación se expresa como:

$$T_i = \rho_i E_i \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Y la Conductancia Longitudinal, que es el cociente de la división del espesor entre la resistividad y su ecuación es:

$$S_i = E_i / \rho_i \quad \text{Ecuación 1.8}$$

Definiendo el primer concepto, el del Principio de equivalencia, éste consiste en que si tenemos una capa que sea más resistiva que las contiguas y que su resistencia transversal sea muy alta y la conductancia longitudinal sea baja, puede producir el mismo resultado en la curva de resistividad que otra capa que tenga distintos datos tanto de resistividad aparente como del espesor, pero con un mismo valor de resistencia transversal. (Sánchez, 2009)

Respecto al otro concepto, el Principio de supresión, se basa en considerar que puede existir una capa delgada comprendida entre dos capas adyacentes y que su resistividad aparente también corresponda a un valor intermedio entre los valores de resistividad aparente de esas capas adyacentes, pero que justo por esta situación no puede ser detectada al hacer la interpretación de la curva de resistividades aparentes (Kunetz, 1966).

1.5 Arreglos empleados durante los levantamientos de campo

En este trabajo se utilizaron los arreglos Schlumberger y Dipolo Dipolo para hacer levantamientos de resistividad mediante el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV).

1.5.1 Arreglo Schlumberger

El arreglo Schlumberger consiste en cuatro electrodos que se colocan alrededor de un punto medio común. Sus dos electrodos exteriores, AB, son los electrodos de corriente, mientras que sus electrodos centrales, MN, son los de potencial.

Durante el levantamiento en campo, los electrodos AB se van separando y los electrodos MN se mantienen en sus posiciones hasta que se observe una caída del potencial considerable, momento en el cual se procede a abrir el espaciamiento entre estos electrodos.

1.5.2 Arreglo Dipolo-Dipolo

El arreglo Dipolo Dipolo consiste en un par de electrodos de corriente AB y un par de electrodos de potencial, MN. La característica del arreglo consiste en que los electrodos AB están con la suficiente suficiente proximidad entre sí para medir sus efectos y ser considerado como un dipolo (Orellana, 1982).

Este arreglo nos permite obtener un reconocimiento del subsuelo a partir de los datos de resistividad aparente obtenidos durante un levantamiento de campo. Estos datos de campo se grafican en una pseudo sección y cada valor de resistividad aparente se grafica en el centro del sondeo, es decir, a la distancia media entre los dos dipolos (Orellana, 1982).

1.6 Problema Directo y Problema Inverso para SEV

En las prospecciones geofísicas existe, de acuerdo con Orellana (1982) el problema directo, el cual, consiste en poder determinar una curva de resistividades aparentes, y ésta es obtenida a partir de los datos de resistividad de un levantamiento en campo, donde la característica es que el subsuelo tiene distribuciones de resistividades que son conocidas. También, Loke (2020) menciona que el modelo del problema directo busca determinar el potencial que sería observado sobre una estructura del subsuelo.

Por otra parte, en las prospecciones geofísicas existe la teoría de la inversión, la cual consiste en buscar un modelo matemático que genere una respuesta similar a los valores reales que fueron medidos y que sea una representación de una sección del subsuelo (Loke, 2020). Este modelo contiene parámetros que representan cantidades físicas que se quieren estimar en los datos observados. Así, la respuesta obtenida con este modelo corresponde a los datos sintéticos que son calculados a partir de la relación matemática que define al modelo determinado por un conjunto de parámetros modelados (Loke, 2020).

También, de acuerdo con Loke (2020), todos los métodos de inversión tratan de generar un modelo que obtenga una respuesta que se acomode a los datos medidos y, en respecto a los métodos de optimización, los modelos iniciales se van modificando de manera iterativa de modo que la diferencia entre la respuesta del modelo y la de los datos observados se reduzca. De ese modo, el conjunto de los datos observados puede expresarse como un vector columna y:

$$y = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad \text{Ecuación 1.8}$$

Donde m es el número de mediciones. El modelo que representa la respuesta se puede representar como f :

$$f = \text{col}(f_1, f_2, \dots, f_m) \quad \text{Ecuación 1.9}$$

En los casos de resistividad, normalmente se utiliza el logaritmo de las resistividades aparentes de los datos observados y los de la respuesta obtenidos del modelo, así como emplear el logaritmo

de los valores del modelo como si fuera el modelo de parámetros (Loke, 2020). De ese modo, el modelo de parámetros puede ser expresado como q :

$$q = \text{col}(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad \text{Ecuación 1.10}$$

Para esta ecuación se representa a n como el número de modelos de parámetros. También, Loke (2020) menciona que, para obtener la discrepancia g , se hace el cálculo de la diferencia entre los datos observados y y la respuesta del modelo f :

$$g = y - f \quad \text{Ecuación 1.11}$$

Y, para la optimización con el método de mínimos cuadrados, el modelo inicial se modifica para poder obtener una disminución en la suma del error cuadrático E , obtenido de la diferencia entre la respuesta del modelo y los datos observados.

$$E = g^T g = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad \text{Ecuación 1.12}$$

1.7 Resistividad aparente de Segundas Diferencias de Potencial

Se genera una razón de las segundas diferencias del potencial y el valor del potencial obtenido en cada una de las fuentes y, al final, estas razones serán sumadas. El objetivo de esto es hacer un realce en el campo secundario, poniendo énfasis en los efectos del campo con los parámetros de resistividad y cargabilidad de las segundas diferencias.

Para hacer más claro el concepto sobre las segundas diferencias se profundizará y se desarrollará las ecuaciones que las definen. Para esto, debemos considerar que se cuenta con una fuente (F), un medio (M) y un campo eléctrico $E(\vec{r})$ (López González, 2014). Para este campo se va a considerar sólo su componente en X, es decir:

$$E_x(\vec{r}) \quad \text{Ecuación 1.13}$$

Y se va a obtener su primera y su segunda derivada en esa dirección:

$$\frac{\partial E_x(\vec{r})}{\partial x} = \frac{\delta^2 E_x(\vec{r})}{\delta x^2} = \frac{\delta^2 V(\vec{r})}{\delta x^2} \cong \frac{\Delta V^2}{\Delta x^2} = \frac{V_M - 2V_C + V_N}{\Delta x^2} = \Delta V_1 - \Delta V_2 \quad \text{Ecuación 1.14}$$

Y los elementos que debemos evaluar en esta ecuación son:

- $Z = 0$
- 3 electrodos
- Diferencias centrales

Por lo tanto, es posible definir la resistencia de las segundas diferencias cuando se divide entre la corriente I (López González, 2014):

$$\frac{\Delta V^2}{I} = \frac{\Delta V_1}{I_1} - \frac{\Delta V_2}{I_2} \rightarrow \boxed{R^2 = R_1 - R_2} \quad \text{Ecuación 1.15}$$

donde los subíndices 1 y 2 corresponden al arreglo electródico 1 y al arreglo electródico 2, respectivamente.

La ecuación anterior puede ser escrita sustituyendo sus factores geométricos:

$$R^2 = \rho_1 \frac{1}{k_1} - \rho_2 \frac{1}{k_2} \quad \text{Ecuación 1.16}$$

El medio es un semiespacio homogéneo e isótropo.	Resistividad de segundas diferencias	$\rho^2 = R^2 \frac{K_1 K_2}{K_2 - K_1}$	Semiespacio	<i>Ecuación 1.17</i>
El medio no es un semiespacio homogéneo e isótropo.	Resistividad aparente de segundas	$\rho_a^2 = R^2 \frac{K_1 K_2}{K_2 - K_1}$	Semiespacio	<i>Ecuación 1.18</i>

Cuadro 1.1 Diferencias entre las resistividades aparentes de SDP en un semiespacio homogéneo e isótropo y un medio que no lo es.

Factor Geométrico de Segundas Diferencias

$$K^2 = \frac{K_1 K_2}{K_2 - K_1} \quad \text{Ecuación 1.19}$$

Resistividad Aparente de las Segundas Diferencias de Potencial (SPD)

$$\rho_a^2 = R^2 K^2 \quad \text{Ecuación 1.20}$$

Cuadro 1.2 Ecuaciones para el cálculo del Factor Geométrico de SDP y para el cálculo de las SDP.

1.8 Filtro Savitzky-Golay

Debido a que los datos que se obtienen en un levantamiento geofísico, como el levantamiento con Sondeo Eléctrico Vertical realizado en este trabajo, contienen un ruido significativo, tanto el que pueda deberse al equipo como al que pudiera generarse durante la medición, es conveniente emplear un filtro, el cual sirve para la eliminación de ese ruido y, de ese modo, poder trabajar con los datos más limpios y que los resultados que se obtengan sean más cercanos a las características reales del medio estudiado.

Para este trabajo, se utilizó el Filtro Savitzky-Golay (Filtro SG), debido a que fue el que generó los valores más suavizados y sin mayores alteraciones, ya que previamente se probaron otros filtros, pero los datos que se obtenían no se ajustaban adecuadamente y se observaban señales ruidosas, lo que imposibilitaba su interpretación y su procesamiento posterior.

Este Filtro SG consiste en un filtro con respuesta al impulso (FIR) que busca suavizar los datos de una muestra, es decir, se intenta quitar el ruido de una señal sin modificar su comportamiento. Para esto, su función es actuar como un filtro pasa bajas que disminuye los picos de alta frecuencia y permite el paso del resto de la señal. Es muy frecuente encontrar, en todo tipo de trabajo experimental, algún tipo de ruido aleatorio, por lo que puede ser complicado saber cuánta información pertenece a la señal y cuánta es el error o ruido (Savitzky & Golay, 1964).

Para realizar el Filtro SG primero, se considera que los valores obtenidos en campo se encuentran ordenados en una tabla, en dos columnas, con datos en las ordenadas y en las abscisas, y estos datos deben ser discretos. Además, dado que el objetivo es poder obtener los enteros de convolución de ese conjunto de datos, siempre se debe considerar que nuestro conjunto de datos observados es equiespaciado (Savitzky & Golay, 1964).

Después, recordando que los mínimos cuadrados consisten en un conjunto de puntos que se pueden ajustar a una curva para hacer un suavizamiento y que, además, nos permiten estimar las soluciones para un problema inverso (Menke, 1989), vamos a emplearlos para tratar de encontrar un modelo de parámetros que permitan minimizar la longitud de los datos estimados (Menke, 1989). Es decir, en este método de filtrado con S-G se emplea el método de los mínimos cuadrados, puesto que se va a tratar de obtener los valores de los coeficientes “a” (Ecuación 1.21) para determinar el mejor valor para el punto central de un conjunto de datos.

Cuando cada punto es sustituido en las abscisas de la ecuación en la que se está realizando el ajuste, se va a calcular el cuadrado de la diferencia que hay entre dos valores, es decir, la diferencia entre los datos calculados y los datos observados y se espera que este valor cuadrado sea mínimo.

La siguiente ecuación es un ejemplo del polinomio de ajuste, donde “a” representa el valor de los coeficientes de los enteros de convolución, “y” es el valor calculado y “x” son los valores de las abscisas (Savitzky & Golay, 1964).

$$a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 = y \quad \text{Ecuación 1.21}$$

Por lo tanto, en este filtro se va a considerar que un conjunto de muestras de entrada $2M + 1$, donde M es la amplitud media del intervalo de aproximación, se encuentra centrado en $n = 0$ y, de acuerdo con el polinomio (Ecuación 1.22), se pueden obtener sus coeficientes (Schafer, 2011).

$$p(n) = \sum_{k=0}^N a_k n^k \quad \text{Ecuación 1.22}$$

La obtención de estos coeficientes permite minimizar el error de aproximación cuadrático medio (ϵ_N) para el grupo de muestras de entrada (input):

$$\epsilon_N = \sum_{n=-M}^M (p(n) - x[n])^2 \quad \text{Ecuación 1.23}$$

$$\epsilon_N = \sum_{n=-M}^M \left(\sum_{k=0}^N a_k n^k - x[n] \right)^2 \quad \text{Ecuación 1.24}$$

Los valores de salida (output) suavizados, se obtienen con la evaluación del polinomio $p(n)$ en el punto central $n = 0$ y esos datos de salida son igual al coeficiente cero del polinomio, es decir, $a_0 = y[0]$. En cada muestreo, se redefine el punto central del bloque de muestreo $2M + 1$ y se repite el ajuste del polinomio. Esto siempre va a generar tanto un nuevo polinomio como un nuevo valor para el output $y[0]$ (Schafer, 2011) y únicamente es necesario encontrar los coeficientes a_0 para determinar el mejor valor final en un solo punto (Savitzky & Golay, 1964).

Al realizar el procedimiento de los mínimos cuadrados, podemos obtener la primera derivada de un conjunto de enteros de convolución, lo cual genera una función de peso (Savitzky & Golay, 1964). Una función de peso busca hacer que los registros “pesados” sean una representación tan cercana a la población muestreada como sea posible. Los ajustes de peso buscan reducir el sesgo en el estudio que se está realizando (Kalton, 2003).

Schafer (2011), menciona que, en el artículo de (Savitzky & Golay, 1964), el valor de salida (output) suavizado que se obtiene al evaluar el polinomio de ajuste en cada una de las posiciones puede ser equivalente a realizar una combinación lineal de las muestras de entrada (input). Los valores de salida (output) pueden ser calculados si se emplea una Convolución Discreta, expresada como:

$$y[n] = \sum_{m=-M}^M h[m]x[n - m] \quad \text{Ecuación 1.25}$$

$$y[n] = \sum_{m=\substack{n+M \\ n-M}}^{n+M} h[n - m]x[m] \quad \text{Ecuación 1.26}$$

De este modo, se puede hacer un reemplazo del proceso de ajuste polinómico por una sola ecuación.

Si consideramos el uso de la media móvil como un método que suaviza los datos, en donde se considera un número de puntos fijos en un conjunto, se añaden sus valores pertenecientes a la ordenada y se divide entre el número de puntos considerados, de modo que se pueda obtener la ordenada promedio en la abscisa central del grupo de datos (Savitzky & Golay, 1964). Para este método de la media móvil se establece que cada entero de convolución C_i es igual a uno, $C_i = 1$, y se hace una convolución de los números en la ordenada, y , con un conjunto de enteros de Convolución y el resultado que se obtiene se divide entre el valor normalizador, es decir:

$$\frac{C_i Y_{i+j}}{\text{Valor normalizador}} \quad \text{Ecuación 1.27}$$

1.8.1 Filtro Savitzky-Golay en Python

El filtro SG usado para el desarrollo de este trabajo es el que se encuentra implementado en la biblioteca SciPy de Python, llamado *savgol_filter*, el cual se trata de una función para datos 1D, cuyos parámetros de entrada son:

```
scipy.signal.savgol_filter (x, window_length, polyorder, deriv = 0, delta = 1.0, axis = -1,
                             mode = 'interp', cval = 0.0)
```

Parámetros	Función
x	Corresponde al arreglo de los datos que van a ser filtrados
window_length (int)	Longitud de la ventana del filtro, es decir, el número de coeficientes. Si el modo es 'interp', la window_length debe ser menor o igual al tamaño de x.
polyorder (int)	Es el orden del polinomio que se va a usar para ajustar las muestras y su tamaño debe ser menor a window_length
deriv (int, opcional)	Es el orden de la derivada, no debe ser un entero negativo y, por defecto, su valor es 0, lo que indica que los datos se filtran sin derivar.
delta (float, opcional)	Es el espaciamiento de las muestras y sólo aplica cuando deriv > 0. Por defecto, su valor es 1.0.
axis (int, opcional)	Es el eje del arreglo x sobre el cual se aplica el filtro y, por defecto, su valor es -1.
Mode (str, opcional)	Determina el tipo de extensión que se va a usar para rellenar la señal en los valores extremos. Las opciones son: 'mirror' : repite los valores en los extremos y no incluye al valor más cercano al borde. 'constant' : su valor de relleno va a estar dado por cval 'nearest' : contiene al valor de entrada más cercano. 'wrap' : contiene los valores del otro extremo de la matriz. 'interp' : es el seleccionado por defecto y no usa extensión. En su lugar, se ajusta un polinomio de grado 'polyorder' en los últimos valores de 'window_length' de los extremos y ese polinomio se usa para evaluar la última 'window_length'.
cval (escalar, opcional)	Es el valor de relleno para los extremos de los valores de entrada si el modo es 'constant' y el valor, por defecto, es 0.0.
Valor que regresan y (ndarray)	Es del mismo tamaño que 'x' y son los valores filtrados

Cuadro 1.3 Parámetros y sus respectivas funciones para el Filtro Savitzky-Golay empleado en Python.

1.9 Software para Inversión ZONDIP para 1D

ZONDIP1 1D es un software que se emplea para la interpretación de datos de resistividad aparente obtenidos en 1D (una dimensión), mediante Sondeo Eléctrico Vertical y puede ser utilizado en una computadora con el Sistema Operativo Windows desde la versión XP en adelante (ZONDIP 1D Software, 2024).

Este ZONDIP 1D software (2024) puede solucionar tanto problemas directos como inversos. Cuando trata de solucionar los problemas directos lo que hace es calcular el potencial de fuente puntual con la ecuación:

$$U(R) = \frac{\rho}{\pi} \left[\frac{1}{r} + \int_0^{\infty} R(m) \cdot J_0(mr) dm \right] \quad \text{Ecuación 1.28}$$

Donde:

U es el Potencial de la fuente puntual

r es la distancia entre la carga y el punto donde se mide el potencial

R es el kernel y J_0 la función de Bessel de orden cero

Para usar el programa se debe comenzar creando un archivo con los datos observados de resistividad aparente y con el tipo de arreglo que se empleó en el levantamiento. También, es posible ingresar los datos manualmente cuando el programa está en ejecución, mediante la ventana File/VES Notepad, que se encuentra en el menú principal. Aquí, se selecciona el tipo de arreglo que se va a emplear para hacer la interpretación de los datos (ZONDIP 1D Software, 2024).

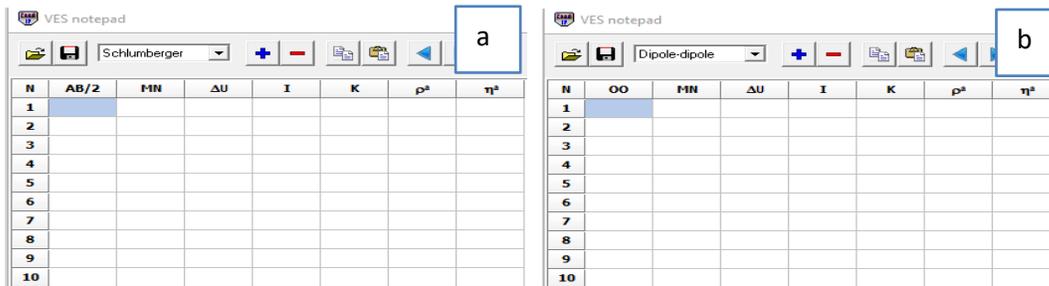


Figura 1.1 Ventana de VES Notepad. Se muestra cómo ingresar manualmente los datos que se van a analizar con el software ZONDIP 1D para los arreglos Schlumberger (a) y Dipolo Dipolo (b).

Después, se ingresan las distancias entre los electrodos, según el tipo de arreglo indicado, ya que para el arreglo Schlumberger se requieren los datos de AB/2 y MN, mientras que para el arreglo Dipolo Dipolo se solicitan los datos de ∞ (distancia entre los centros de los electrodos de corriente y de potencial) y MN (Figura 1.1).

En esta ventana también se ingresan los datos de Diferencia de Potencial ΔU , Intensidad de Corriente I , el Factor Geométrico K y los valores de Resistividad Aparente ρ^a .

Una vez que se han ingresado esos valores se procede a la interpretación de los datos para el modelo directo y lo que genera el software es la curva de resistividades aparentes, la curva correspondiente a la inversión de los datos y los cortes geoelectrónicos de los mismos.

El programa usa un algoritmo que aplica un filtrado lineal para obtener el análisis del problema directo, mientras que, para el problema inverso, emplea el método de Newton (ZONDIP 1D Software, 2024).

El método de Newton es un procedimiento que fue descrito por Sir Isaac Newton y se basa en las series de Taylor para tratar de encontrar las raíces o ceros de una función real. Además, resulta ser un procedimiento muy útil ya que tiene una convergencia bastante rápida (Vargas Cantero, 2018)

Capítulo 2. Área de Estudio

Para este trabajo se realizaron los trabajos de campo en espacios pertenecientes al campus de Ciudad Universitaria, siendo estos el jardín de la Escuela Nacional de Lenguas, Lingüística y Traducción (ENALLT) y la Cantera Oriente A3. Ambos sitios comparten un origen geológico, por lo cual, el jardín de la ENALLT pudo servir como área de prueba antes de realizar los levantamientos de datos en la Cantera Oriente A3. A continuación, se desarrollan tanto la localización como las características geológicas de cada lugar.

2.1 Localización del Área de Estudio Jardín de la Escuela de Lenguas, Lingüística y Traducción (ENALLT)

La Escuela Nacional de Lenguas, Lingüística y Traducción (ENALLT) pertenece al campus central de Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México, en el sur de la Ciudad de México. El objetivo de realizar las primeras pruebas en esta área fue localizar una tubería que se encuentra enterrada en el jardín y, dado que su localización también pertenece al Pedregal de San Ángel, su evolución y características geológicas son las mismas que las de la Cantera Oriente A3, las cuales, se van a desarrollar más ampliamente en el siguiente apartado 2.3 Revisión de la Geología del Área de estudio.

A continuación, en la Figura 2.1 se muestra la localización de la ENALLT, dentro del Campus de Ciudad Universitaria.

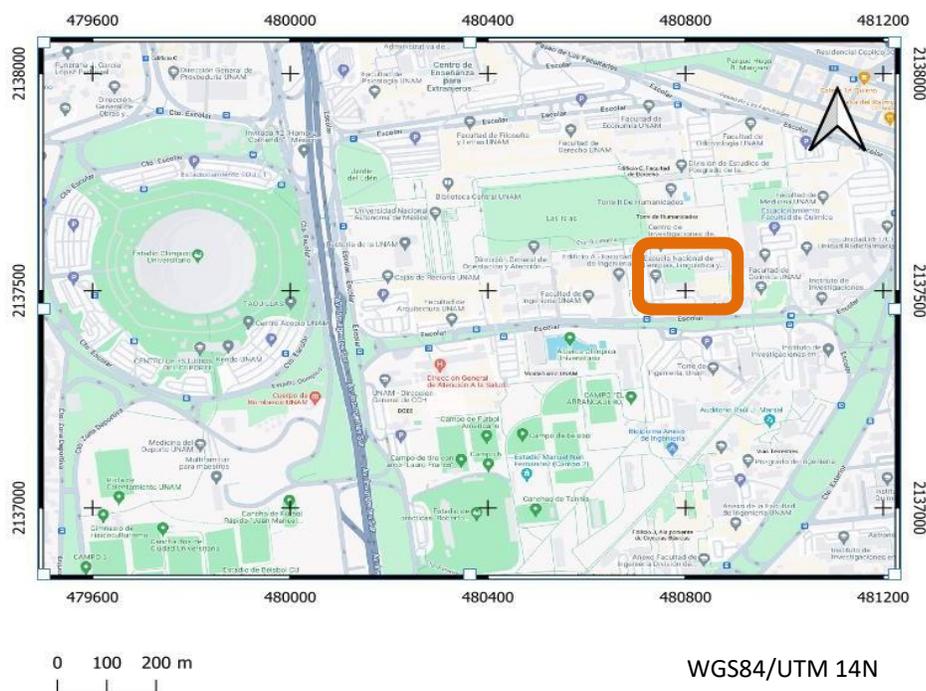


Figura 2.1 Localización de ENALLT. La Escuela Nacional de Lenguas, Lingüística y Traducción se enmarca con el rectángulo rojo, ya que fue la zona del levantamiento de prueba para localizar la tubería, en Ciudad Universitaria (Tovar Jara, 2024).

2.2 Cantera Oriente A3 de la Reserva del Pedregal de San Ángel (REPSA)

La Cantera Oriente se ubica en el Pedregal, al sur de la Ciudad de México. Su origen se debe a derrames de lavas del volcán Xitle, en la Sierra de Chichinautzin, ocurridas alrededor del año 280 de nuestra era, es decir, hace unos 1670 años. El Pedregal de San Ángel, constituido por roca volcánica, cuenta con una extensión de 80 km^2 y se localiza al suroeste de la Cuenca de México (Pérez-Escobedo, 2013). Además, se tienen registros de que las lavas de la erupción corrieron desde las faldas del Ajusco hasta la Avenida Miguel Ángel de Quevedo, en la Alcaldía Coyoacán (Pérez-Escobedo, 2013).

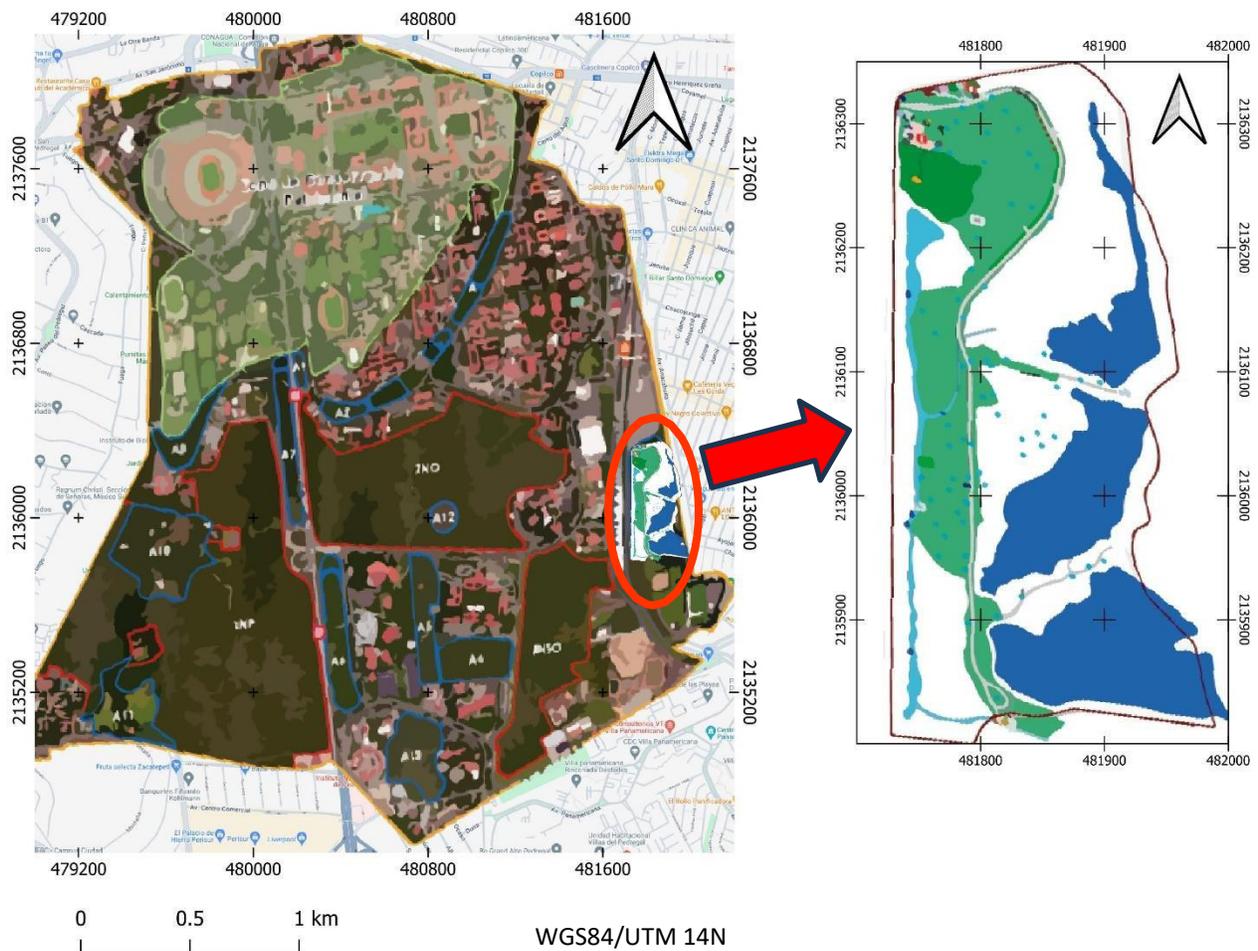


Figura 2.2 Reserva del Pedregal en Ciudad Universitaria y Cantera Oriente A3. A la izquierda se muestra la extensión completa de la Reserva del Pedregal y a la derecha la Cantera Oriente A3. El círculo rojo indica la ubicación de la Cantera dentro de la Reserva del Pedregal. Modificada de Pérez-Escobedo (2013).

Respecto a la Cantera Oriente, ésta pertenece a la Reserva Ecológica del Pedregal (REPSA), específicamente a la Zona de Amortiguamiento A3 y cuenta con una superficie de 7.48 ha. Una Zona de amortiguamiento es un área cuyo fin es ser una reserva ecológica para la protección ambiental y reducción del efecto antropogénico (Lot, 2007). Esta Cantera se encuentra fuera del campus universitario, únicamente separada por la avenida Delfín Madrigal, y fue en el año de 1996 que se le consideró como “zona de recuperación ecológica” y sólo hasta el 2 de junio de 2005, por acuerdo del Rector de la UNAM y por sus características y ambientes acuáticos, fue considerada como parte de la REPSA (Lot, 2007).

Desde el año de 1970 hasta 1994 la Universidad cedió una concesión con la que se mantuvo la extracción de basalto como recurso para la pavimentación de vialidades de la Ciudad de México, con un volumen total aproximado de cinco millones y medio de metros cúbicos de material extraído durante esos 25 años y fue hasta que la Cantera Oriente fuera integrada a la REPSA que se puso en marcha el Plan Maestro de la Cantera Oriente, el cual, buscaba habilitar a la Cantera con especies de árboles, plantas y fauna para su restauración y para la conservación de la biodiversidad ya que, debido a la gran extracción de material, fue un sitio muy afectado, además haber sido convertido en el destino de los escombros generados durante el terremoto que azotó a la Ciudad de México en 1985. Es así como se convirtió, no sólo en una zona de recuperación ecológica, sino en un espacio destinado a la investigación (Lot, 2007).



Figura 2.3 Cantera Oriente A3. Imagen a: pared de basalto que rodea a la Cantera Oriente. Imagen b: Camino que dirige hacia la parte sur de la Cantera Oriente (cancha del equipo Pumas) (Tovar Jara, 2024).

Dentro de las características ecológicas del sitio se encuentran cuerpos de agua rodeados por una gran pared de basalto de aproximadamente 40 m de altura y con la presencia de diversas especies como son las algas, protozoos, libélulas, anfibios, reptiles, aves entre otros (Lot, 2007).

De acuerdo con Lot (2007), la estructura que se destinó para la restauración de la Cantera cuenta con cuatro unidades ambientales en función de la humedad relativa de cada una y éstas son:

1. Los cuerpos de agua y sus lechos de inundación
2. Ambientes de jardinería
3. Arboledas y arbustos
4. Infraestructura del predio

Su paisaje lacustre y de humedales cuenta con cinco cuerpos de agua, siendo un 14.36% del área total de la reserva y las ciénagas que los rodean representan el 23.21%. Además, en la zona sur de la Cantera se encuentran áreas con facilidad de inundaciones, sobre todo en temporada de lluvias, las cuales ocupan área del 4.85% (Lot, 2007). Estos cuerpos lacustres representan la mayor área debido a que tanto la flora como la fauna de la zona tienen una mayor relación e interacción con este tipo de ambientes.

2.3 Revisión de la Geología del Área de Estudio Cantera Oriente A3 REPSA del Jardín de la Escuela de Lenguas, Lingüística y Traducción (ENALLT)

Tanto la Cantera Oriente REPSA como la ENALLT se ubican en El Pedregal, el cual, de acuerdo con Siebe (2009), se creó a partir de la erupción del volcán Xitle. Este volcán también aportó escorias como tezontle y cenizas arenosas que fueron depositadas en las cercanías de las faldas del Ajusco. Durante la fase inicial de la erupción, se derramaron magmas basálticos ricos en gases, siendo su modo eruptivo moderadamente explosivo. Esto llevó a la fragmentación del magma y el esparcimiento de cenizas en una columna eruptiva, en donde los fragmentos más grandes cayeron cercanos al conducto del volcán, mientras que las partículas más finas fueron depositadas a grandes distancias por acción del viento.

De esa manera, la estructura que comenzó a formarse de manera inicial fue el cono del volcán Xitle. Posteriormente, las lavas empezaron a contener menor cantidad de gases y las erupciones fueron menos explosivas, por lo cual, empezaron a ocurrir emplazamientos de lavas, las cuales fueron colocándose de manera interdigitada y sobrepuestas entre sí (Siebe, 2009).

El volcán Xitle se localiza dentro de la Sierra Chichinautzin y, es el volcán Chichinautzin el que da nombre a la Sierra, lo que en náhuatl significa “Señor que quema” (Siebe, 2009).

Esta Sierra separa a los Valles de Cuernavaca y Cuautla del Valle de México y pertenece al Campo Volcánico Sierra de Chichinautzin (CVSC). Este Campo volcánico pertenece a la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico, la cual atraviesa toda la parte central de México, desde Veracruz hasta Nayarit, además de sufrir los efectos de la subducción de las placas de Cocos y de Rivera con la Placa Norteamericana (DGAPA:PAPIIT:IN107409).

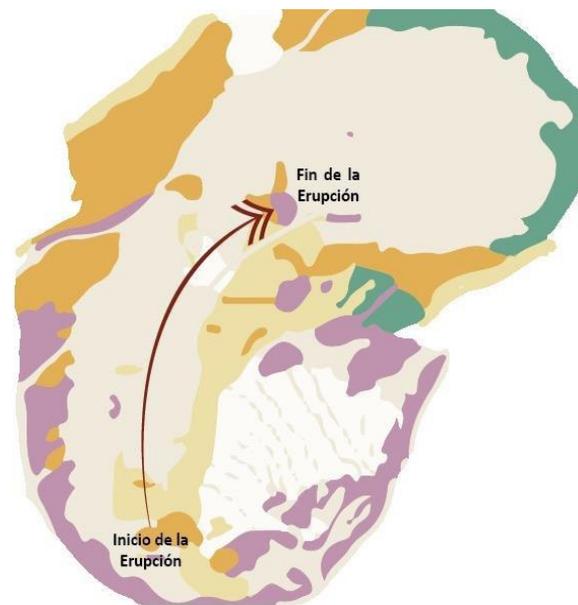


Figura 2.4 Derrame de lavas del Xitle. Tipos de lavas que expelieron el Xitle y los conos adyacentes. La flecha roja indica la dirección en que fluyeron las lavas. Tomado de Carrillo-Trueba (1995) y Pérez-Escobedo (2013).

La base de rocas del CVSC está formada por tobas andesíticas y lahares, también conocida como Serie Basáltica Chichinautzin y sus edades se encuentran datadas desde el Mioceno hasta el Holoceno (actualidad), lo que representa que las rocas son muy jóvenes.

La siguiente tabla muestra las litologías y sus claves, con las que pueden identificarse en la Carta Geológico Minera Ciudad de México E14-2 (Figura 2.5):

Claves Cartográficas	Litología
Qhoal	Aluvión
QhoA-B3	Andesita-Basalto
QpthoB-A	Basalto-Andesita
TpILh-TA2	Lahar-Toba Andesítica
TmA-Da	Andesita-Dacita

Cuadro 2.1 Claves Cartográficas y Litología.

Tomadas de la Carta Geológico Minera Ciudad de México E14-2 segmento de la Sierra de Chichinautzin Figura 2.4.

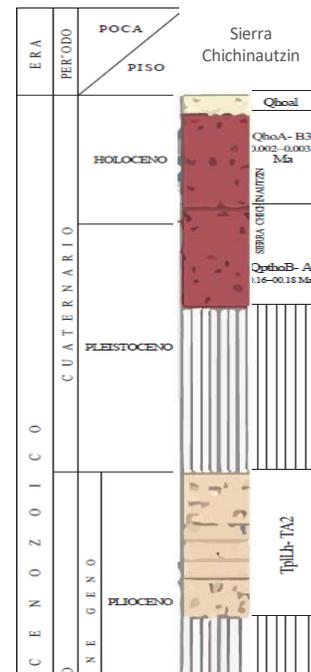


Figura 2.5 Columna Estratigráfica de la Sierra Chichinautzin. Muestra las estratigrfías desde el Plioceno hasta el Holoceno. Modificada de la Carta Geológico Minera Ciudad de México E14-2.

El CVSC está conformado por más de 200 volcanes monogenéticos, es decir, volcanes formados en una sola erupción, dentro de los cuales se encuentra el Xitle, cuya actividad volcánica ha contribuido a la formación del suelo basáltico del Pedregal (Siebe, 2009). Al ser parte del Eje Volcánico Transmexicano se considera una zona con actividad volcánica potencial, por lo que no se descartan futuras erupciones ni la formación de nuevas estructuras volcánicas.

Pérez-Escobedo (2013) menciona que la erupción del volcán Xitle se considera dividida en dos fases:

- i. Erupción explosiva tipo estromboliano, la cual creó el cono de escorias.
- ii. Erupción efusiva tipo islándico, con lavas fluidas

A continuación, se enlistan las unidades litoestratigráficas de la Sierra Chichinautzin y del Pozo Copilco de Vázquez-Sánchez, E. & Jaimes, Ricardo (1989), las cuales son las más significativas para el área de estudio de este trabajo.

<i>Unidades Litoestratigráficas de la Sierra Chichinautzin</i>
[Qla] Depósitos lacustres y aluviales: materiales poco consolidados tamaño grava, arena, limo y arcilla.
[Qc] Formación Chichinautzin: es una secuencia de derrames de lava que contienen tefra y materiales piroclásticos. Su composición es Andesítica-Basáltica.
[Tmv] Rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío: consiste en rocas volcánicas como tobas, brechas, domos y derrames de lavas. Su composición es andesítica-dacítica.
[Tpc] Formación las cruces: son sucesiones de rocas volcánicas de caída, pómez y cenizas, intercaladas con lavas, lahares y aluvión. Su composición es andesítica-dacítica
[Tpv] Rocas volcánicas del Plioceno Temprano: son rocas volcánicas como tobas, brechas, domos y derrames de lavas. Su composición es andesítica-dacítica.
[Tomv] Rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano: se encuentran sucesiones de brechas, tobas y aglomerados junto con derrames de lava. Su composición es andesítica-dacítica.
[Kc] Formación Cautla: consiste en calizas fosilíferas e intercalaciones de lutitas y limolitas.
[Km] Formación Morelos: está conformada por calizas y dolomías que sobreyacen a anhidritas laminares.
[Teob] Grupo Balsas: se trata de un conglomerado de calizas, limos, arcillas, arenas y yesos con intercalaciones de lavas y piroclastos con composición basáltica.

Cuadro 2.2 Unidades Litoestratigráficas e la Sierra Chichinautzin. Vazquez-Sanchez, E. & Jaimes, Ricardo. (1989)

Además de las litologías previamente mencionadas, se contó con la referencia del trabajado de Litología y Estratigrafía correspondientes del Pozo 266 Metro CU del Proyecto Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Distrito Federal, Clave 121128. Con este, se delimitó aún más tanto las litologías del área de estudio como las profundidades de éstas, ya que era mayor su cercanía a la Cantera Oriente A3 de la REPSA, además de que facilitó conocer a detalle los materiales más someros y que podían ser detectados con los métodos eléctricos utilizados en este trabajo. A continuación, se muestra una tabla con esta información.

Litología del Pozo	Profundidad [m]	Estratigrafía del Pozo	Profundidad [m]
Basalto y escoria	0 - 18		
Arcilla	18 - 36	Depósitos lacustres y aluviales [Qla]	0 – 18
Arena y grava	36 - 51		
Arena	51 - 68		
Nivel Freático	68		
Grava	68 - 85	Unidad Volcánica Superior [UVS]	18 – 200.18
Arena	85 - 126		
Grava	126 - 148		
Arcilla y arena	148 - 154		
Arena y grava	154 - 190		
Arena	190 - 200.18		

Cuadro 2.3 Litología y Estratigrafía correspondientes al Pozo 266 Metro CU. Tomado del Proyecto Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Distrito Federal, Clave 121128.

2.3 Acuífero de la CDMX

La Cantera Oriente A3 se ubica sobre un territorio en el que subyace parte del acuífero de la Ciudad de México. Este acuífero, llamado “Zona Metropolitana de la Ciudad de México”, se localiza en la Cuenca del Valle de México, la cual, a su vez, se localiza dentro del eje Neovolcánico. A continuación, se describen sus características.

2.3.1 Geología y Fisiografía

De acuerdo con CONAGUA (2023), el Acuífero de la CDMX se ubica al Este de la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, específicamente en la Subprovincia Fisiográfica Lagos y Volcanes de Anáhuac. Las edades de las rocas de las cadenas montañosas varían desde el Cenozoico hasta la actualidad y su composición puede ser desde basáltica a riolítica y son producto los eventos de erupciones volcánicas y de piroclastos.

El Valle de México es una cuenca endorreica, pero antiguamente su drenaje era hacia el sur, aunque esto fue interrumpido por los eventos volcánicos que originaron la Sierra Chichinautzin, hace aproximadamente 600,000 años, la cual rodea a la Cuenca justo en su parte sur (CONAGUA, 2023).

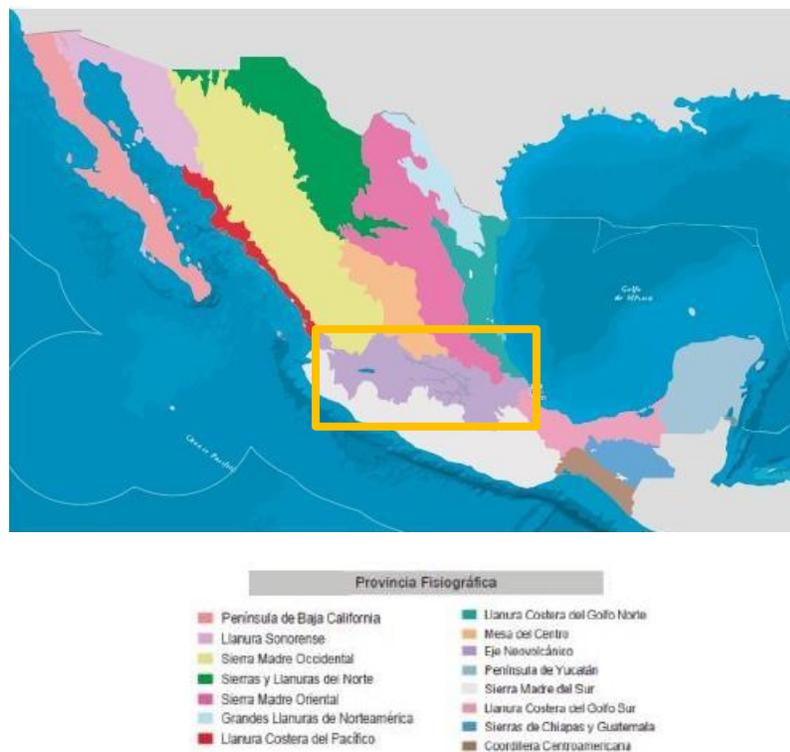


Figura 2.6 Provincias Fisiográficas de México. El rectángulo amarillo indica la localización del Eje Neovolcánico. Modificada de INEGI (2024).

2.3.2 Hidrografía

Además, CONAGUA (2023) menciona que el acuífero “Zona Metropolitana de la Ciudad de México” corresponde a la Región Hidrológica N° 26, Alto Pánuco, con Subregiones Hidrológicas I, II, III y parcialmente la VII. La cuenca a la que pertenece este acuífero es la Cuenca del Valle de México. Este acuífero abarca a las siguientes zonas hidrológicas, siendo la zona I Xochimilco, la que corresponde al área de estudio:

I Xochimilco: abarca las cuencas de los ríos que descienden de la Sierra de Chichinautzin. Sus formaciones basálticas tienen gran permeabilidad. Sus principales ríos son San Gregorio, Santiago, San Lucas y San Buenaventura.

II Churubusco: está formada por las cuencas de los ríos Eslava, Magdalena, Barrancas San Jerónimo, Anzaldo, Barranca Coyotes, Barranca Texcalatlaco, Barranca Tetelpa, Barranca de Guadalupe, Barranca del Muerto, Tarango y Mixcoac.

III Ciudad de México: comprende las cuencas de los ríos Becerra, Tacubaya, Tecamachalco, San Joaquín, Tornillo, Hondo, Sordo, Barranca los Cuartos, Totolica, Chico de los Remedios, San Mateo Nopala, Barranca Tepaxtlaxco, Río de los Remedios, Tlalnepantla y San Javier

VII Texcoco, pero ésta es sólo parcialmente. La infraestructura hidráulica está conformada por presas, ríos que se localizan principalmente en la zona poniente y canales entubados que se localizan en la parte central de la ciudad.

2.3.3 Tipo de acuífero

CONAGUA (2023) lo describe como un acuífero semiconfinado debido a la presencia irregular de arcillas que actúan como confinantes o semiconfinantes. Además, un acuitardo arcilloso con un espesor de alrededor de 50 m separa la superficie de la ciudad del acuífero. También, las rocas volcánicas y calizas forman un contenedor impermeable, mientras que el paquete de sedimentos origina un sistema acuífero complejo, que se estructura con tres grandes cuerpos:

1. Un paquete arcilloso de alta porosidad en su parte superior, además de tener baja permeabilidad y ser muy heterogéneo. Esto forma un acuitardo semiconfinante con espesor variable.
2. Un acuífero que actualmente está siendo explotado. Se encuentra debajo del acuitardo anterior y su composición es de materiales granulares gruesos, ya que consisten en piroclastos y conglomerados volcánicos. Su espesor varía alrededor de los 200 m.
3. Rocas volcánicas fracturadas. Se encuentran debajo del acuífero y su base se encuentra a partir de los 2000 m.

Hay una interrelación entre la primera capa de materiales arcillosos con la segunda capa de materiales granulares, ya que su efecto se ve en la subsidencia de la Ciudad de México.

La recarga del acuífero ocurre mediante infiltraciones de las precipitaciones, que van de 400 a 600 mm en la parte baja de la cuenca, de 700 a 1000 mm en los lomeríos y mayores a 1000 mm en las sierras, siendo éstas sus áreas de recarga más importantes.

La extracción del agua es de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ y se realiza mediante pozos que alcanzan profundidades de 100 m y el agua que se extrae cubre el 70% del abastecimiento de la ciudad.

2.3.4 Profundidad del Nivel Estático

Se observa que en la mayor profundidad está en la zona de recarga de la Sierra de Las Cruces, con valores desde 70 a 170 m. Después se encuentra la zona centro de la Ciudad de México, donde las profundidades están entre 60 y 65 m. Finalmente, hacia la porción sur de la Sierra de Guadalupe las profundidades son menores, yendo desde 20m hasta 40 m.

2.3.5 Nivel Freático del Área de Estudio

De acuerdo con el corte litológico CONACyT-ICyTDF (2012) el nivel estático se encuentra a aproximadamente 68 [m] de profundidad.

Respecto al comportamiento del agua en los lagos y áreas superficiales de la Cateria Oriente A3, se sabe que en los meses de agosto y septiembre se presentan inundaciones, mientras que en los meses de marzo y abril se presenta cierta sequía.

2.5 Humedad y Lluvias en el sur de la CDMX

El reporte de Curiel Rojo, A. (1993), el cual se encuentra en el sitio web de la REPSA de Ciudad Universitaria cuenta con los siguientes datos presentados en la Figura 2.7 y en las tablas en el Capítulo 7 Anexos. Para el sur de la Ciudad de México se tienen mediciones de menor humedad y mayor evaporación en los meses correspondientes a la primavera, específicamente en marzo, mientras que en los meses de verano se observa mayor humedad y menor evaporación, especialmente en el mes de julio y, aunque disminuye en los meses subsiguientes de otoño e invierno, no decae tanto como lo hace en la primavera.

Es por estos datos que, en este trabajo, se espera encontrar un nivel freático menor en el mes de marzo y uno mayor en el mes de diciembre, consideran a estos meses debido a que fueron los meses en los que se hicieron los levantamientos. Esta situación se debe a que el agua se va infiltrando a partir de los meses lluviosos y disminuye su infiltración durante los meses de mayor evapotranspiración.

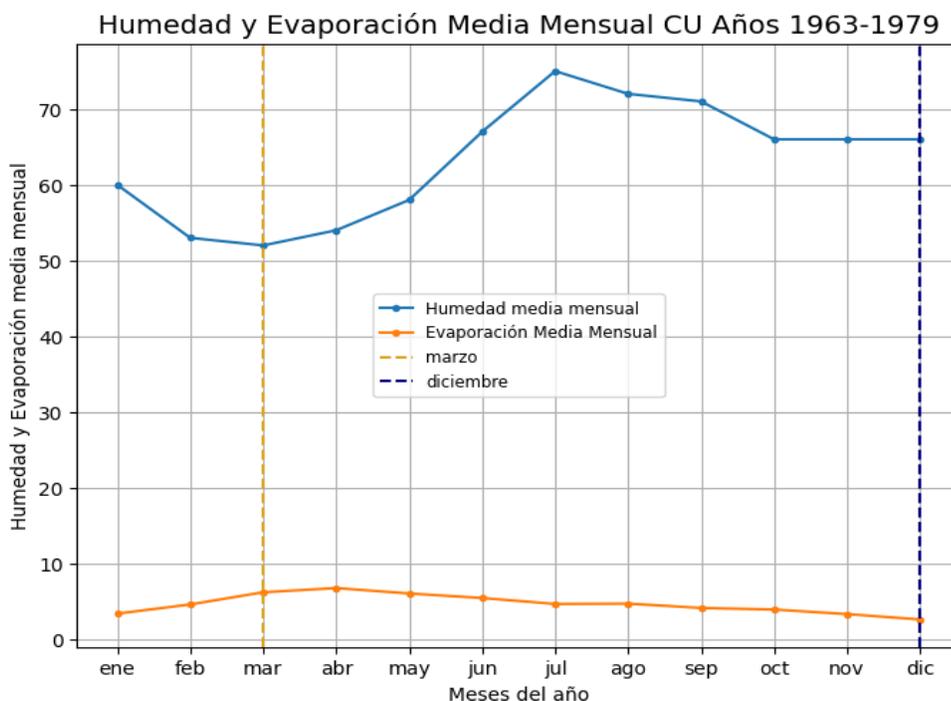


Figura 2.7 Humedad Relativa y Evaporación Media Mensual en CU. Se muestran los registros comprendidos entre los años 1963 a 1979. Modificada de Curiel Rojo, (1993).

2.6 Resistividades aparentes de los materiales del subsuelo

Para el análisis de los valores de resistividad de los materiales del Pozo 266 Metro CU (CONACyt-ICyTDF, 2012) mostrados en el cuadro 3.1, se consideraron los siguientes valores teóricos, obtenidos de la tabla de litologías y resistividades del suelo (Zandz, 2024) y se muestran las litologías que componen al Pozo 266 Metro CU junto con sus valores de resistividad teórica.

Litología	Resistividad
Basalto	2000
Agua subterránea	20-60
Arcilla	300
Arcilla húmeda	20
Grava y arcilla	300
Arena seca	1500-4200
Arena húmeda	130-400

Cuadro 2.4 Litología y Valores de resistividad. Tomado de Zandz. (2024). Soil Resistivity.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Instrumentación Geofísica

Los materiales y equipos empleados para todos los levantamientos de campo de este trabajo consistieron en:

1. Resistivímetro
2. Electrodo de cobre
3. Carretes con cables para cada electrodo, tanto de potencial como de corriente.
4. Libretas de campo
5. Formatos con los arreglos elegidos para realizar el levantamiento.
6. Cintas métricas
7. Martillos y marros
8. GPS
9. Equipo de nivelación topográfica



Figura 3.1 Instrumentación y equipo de campo. Carretes de cable y electrodos empleados para el levantamiento de los SEV en el Jardín de la ENALLT (Tovar Jara, 2024).

3.2 Adquisición de datos de campo

3.2.1 Trabajo de campo en el Jardín de la Escuela Nacional de Lenguas, Lingüística y Traducción (ENALLT)

En este sitio se realizaron dos levantamientos con métodos eléctricos usando los arreglos Schlumberger y Dipolo Dipolo con el objetivo de localizar la profundidad de una tubería que se encuentra enterrada en el jardín de la ENALLT. El diámetro estimado de esta estructura fue de 15 cm y a una profundidad de 50 cm.

Además, cabe mencionar que el levantamiento se realizó el día 24 de octubre de 2023, en otoño. A continuación, se describe la metodología empleada en cada uno de los arreglos.

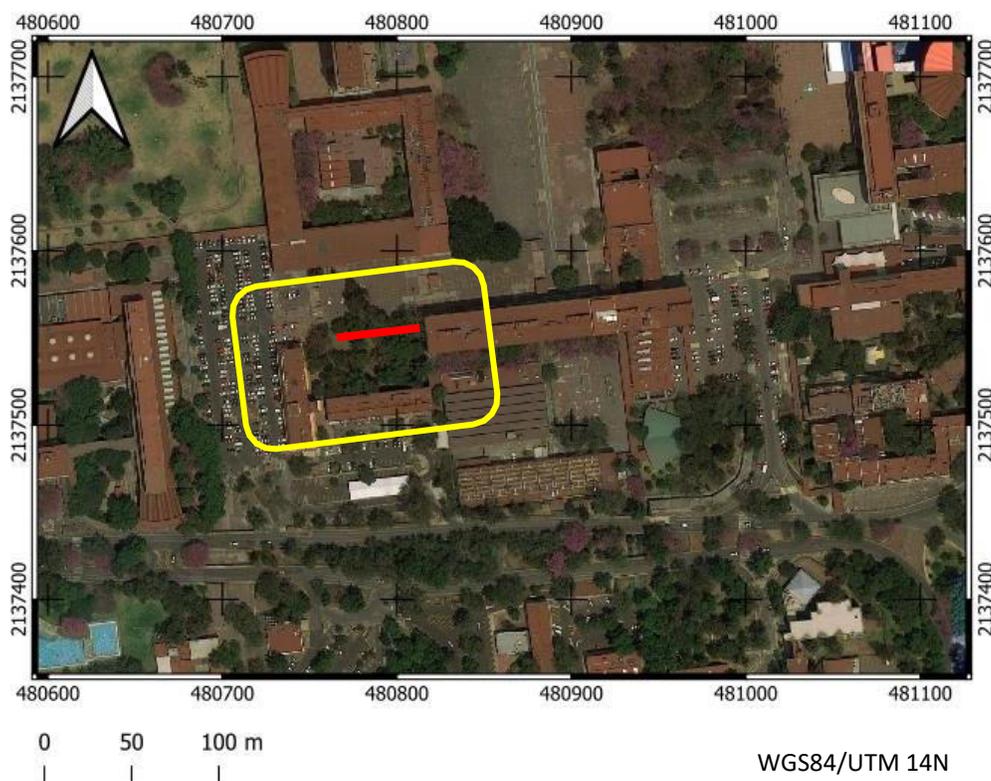


Figura 3.2 Localización del Jardín de la ENALLT. En el rectángulo amarillo se indica la ubicación de la ENALLT, en Ciudad Universitaria, para el levantamiento de prueba para localizar la tubería. La línea roja indica la localización del levantamiento en el área de estudio (Tovar Jara, 2024).

3.2.2.1 Arreglo Schlumberger

Este arreglo contó con 10 mediciones para la Fuente BAMN y 10 para la Fuente BANM y se hizo con una orientación Este-Oeste, siendo el electrodo B el que quedó orientado hacia el Este y el electrodo A se colocó hacia el Oeste (Figura 3.3). Además, los electrodos empleados fueron de cobre y se usaron cuatro carretes de cable, equivalente al número de electrodos empleados, es decir, dos para los electrodos de corriente y dos para los electrodos de potencial. En total, el arreglo tuvo una longitud de 11 m.

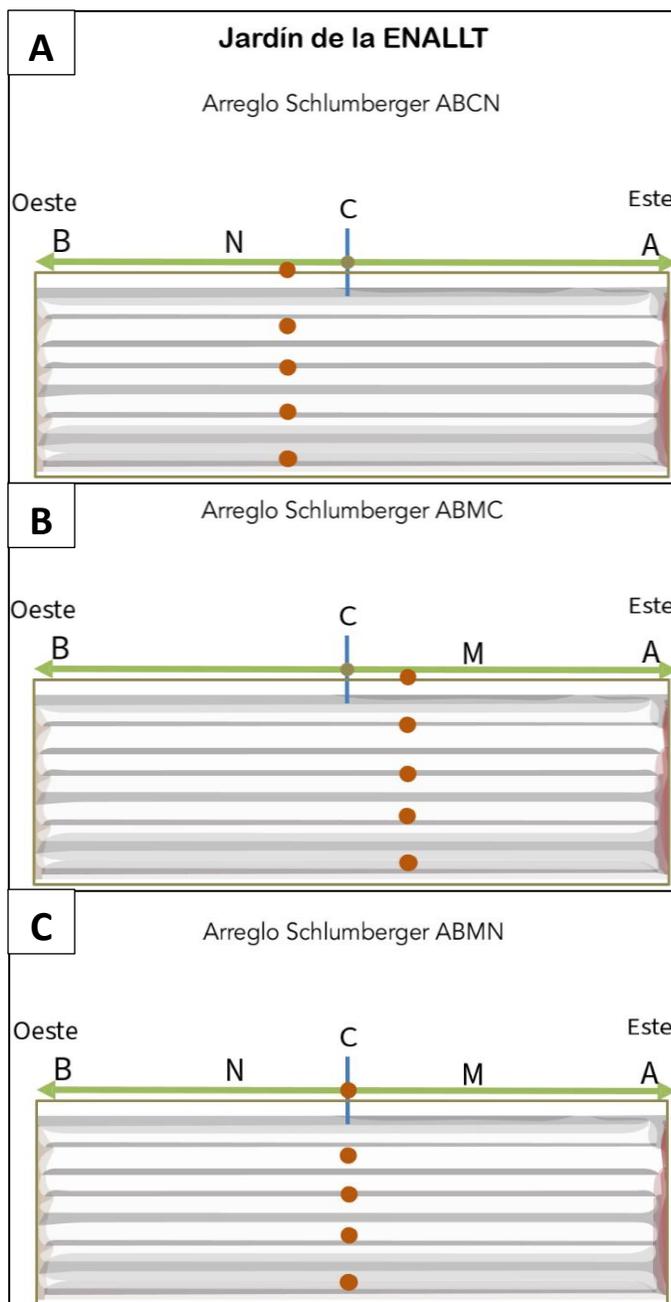


Figura 3.3 Arreglo Schlumberger en el Sitio de Pruebas en el Jardín la ENALLT. Los círculos representan los puntos de atribución del arreglo. En el caso de la Figura A se observa que éstos se localizan entre los electrodos N y C, mientras que, en la Figura B, se localizan ente C y M. Finalmente, la Figura C indica la posición de los puntos de atribución para las Segundas Diferencias de Potencial. (Tovar Jara, 2024).

En la Figura 3.3 se observa que entre los electrodos M y N se ubica un electrodo C. Éste representa el centro del sondeo y su posición es cero. Para obtener dos fuentes o canales, lo que se hizo fue que en cada Canal el electrodo C se intercambiaba con M (Canal2) o N (Canal 1), según correspondiera. En el Cuadro 7.1, ubicado en el Capítulo 7 Anexos, se muestran las tablas con las posiciones de cada electrodo para este levantamiento.

3.2.2.2 Arreglo Dipolo Dipolo

Para este arreglo Dipolo Dipolo se consideró un arreglo de electrodos BAMC y BACN. Es decir, en cada medición se consideró a los electrodos M y N como un electrodo C y esto se intercambiaba en cada medición. De esa manera se obtuvieron 15 mediciones de resistividades aparentes para el arreglo BAMC y 15 mediciones el arreglo BACN. La longitud de este arreglo fue de 8.50 m para el arreglo BAMC y de 9 m para el arreglo BACN. Se puede observar este arreglo en la Figura 3.4.

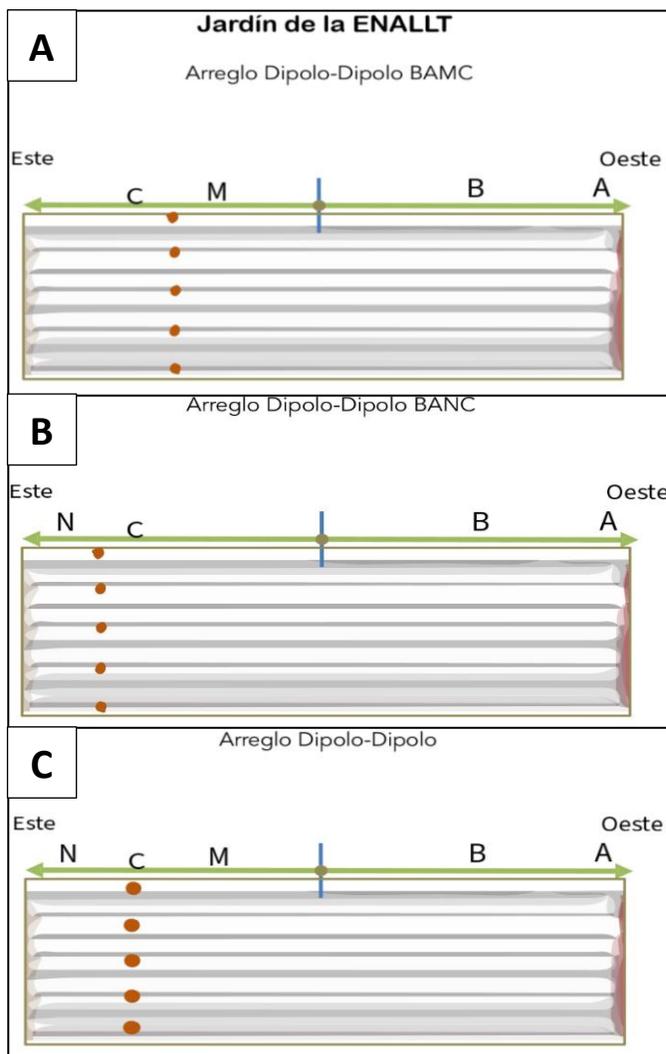


Figura 3.4 Orientación del Arreglo Dipolo Dipolo en el Jardín de la ENALLT. Los puntos color naranja representan los puntos de atribución del arreglo. En el caso de la Figura A, los puntos de atribución se localizan entre los electrodos C y M, mientras que, en la Figura B, éstos se encuentran entre N y C. Finalmente, la Figura C indica las posiciones de los puntos de atribución para las Segundas Diferencias de Potencial (Tovar Jara, 2024).

3.2.2 Trabajo de campo en REPSA

En esta zona se realizaron dos levantamientos de datos para Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y en dos sesiones diferentes. Para el primer levantamiento de SEV se emplearon tanto un arreglo Schlumberger como un arreglo Dipolo, mientras que para el Segundo Levantamiento sólo se realizó el arreglo Dipolo-Dipolo. A continuación, se describen las características de cada arreglo y se muestra su localización y orientación en la Figura 3.5.

En la Figura 3.5 se muestra una línea amarilla, la cual, corresponde a los puntos tomados con el receptor de GPS en la zona del levantamiento, pero se resumieron en una línea para indicar el área del levantamiento.

Además, es preciso mencionar que el primer levantamiento realizado en la Cantera Oriente, con los arreglos Schlumberger y Dipolo Dipolo, fue en los días 21 y 22 de marzo de 2023.

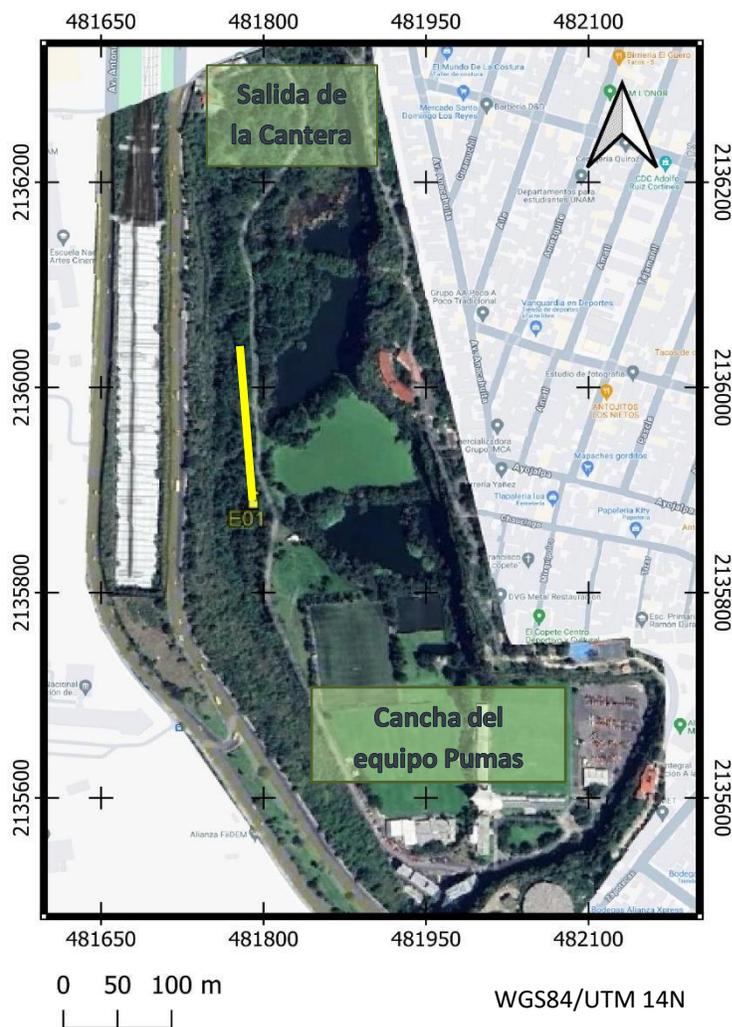


Figura 3.5 Localización de la Cantera Oriente A3. La línea amarilla muestra la zona del levantamiento de datos para todos los SEV de este trabajo (Tovar Jara, 2024).

3.2.2.1 Primer Levantamiento. Arreglo Schlumberger

En este levantamiento se hicieron 16 mediciones tanto para el arreglo ABMN y como para el arreglo BANM para un levantamiento de 250 m de longitud. Las posiciones de cada electrodo y sus respectivas mediciones se muestran en el Capítulo 7 Anexos, en los Cuadros 7.6 y 7.7.

En este levantamiento se mantuvieron las mismas distancias entre los electrodos MN, de 1 m y sólo cambiaron las distancias entre los electrodos AB. El electrodo B estaba orientado hacia el Norte (salida de la Cantera) y el electrodo A hacia el Sur (cancha de entrenamiento del equipo de fútbol Pumas). El arreglo quedó como se muestra en la Figura 3.6.

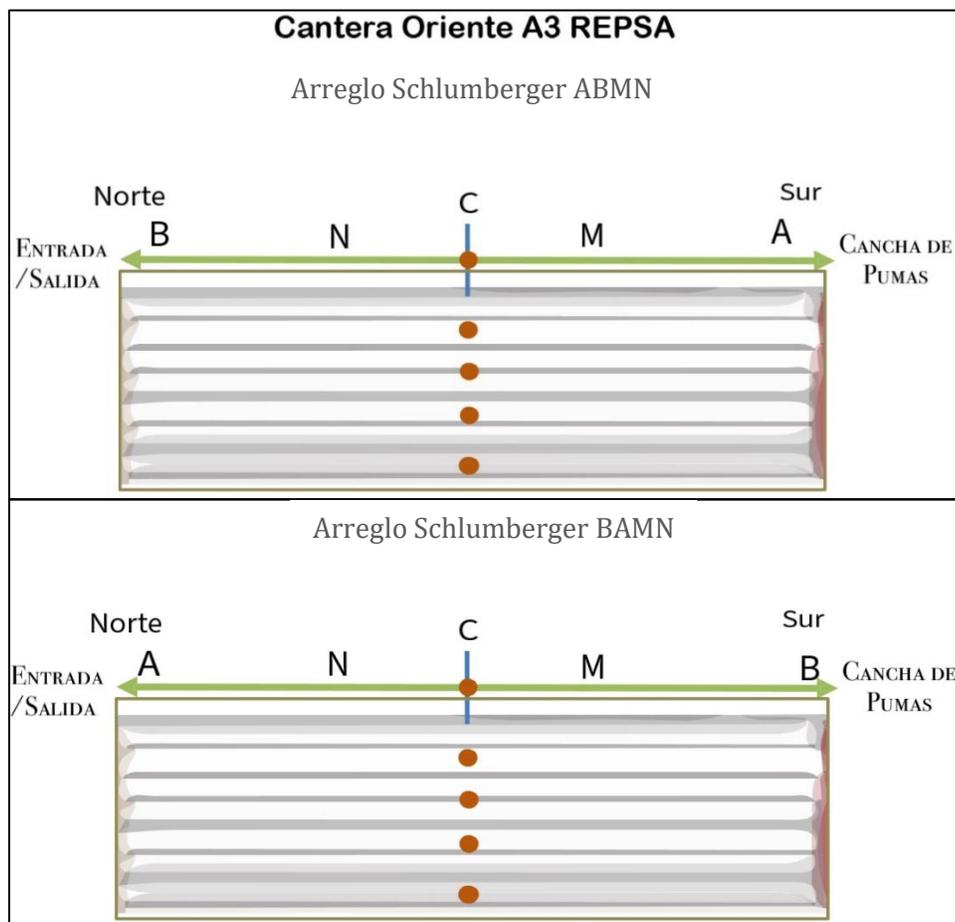


Figura 3.6 Arreglo Schlumberger empleado para el SEV realizado en el Primer Levantamiento de la Cantera Oriente A3. Los círculos representan los puntos de atribución del arreglo y, para ambas figuras, éstos se encuentran en el centro del sondeo (Tovar Jara, 2024).

Es importante mencionar que el Primer Levantamiento, con los arreglos Schlumberger y Dipolo Dipolo, se realizó el 22 de marzo de 2023, en primavera, ya que la humedad es menor y la evaporación es mayor, como se mencionó en el Capítulo 2 Humedad y Lluvias en el sur de la CDMX, y estas condiciones afectan el nivel freático del acuífero de la Cantera Oriente

3.2.2.2 Primer Levantamiento. Arreglo Dipolo-Dipolo

En este levantamiento se extrajeron dos conjuntos de datos para el arreglo Dipolo Dipolo, cada uno correspondiente con una Fuente Izquierda y una Fuente Derecha. En total se hicieron 15 mediciones para cada arreglo de la Fuente Izquierda y otras 15 para cada arreglo de la Fuente Derecha. Los electrodos AB estaban orientados hacia el Norte (Salida de la Cantera) y MN hacia el Sur (cancha del equipo Pumas) para la primera toma de datos y, después, en la segunda los polos se invirtieron. El arreglo quedó como se muestra en la Figura 3.7.

Además, se consideró un electrodo C, centrado entre M y N. Este electrodo se intercambiaba con M o N en cada medición, por lo que al final se obtuvieron cuatro arreglos diferentes, que fueron ABMC, ABCN, BAMC y BACN. Estos fueron planeados para poder realizar las Segundas Diferencias de Potencial. Sus posiciones respectivas se muestran en el Capítulo 7 Anexos.

También, las aberturas entre los electrodos de potencial se realizaron de manera tradicional, es decir, de manera simétrica entre los dipolos y respecto al centro de sondeo, de bajo del electrodo C.

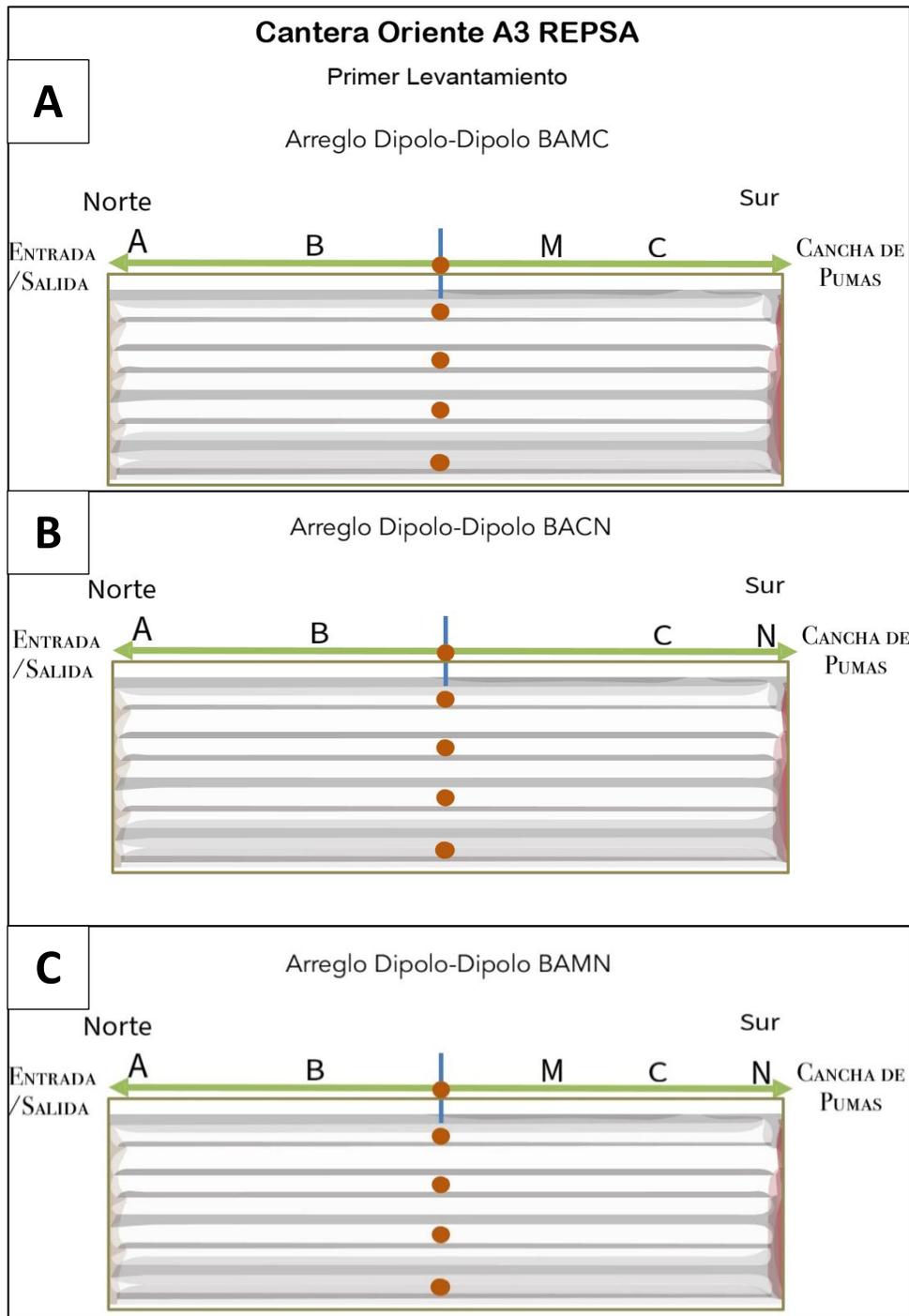


Figura Arreglo

3.7 *Dipolo Dipolo para el Primer Levantamiento del Canal 1 o Fuente Izquierda.* El electrodo C era alternado con N durante el primer levantamiento para el canal 1, como se muestra en la Figura A. Después, se cambió el electrodo M con el electrodo C para la segunda toma de datos, indicado en la Figura B, también para el canal 1. Finalmente, la Figura C muestra los puntos de atribución para las Segundas Diferencias de Potencial. Para este levantamiento se consideró que los puntos de atribución se localizaban en el centro del sondeo, aunque se alternaran los electros M y N con C (Tovar Jara, 2024).

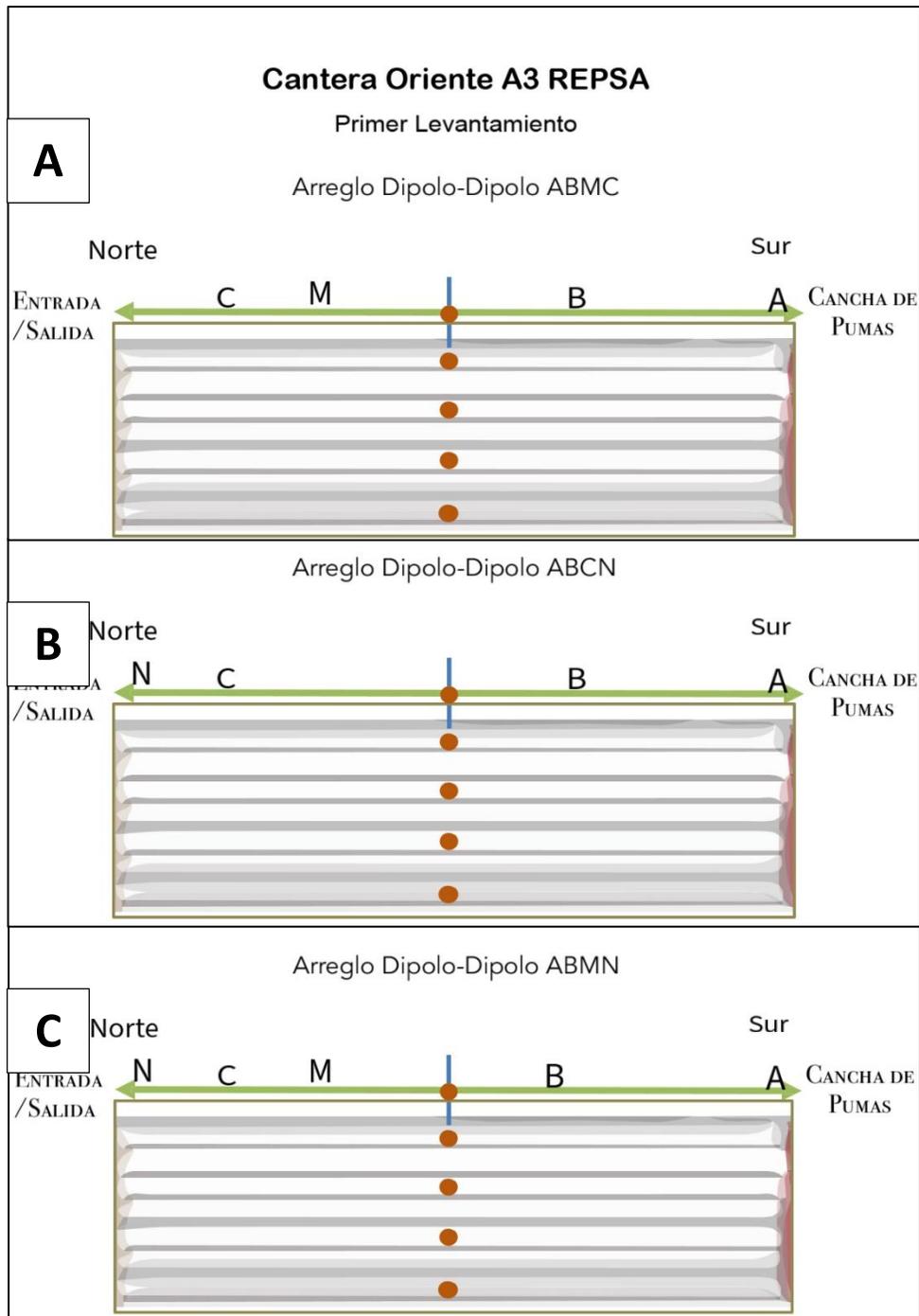


Figura 3.8 Arreglo Dipolo Dipolo para el Primer Levantamiento del Canal 2 o Fuente Derecha. El electrodo C sustituyó al electrodo N durante el primer levantamiento para el canal 2, indicado en la Figura A. Posteriormente, el electrodo C se alternó con el electrodo M para la segunda toma de datos, indicado en la Figura B, también para el canal 2. Finalmente, la Figura C muestra los puntos de atribución de las Segundas Diferencias de Potencial. En este levantamiento siempre se consideró que los puntos de atribución se localizaban en el centro del sondeo, aunque se alternaran los electrodos M y N con C (Tovar Jara, 2024).

3.2.2.3 Segundo Levantamiento. Arreglo Dipolo-Dipolo

En este segundo levantamiento se consideraron las mismas coordenadas y orientación que el levantamiento previo, pero, aunque el tipo el arreglo también fue Dipolo Dipolo, en esta ocasión las posiciones para los electrodos cambiaron.

El arreglo comenzó cercano a la Cancha del equipo Pumas, con el centro del Sondeo en esta posición y conforme se fueron realizando las mediciones empezó a abrirse hacia la dirección de la Salida de la Cantera, como se observa en la Figura 3.8. La posición de los electrodos fue con A hacia la Salida y N hacia la Cancha y entre estos dos se colocó el electrodo C.

Respecto a los electrodos M y N, en la lectura del Canal 1 se consideró a N como C, donde C era considerado el cero. De esta manera, el arreglo fue ABMC y para el Canal 2 M se convirtió en el electrodo C, quedando ABCN. Así, sólo los electrodos de potencial M y N quedaban intercambiados con C, mientras que los electrodos de corriente A y B iban abriéndose hasta el final del arreglo, el cual tuvo una longitud de 243 m para ABMC y de 247 m para ABCN. En el Capítulo 7 Anexos se muestran las Tablas con las posiciones de los electrodos utilizadas en este arreglo Dipolo Dipolo.

También, es importante mencionar que el Segundo Levantamiento, con el arreglo Dipolo Dipolo, se realizó el 12 de diciembre de 2023, en invierno, ya que la humedad es mayor y la evaporación es menor, como se mencionó en el Capítulo 2 Humedad y Lluvias en el sur de la CDMX, y estas condiciones afectan el nivel freático del acuífero de la Cantera Oriente, por lo que se esperaba encontrarlo más elevado que en primavera.

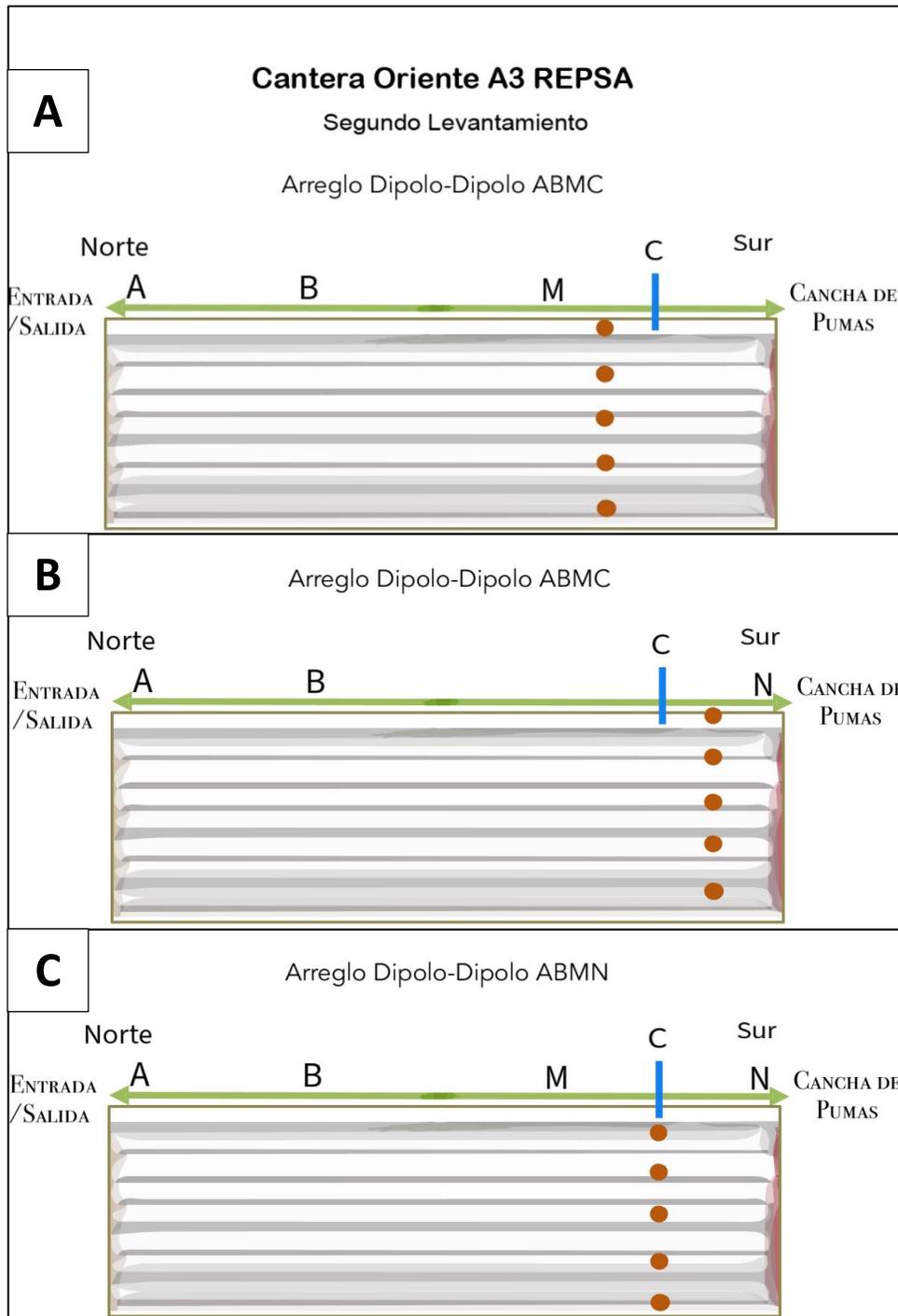


Figura 3.9 Arreglo Dipolo-Dipolo para el Segundo Levantamiento. La línea de puntos café representa los puntos de atribución. En el caso de la Figura A, los puntos de atribución se localizan entre los electrodos M y C, mientras que, en la Figura B, éstos se localizan entre C y N. Finalmente, la Figura CC muestra los puntos de atribución para las Segundas Diferencias de Potencial (Tovar Jara, 2024).

3.3 Procesamiento de los Datos

Las funciones empleadas para el filtrado de los datos obtenidos en campo, para todos los levantamientos, fueron las pertenecientes al filtro SG de la biblioteca de scipy del lenguaje de programación Python. A continuación, se muestran estas funciones

Para los datos del Primer Levantamiento en REPSA y para el levantamiento en la ENALLT

```
scipy.signal.savgol_filter (x, window_length = 7, polyorder = 4, deriv = 0, delta = 1.0, axis = -1, mode = nearest)
```

Para los datos del Segundo Levantamiento en REPSA

```
scipy.signal.savgol_filter (x, window_length = 15, polyorder = 3, deriv = 0, delta = 1.0, axis = -1, mode = nearest)
```

3.3.1 Levantamiento en el Sitio de Pruebas Jardín de la ENALLT con el Arreglo Schlumberger

En todos los datos se aplicó el Filtro Savitzky-Golay para mejorar las curvas de resistividad y poder obtener mejores resultados en las inversiones de los datos. Cabe mencionar que tanto las ventanas como los polígonos elegidos variaron, ya que los levantamientos tuvieron lugar en diferentes fechas y con diferentes circunstancias.

Posteriormente, se generaron las gráficas con las curvas de resistividad aparente de los datos observados que pueden observarse en la sección de resultados.

A estos datos se les hizo una inversión mediante el software ZONDIP 1D para obtener los cortes geoelectricos y poder visualizar los espesores y cambios en la resistividad. Así, se pudo determinar que, en efecto, la tubería se encontraba a la profundidad estimada.

3.3.1.1 Curvas de Resistividades Aparentes y Cortes Geoelectricos

Con los datos observados, es decir, los datos obtenidos en el levantamiento en el jardín de la ENALLT y empleando el arreglo Schlumberger, se analizaron en una hoja de cálculo y se observó si existían o no datos anómalos que pudieran considerarse como ruido. En este caso, por las características del arreglo Schlumberger, los datos se encontraron bastante uniformes y no fue necesario ni aplicar algún filtro ni eliminar datos anómalos o outliers.

Después, se utilizó un software para realizar la inversión geofísica y así poder obtener los cortes geoelectricos del modelo de inversión. Para esto, el software que se eligió fue el ZONDIP 1D, debido a que era más fácil manipular los datos debido al método o principio matemático con el cual está programado.

Posteriormente, se escribió un programa en Python que permitiera hacer tanto las gráficas de las curvas de resistividad aparente de los datos observados como las curvas con los cortes geoeléctricos, además de considerar la posición estimada de la tubería para poder hacer las comparaciones pertinentes.

En el Capítulo 7 Anexos se muestra la Tabla 7.11 con los valores de las resistencias y resistividades aparentes obtenidas en campo, además de las posiciones asignadas para cada electrodo.

3.3.2 Levantamiento en el Sitio de Pruebas Jardín de la ENALLT con Arreglo Dipolo Dipolo

3.3.2.1 Curvas de Resistividades Aparentes y Cortes Geoeléctricos

En este arreglo se tuvieron que analizar los datos observados en campo ya que algunos presentaron valores muy altos de resistividades aparentes que no correspondían ni con la tendencia de las curvas ni con el tipo de litología que se esperaba encontrar en la zona. Es por esto que esos datos fueron eliminados (Datos de resistencia y de resistividad aparente resaltados con color amarillo en la Tabla 7.12).

Posteriormente, se les aplicó una sola iteración del filtro Savitzky-Golay (SG1) mediante una función de la librería de Scipy en Python. A ésta, se le asignó un valor de ventana de 5 y un polígono de 4, ya que fueron los que mejor ajustaron los datos. De ese modo fue posible obtener unos valores más suavizados que pudieron ser graficados, también en Python, para observar las curvas de resistividades aparentes.

3.3.2.2 Curvas de Segundas Diferencias de Potencial (SDP)

Con los mismos datos obtenidos en el levantamiento con el arreglo Dipolo Dipolo en la ENALLT, se obtuvieron los valores de las Segundas Diferencias de Potencial. Para esto, se empleó una hoja de cálculo en Excel en donde se resolvieron las Ecuaciones 1.19 y 1.20 previamente mencionadas en esta tesis. Como producto final, se obtuvieron las curvas de Segundas Diferencias de Potencial y los resultados se muestran en las Tablas 7.20 y 7.21 en el Capítulo 7 Anexos.

3.3.3 Primer Levantamiento Arreglo Schlumberger. REPSA

3.3.3.1 Curvas de Resistividades Aparentes y Cortes Geoeléctricos

En este arreglo se observó que los datos de campo no presentaban tanto ruido ya que sus curvas de resistividad y de resistencia fueron bastante regulares. Fue por esto por lo que no se eliminó ningún dato y sólo se aplicó el filtrado con Savitzky-Golay hasta una segunda iteración para suavizar un poco las curvas y poder analizarlas mejor. Estos datos pueden observarse en el Capítulo 7

Anexos.

Luego, se realizó una inversión de los datos mediante el software ZONDIP 1D, del cual, se extrajeron los cortes geoelectricos y las profundidades y espesores de las capas del subsuelo estudiado.

Finalmente, se empleó un programa en Python que permitió graficar las curvas de resistividades aparentes y los cortes geoelectricos de cada inversión.

3.3.4 Primer Levantamiento Arreglo Dipolo Dipolo. REPSA

3.3.4.1 Curvas de Resistividades Aparentes y Cortes Geoelectricos

En un archivo de hoja de cálculo se generó una tabla con los datos obtenidos durante el levantamiento, ordenando los electrodos en su respectivo lugar, es decir, el metro correspondiente, y considerando que pertenecía al levantamiento con Fuente Derecha o con Fuente Izquierda.

Después, los datos originales de campo se graficaron para observar su comportamiento y así poder tomar una decisión para su procesamiento, ya que se pudo observar existían datos anómalos o outliers tanto para los datos correspondientes a la Fuente Derecha ABCN como para los datos de la Fuente Izquierda BACN. Es por eso que la cantidad de datos se redujo de 15 a 10, los cuales se muestran el Capítulo 7 Anexos.

Una vez que se extrajo el conjunto final de datos de resistencia y de resistividad aparente se les aplicó el filtro de Savitzky-Golay, realizando dos iteraciones. Y, ya que se tuvieron los datos filtrados se procedió a realizar la inversión geofísica con el software ZONDIP 1D. Con este software se obtuvieron los cortes geoelectricos.

Finalmente, estos datos se graficaron para obtener las respectivas curvas de resistividad aparente como las de los cortes geoelectricos mediante un programa en Python.

3.3.4.2 Curvas de Segundas Diferencias de Potencial

Las Segundas Diferencias de Potencial fueron calculadas a partir de los datos de las resistencias de cada fuente y sus factores geométricos. En el caso de las resistencias, se realizó una resta entre la resistencia de cada canal, quedando así una resistencia (R_{SDP}) para la Fuente Izquierda y una resistencia (R_{SDP}) para la Fuente Derecha.

Por otro lado, para calcular el factor geométrico K_{SDP} , se aplicó la Ecuación 1.6, mencionada previamente, y en ella se sustituyeron los valores K de cada canal, obteniendo un Factor

Geométrico K SDP para cada fuente.

Finamente, las Segundas Diferencias de Potencial SDP se calcularon con el producto de R SDP y K SDP. Estos valores finales fueron procesados en Python para generar las gráficas con las curvas de SDP mostradas en la sección de resultados. A continuación, se muestran las tablas con los datos y cálculos obtenidos para las SDP.

3.3.5 Segundo Levantamiento Arreglo Dipolo Dipolo

3.3.5.1 Curvas Resistividades Aparentes

En este arreglo primero se observaron los datos anómalos, los cuales fueron eliminados. Posteriormente, se filtraron con Savitzky-Golay al cual se le asignó una ventana de 15 y un polinomio de tres para conseguir un mayor suavizamiento, ya que los datos de campo fueron bastante ruidosos. Posteriormente, estos datos obtenidos con el filtrado se usaron para realizar la inversión geofísica, mediante el software de inversión geofísica y, con el cual, se obtuvieron los cortes geoeléctricos que se presentan en el Capítulo 5 Resultados.

Finalmente, se realizaron las gráficas de resistividades aparentes y de los cortes geoeléctricos en un programa escrito en Python. Las tablas con los datos obtenidos en este procesamiento se muestran en la sección de Anexos.

3.3.5.2 Curvas de Segundas Diferencias de Potencial

Para hacer este procesamiento se eliminaron ocho outliers de cada canal y con los datos limpios se hicieron los cálculos en un archivo de Excel, en donde se obtuvieron los factores geométricos de las segundas diferencias, las resistencias de segundas diferencias y, finalmente, los valores de resistividad de las Segundas Diferencias de Potencial.

Con éstas últimas se hicieron las gráficas en Python para mostrar el comportamiento de las curvas. Las tablas con los datos obtenidos en este procesamiento se muestran en el Capítulo 7 Anexos.

3.4 Preparación de los Cortes Geológicos basados en el Pozo 266 Metro Copilco

A partir de los valores de resistividad presentados en el Capítulo 2, Cuadro 2.4 Litología y Valores de resistividad de este trabajo, se ajustó un corte geológico que pudiera ser representado en cada gráfica, tanto las gráficas de los modelos como las de los resultados finales de cada levantamiento. Ya que, a pesar de presentar cada estrato del Pozo 266 Metro CU con su respectiva litología en la parte inferior de las gráficas, se consideró importante poder visualizar dentro de las gráficas los cambios de capa y de litología, para poder generar una correlación más precisa entre las variaciones de las curvas y las litologías.

De ese modo, se presenta en la Figura 3.10 el corte geológico y en el Cuadro 3.1 las profundidades y las resistividades propuestas, los cuales se emplearán como referencia en este trabajo.

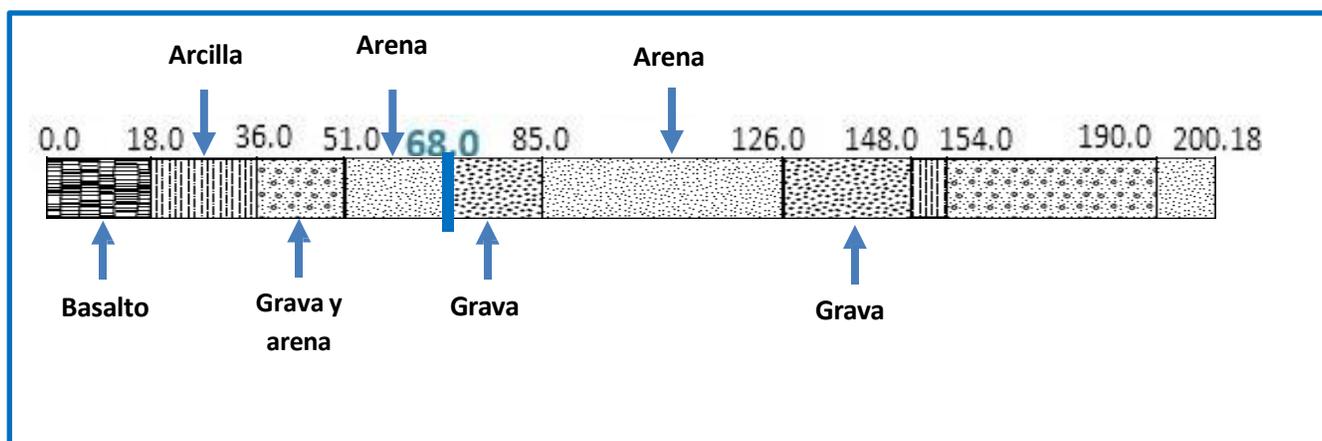


Figura 3.9 Corte Geológico Pozo 266 Metro CU.

Resistividades propuestas	Profundidades
300	18
130	36
300	51
215	85
800	126
20	148

Cuadro 3.1 Resistividades y profundidades del Corte Geológico Pozo 266 Metro CU.

Capítulo 4. Modelación Teórica

4.1 Modelo para el Arreglo Schlumberger

Se propone un modelo para un arreglo Schlumberger en un medio de cinco capas. Los espesores se calcularon a partir del modelo de Pozo 266 Metro CU, ya que la intención era recrear el medio en el que se levantaron los datos, de modo que fuera posible comparar con los resultados obtenidos en el levantamiento con el arreglo Schlumberger con este modelo.

Para conseguir este modelo, se consideraron las resistividades aparentes y los espesores de las cinco capas mostradas en el siguiente Cuadro 3.1, basándose en el tipo de litología del Pozo 266 Metro CU y con los valores del Cuadro 2.4. Es importante mencionar que el último espesor corresponde al semi espacio, por lo cual su valor es infinito.

Resistividades propuestas	Espesores de las capas
1980	2
300	16
1000	15
100	17
800	∞

Cuadro 4.1 Resistividades propuestas para arreglo Schlumberger

Se propusieron estos valores y el número de capas de acuerdo con la profundidad que se estimó alcanzar para poder visualizar el nivel freático, el cual se estimaba alrededor de los 68 [m], de acuerdo con el Pozo 266 Metro CU, por lo cual, el modelo se estimó a una profundidad de 70 [m].

Respecto a la curva de resistividades aparente obtenida y que se observa en la Figura 4.1, se puede observar que su valor más somero cuenta con el mayor valor de resistividad y que, posteriormente, éste disminuye muy significativamente hasta llegar a una profundidad muy cercana a los 40 [m]. Después, este valor se estabiliza y empieza a mantenerse constante hasta llegar a la mayor profundidad.

Después, los valores del modelo de resistividades aparentes fueron invertidos empleando el software ZONDIP 1D y se graficó en Python junto con el modelo inicial. Estas dos curvas se muestran en la Figura 4.1.

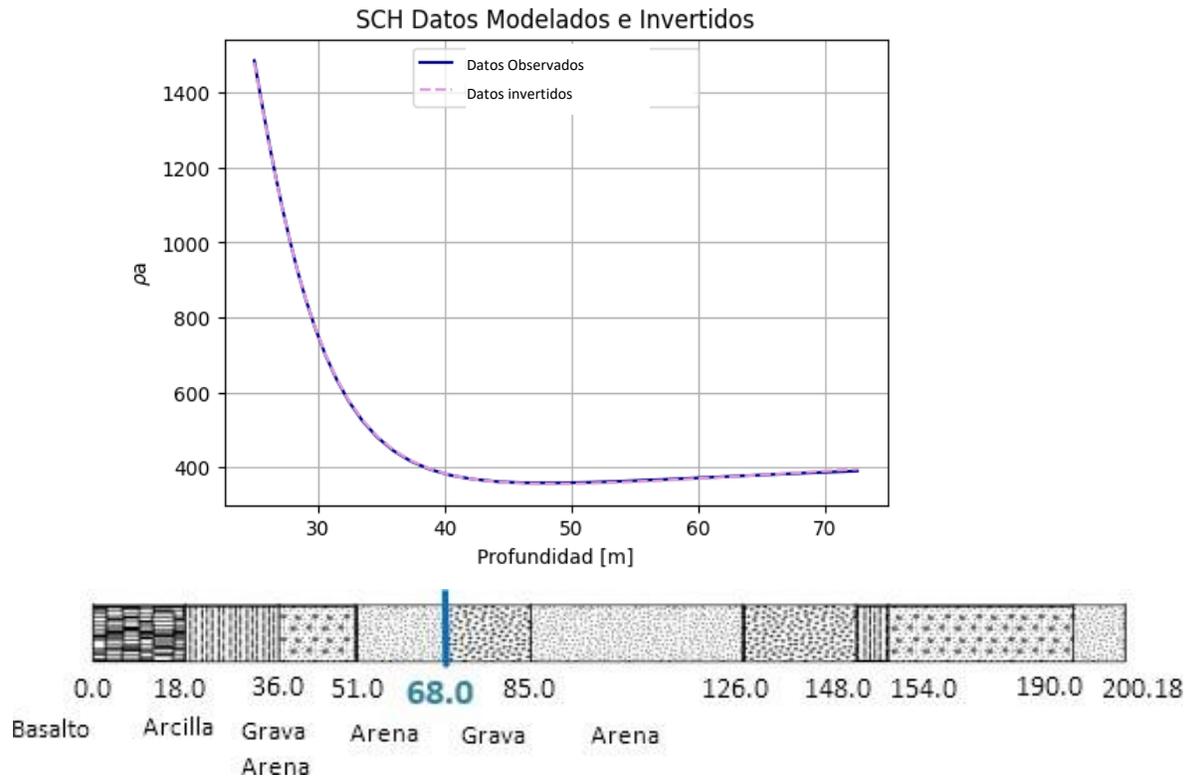


Figura 4.1 Curvas de resistividades aparentes Modelación Schlumberger. Gráfica que ilustra el modelo y la inversión del modelo propuesto para el arreglo Schlumberger (Tovar Jara, 2024).

4.2 Modelo para el Arreglo Dipolo Dipolo

A continuación, se propone el mismo modelo, pero empleando el arreglo Dipolo Dipolo. Al igual que el modelo anterior, se consideraron cinco capas a partir del Pozo 266 Metro CU, de donde se estimaron los espesores propuestos. Los datos de resistividades y de los espesores propuestos corresponden a los mismos del arreglo Schlumberger en el Cuadro 4.1.

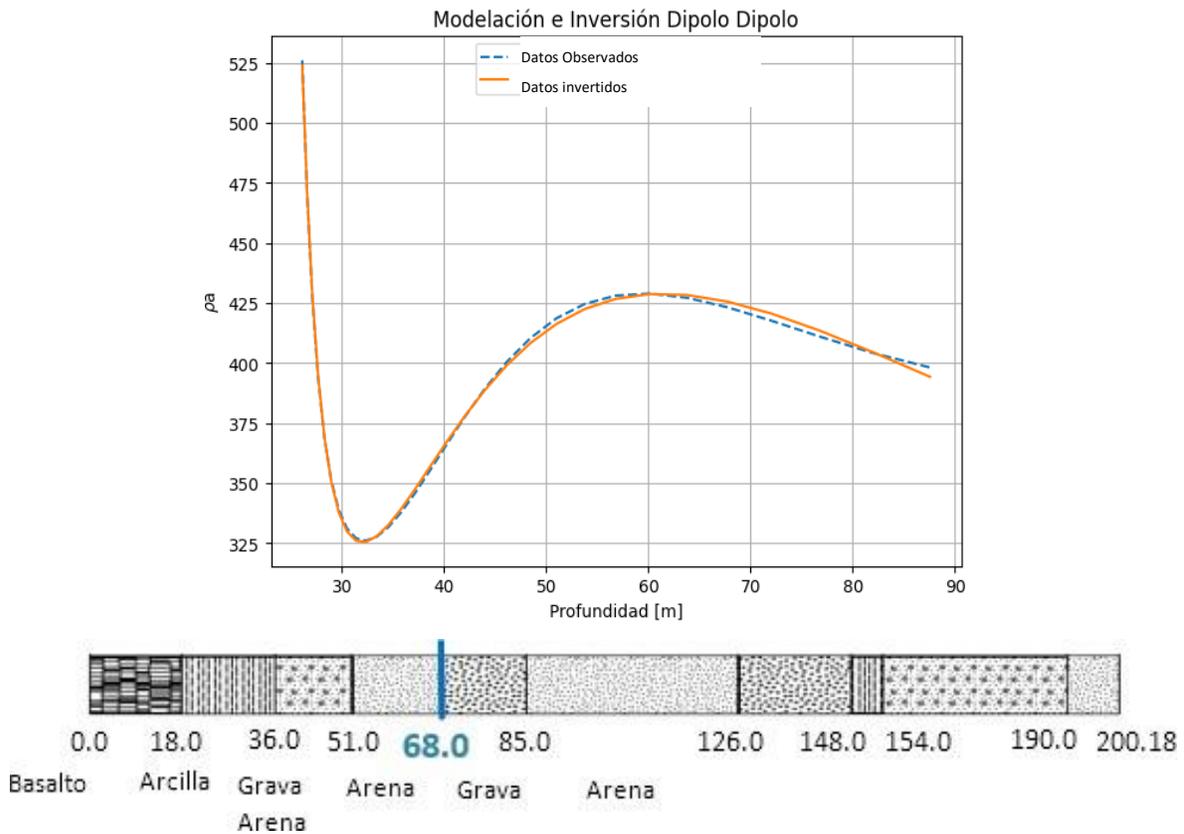


Figura 4.2 Curvas de resistividades aparentes Modelación Dipolo-Dipolo. Gráfica que ilustra el para el modelo y la inversión del modelo propuesto para el arreglo Dipolo Dipolo (Tovar Jara, 2024).

Para este modelo del arreglo Dipolo Dipolo, la profundidad alcanza casi los 90 [m] y, al igual que para el modelo del arreglo Schlumberger, se intentó alcanzar a visualizar la profundidad de 68 [m] debido a que a esa profundidad se estimaba el nivel freático, de acuerdo con el Pozo 266 Metro CU.

Así, la curva de resistividades presenta un valor de resistividad aparente máximo al inicio de la curva, en la profundidad más somera, y disminuye hasta que alcanza un punto de inflexión poco después de los 30 [m] de profundidad. Después, vuelve a incrementar sus valores de resistividad, teniendo otro punto de inflexión alrededor de los 60 [m] de profundidad.

Posteriormente, esta curva fue invertida en el software ZONDIP 1D y se graficaron en Python, tanto la curva de resistividades aparentes como la curva de la inversión, las cuales se muestran en la Figura 4.2.

Respecto a estos dos modelos, se puede observar que el correspondiente al arreglo Schlumberger no muestra con tan detalladamente el cambio de capas, de modo que podría interpretarse como si tan sólo se trata de una disminución en las resistividades aparentes en la primera porción de la curva, quedando en la experiencia del intérprete definir si entre los 30 m y los 40 m hay o no un cambio en la litología.

Por su parte, el modelo del arreglo Dipolo Dipolo también muestra la disminución de los valores de resistividad aparente en la primera porción de la curva, pero es más preciso para definir que, en efecto, alrededor de los 30 m hay un cambio significativo en las resistividades aparentes de la curva y que es un posible indicador de cambio en la litología y, posteriormente, la curva continúa mostrando con mayor detalle las variaciones, ahora en aumento, de sus resistividades aparentes. Por lo tanto, es más fácil hacer la interpretación cualitativa si se emplea el arreglo Dipolo Dipolo, pero debido a que el arreglo Schlumberger presenta menores niveles de ruido es muy útil como base para hacer comparaciones entre los arreglos.

4.3 Modelo para el Arreglo Dipolo Dipolo usando dos capas

Adicionalmente, se propone un modelo de dos capas empleando el arreglo Dipolo Dipolo. Este modelo busca justificar y explicar los resultados finales del Segundo Levantamiento realizado en la Cantera Oriente REPSA.

Este modelo presenta un arreglo que puede servir en zonas con poco espacio, de manera que se abran y desplacen los electrodos de corriente y que se respeten esas aberturas, para alcanzar mayor profundidad de penetración, contrario a los arreglos convencionales, los cuales, al irse abriendo y alcanzar su apertura máxima necesitan mucho espacio y así poder tener mayores profundidades de penetración.

De ese modo, para calcular los valores de resistividad para este modelo, se realizó un promedio de los valores originales de resistividad aparente, los obtenidos en campo. Después, se graficó el modelo generado junto con los valores de resistividad tanto del Canal 1 como del Canal 2, mostrados en la Figura 4.3.

Lo que se puede apreciar es que, poco antes de los 30 m de profundidad, los valores de resistividad son menores en comparación con los valores de profundidades más someras. Además, es justo en esa profundidad que se da el mayor cambio en los valores de resistividad, lo cual muy probablemente puede interpretarse como un cambio de capa. Después, se observa que las curvas tienen un comportamiento en donde incrementa el valor de las resistividades en función de su profundidad.

MODELACIÓN DE DOS CAPAS

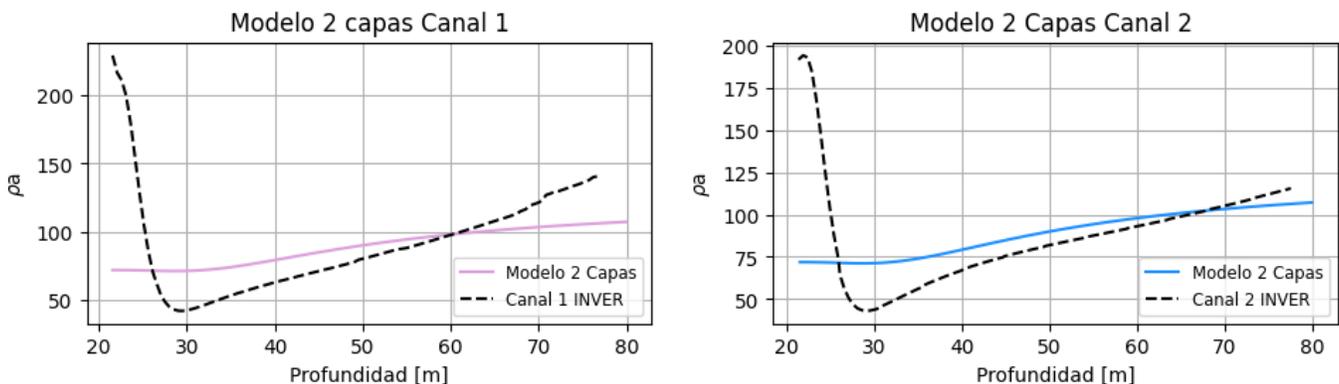


Figura 4.3 Modelación de dos capas para el arreglo Dipolo Dipolo. Se aprecian las curvas de resistividades aparentes del Canal 1 y del Canal 2 con sus respectivas curvas de inversión (Tovar Jara, 2024).

Capítulo 5. Resultados

A continuación, se presentan los resultados para los tres levantamientos de esta tesis, es decir, los resultados para el Primer levantamiento en REPSA con los arreglos Schlumberger y Dipolo Dipolo, además de sus Segundas Diferencias de Potencial, el Segundo Levantamiento en REPSA con el arreglo Dipolo Dipolo y, finalmente, se muestran los resultados para el levantamiento del sitio de pruebas de la ENALLT con los mismos arreglos ya mencionados, junto con los resultados de las Segundas Diferencias de Potencial.

Con estos resultados se busca que los valores de las resistividades aparentes, obtenidas en cada levantamiento, tengan una correlación con los valores de resistividad de los diferentes materiales que se encuentran en el registro del Pozo 266 Metro CU en el que se basó el análisis de esta zona, considerando que los valores de resistividad pueden pertenecer a materiales secos o a materiales con cierta cantidad de humedad, lo que puede afectar a sus valores de resistividad. Además de esto, hay que tomar en cuenta el nivel freático en la zona, el cual puede estar alrededor de los 68 m, de acuerdo con el mismo Pozo 266 Metro CU.

5.1 Resultados. Jardín de la Escuela Nacional de Lenguas, Lingüística y Traducción (ENALLT)

A continuación, se muestran las curvas de resistividades aparentes y los cortes geoelectricos obtenidos para el levantamiento del arreglo Schlumberger con Fuentes Derecha e Izquierda y para el arreglo Dipolo Dipolo, también con sus respectivas Fuentes Derecha e Izquierda. Esto con el objetivo de obtener, aproximadamente, la profundidad y espesor de una tubería de agua ubicada en el área.

5.1.1 Arreglo Schlumberger

La Figura 5.1, inciso a, muestra la curva de valores de resistividad aparente de los datos observados en campo para el arreglo Schlumberger con Fuente Derecha y Fuente Izquierda, mientras que el inciso b muestra una gráfica con los cortes geoelectricos obtenidos con la inversión de esos datos. Además, se observa una línea punteada azul que indica la profundidad estimada de la tubería que es aproximadamente a los 60 cm de profundidad, junto con una zona sombreada que representa su espesor, de 15 cm de diámetro.

En la primera gráfica de la Figura 5.1, el inciso a. Sólo se muestra una curva porque ambas fuentes obtuvieron resultados muy similares y los hallazgos fueron:

1. Un decaimiento, no tan abrupto, aproximadamente entre los 0.65 m y los 0.75 m de profundidad, y corresponde a la zona donde se esperaba ubicar la tubería, por lo que, en efecto, corresponde con la localización de la tubería.

En la segunda gráfica de la Figura 5.1, inciso b, se observa. El corte geoelectrico obtenido con la inversión. Al igual que el inciso anterior, sólo se muestra una curva por la similitud en los resultados para ambas fuentes.

1. Sólo se obtuvo un cambio de estrato, pero se detectó a los 1.5 m de profundidad. A pesar de que no fuera tan exacto, se puede apreciar que sí muestra la existencia un cambio en los valores de resistividad, debido a la tubería.

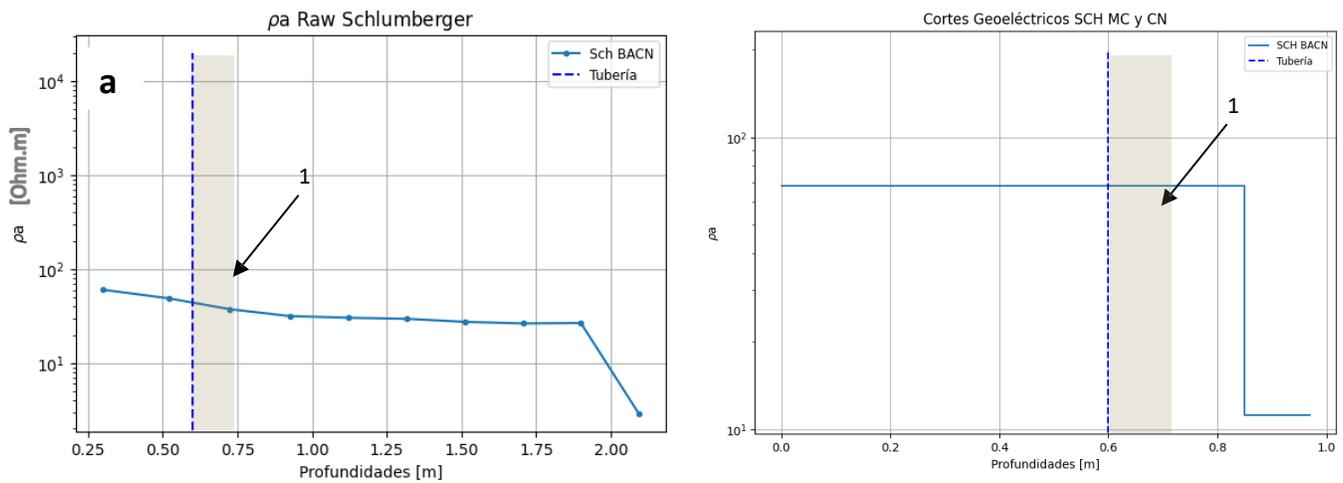


Figura 5.1 Gráficas de Resistividades aparentes y Cortes Geoelectricos del arreglo Schlumberger ENALLT.

Figura Izquierda: Sch BACN Raw: valores observados para el arreglo Schlumberger. ρ_a : resistividad aparente. Línea punteada azul: profundidad de la tubería. Zona sombreada: área estimada para la tubería. Figura Derecha: MC y CN: posiciones ABMC y BACN (Tovar Jara, 2024).

5.1.2 Arreglo Dipolo Dipolo

En esta sección se muestran las gráficas de las curvas de resistividad aparente para los datos observados y los cortes geoelectricos de la inversión de estos datos para el levantamiento en el Jardín de la ENALLT, en donde se empleó el arreglo Dipolo Dipolo. Para ambas gráficas, se usaron una Fuente Derecha con posiciones de electrodos BAMC y BACN y una Fuente Izquierda con posiciones de los electrodos BAMC y BACN. Adicionalmente, se muestra, en un área sombreada, la localización del objeto de estudio, es decir, la tubería que se encontraba enterrada en el jardín.

En la gráfica de la izquierda, Figura 5.2, las curvas de resistividades aparentes muestran:

1. Un cambio en sus resistividades aproximadamente entre los 0.65 a 0.75 m. Es podría considerarse como un cambio de capa, aunque lo más probable es que sí se deba a la tubería, de la cual se sabe su profundidad y coincide con los datos de la gráfica.

Respecto a la gráfica de la derecha, Figura 5.2, se puede observar que:

1. Los cortes geoelectricos también coinciden en un cambio de resistividades en la misma profundidad de entre 0.65 y 0.75 m, ya que muestran un cambio de capa y, debido a lo ya mencionado previamente, se deduce que es la presencia de la tubería la que genera ese cambio de resistividad.
2. Son las curvas “DD_BAMC_der” y la “DD_BACN_der” las que más se ajustan a la presencia de la tubería, ya que su estrato abarca las profundidades de 0.5 m a 1.0 m.

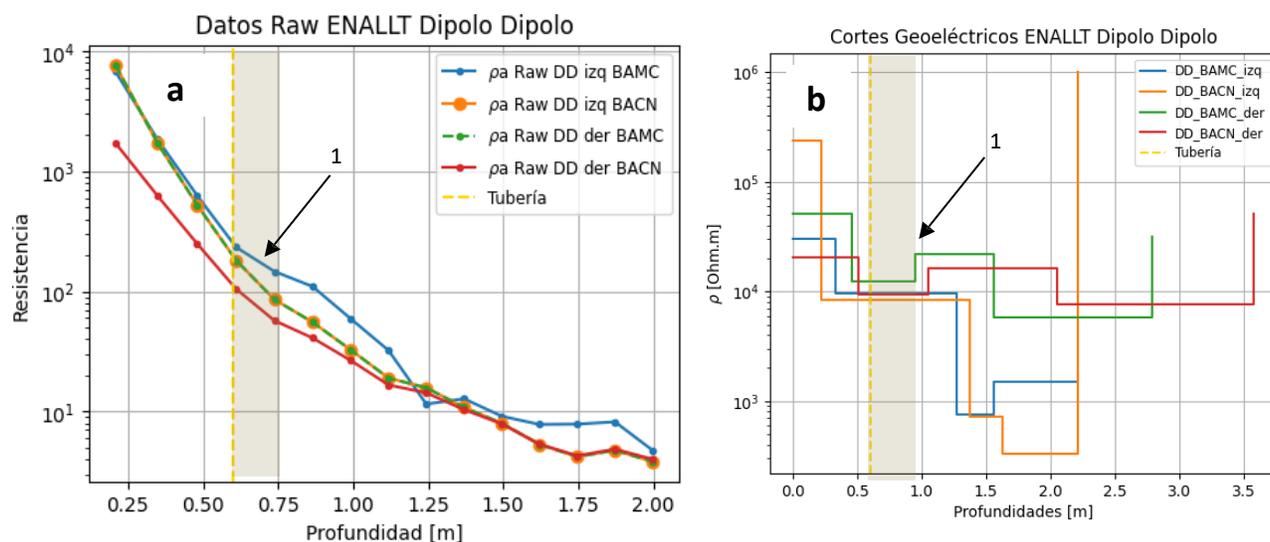


Figura 5.2 Gráficas de Resistividades aparentes y Cortes Geoelectricos del arreglo Dipolo Dipolo ENALLT. En la figura Izquierda se muestran las curvas de Resistividades Aparentes de las Fuentes Derecha e Izquierda obtenidas con el arreglo Dipolo Dipolo. En la figura Derecha se muestran los cortes geoelectricos con la posición estimada de la tubería (línea punteada amarilla) y el espesor estimado (Tovar Jara, 2024).

Cortes Geoelectricos ENALLT Dipolo Dipolo				
Curvas		Espesores	Resistividades	RMS Error %
DD_BAMC_izq		0	29953.96	13.4
		0.33	9502.53	
		0.94	760.13	
		0.29	1485.06	
		0.65	1786.24	
DD_BACN_izq		0	235494.61	13.3
		0.22	8285.31	
		1.15	719.92	
		0.26	329.23	
		0.58	1002376.97	
DD_BAMC_der		0	51512.35	6.9
		0.46	12342.77	
		0.49	22106.04	
		0.61	5814.91	
		1.23	31321.67	
DD_BACN_der		0	20559.82	7.1
		0.51	9403.01	
		0.54	16341.67	
		1	7601.27	
		1.53	51512.35	
Cortes Geoelectricos ENALLT Schlumberger				
Curvas		Espesores	Resistividades	RMS Error %
Sch		0.85	68.3	11.7
		0.12	11.16	

Cuadro 5.1 Espesores y resistividades de los Cortes geoelectricos DD ENALLT. Se muestran los espesores de cada capa obtenidos con los cortes geoelectricos, sus resistividades reales y el porcentaje de error (RMS) obtenidos durante la inversion de los datos tanto para los arreglos Dipolo Dipolo como el arreglo Schlumberger realizados en la ENALLT (Tovar Jara, 2024)

5.1.3 Segundas Diferencias de Potencial Arreglo Dipolo Dipolo

En la Figura 5.3 se muestra la curva obtenida para las Segundas Diferencias de Potencial (SDP), en donde se emplearon los valores de resistividades aparentes obtenidos con ambas Fuentes.

1. Se puede apreciar que la variación de la resistividad se registró mucho antes de la profundidad de los 0.65-0.75 m.
2. Después de tener el mayor cambio de sus valores de resistividad, se logra estabilizar alrededor de los 0.50 m, de modo que sus valores de resistividad se mantienen sin alteraciones.

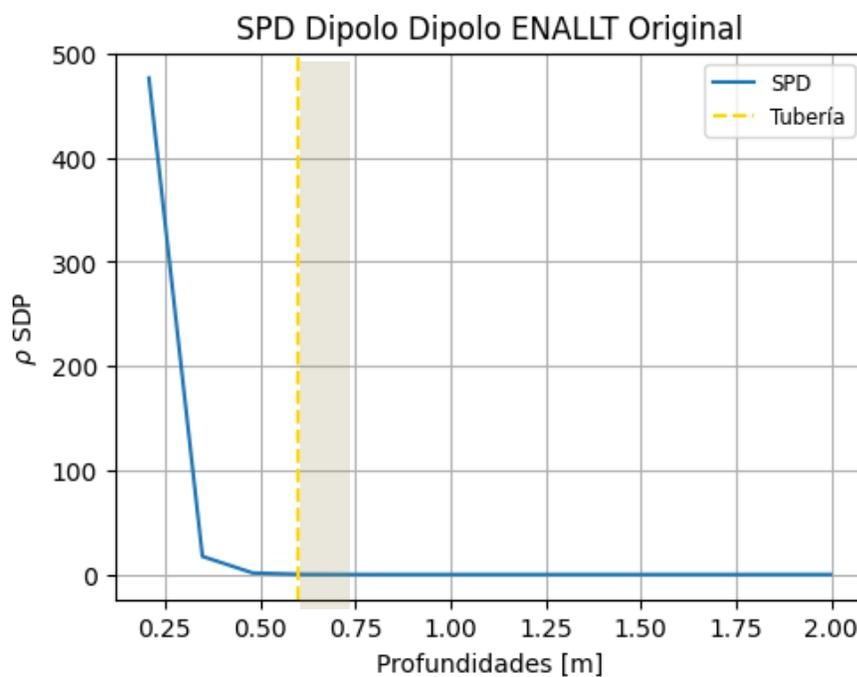


Figura 5.3 Gráficas de SDP del arreglo Dipolo Dipolo ENALLT. Se muestra la curva correspondiente a las Segundas Diferencias de Potencial (SDP) obtenidas mediante los datos generados con el arreglo Dipolo Dipolo en el jardín de la ENALLT. La línea punteada color amarillo, junto con la figura sombreada, indican la localización esperada de la tubería, alrededor de los 60 cm de profundidad (Tovar Jara, 2024).

5.2 Resultados. Primer Levantamiento en REPSA

Antes de comenzar con la explicación de los resultados es importante mencionar que, tanto las profundidades de las gráficas de las curvas de resistividad aparente como las profundidades de las gráficas de los cortes geoelectricos fueron ajustadas con respecto al muro de basalto de la Cantera Oriente A3, es decir, se consideró que la diferencia entre la altitud del Pozo 266 Metro CU y la altitud en donde se realizó el levantamiento dentro de la Cantera Oriente consistía en una profundidad de 21 m, por lo que los datos de profundidad obtenidos en los levantamientos se ajustaron para que pudieran ser comparados con los materiales de cada estrato del Pozo 266. Es por esto que, el análisis de la profundidad de las gráficas inicia alrededor de los 21 m.

Además, para tener una mejor visualización de los materiales del Pozo 266 Metro CU se colocó una sección geológica de éste debajo de las curvas y se graficó un corte geológico obtenido del mismo pozo para que se pudiera hacer la correlación de sus profundidades, espesores y la profundidad del nivel freático con cada uno de los valores obtenidos en cada curva. Los límites de cada capa o espesores se indicaron con líneas punteadas amarillas en cada una de las gráficas. A continuación, se procede a explicar los resultados de obtenidos en este trabajo.

5.2.1 Arreglo Schlumberger

Las gráficas generadas para el arreglo Schlumberger presentan las curvas de resistividades aparentes para la Fuente Derecha ABMN y para la Fuente Izquierda BANM. En la Figura 5.4 inciso a se puede apreciar que:

1. En los metros de profundidad más someros, la curva de resistividades aparentes empieza alrededor de un valor de 100 Ohm.m y en una profundidad de 22 m.
2. Después, existe un punto de máxima resistividad con un valor alrededor de 180 [Ohm.m] y a una profundidad de 28 m. Además, esta sección se correlaciona con el estrato del Pozo 266 Metro CU cuyo material corresponde a arcillas.
3. Posteriormente, se produce un declive un poco abrupto en los valores de resistividad, el cual se interrumpe ligeramente, aproximadamente entre los 28 m y los 36 m y con un valor menor a 100 Ohm.m. Se puede observar que, justo en esa sección existe un cambio de estrato en el corte geológico del Pozo 266 Metro CU, por lo que es posible que sí exista correlación.
4. Después, se observa que el valor de resistividad remonta ligeramente su incremento entre los 40 m y los 60 m de profundidad, llegando nuevamente a un valor de 100 [Ohm.m] y,

nuevamente, se corresponde con el cambio de litología observado en el corte geológico del Pozo 266 Metro CU.

5. En las profundidades entre 60 m y 100 m, justo donde de acuerdo con el registro del Pozo 266 Metro CU, se estima la ubicación del nivel freático, en aproximadamente 68 m. Es entre las profundidades de 60 a 80 m que la curva se mantiene constante.
6. En su porción final, alrededor de los 120 m, la curva de resistividades aparentes tiene una pequeña disminución en sus valores, siendo ligeramente menor a 100 [Ohm.m].

Respecto a los cortes geoelectricos para este mismo arreglo, representados en la Figura 5.4 inciso b, se encuentra que:

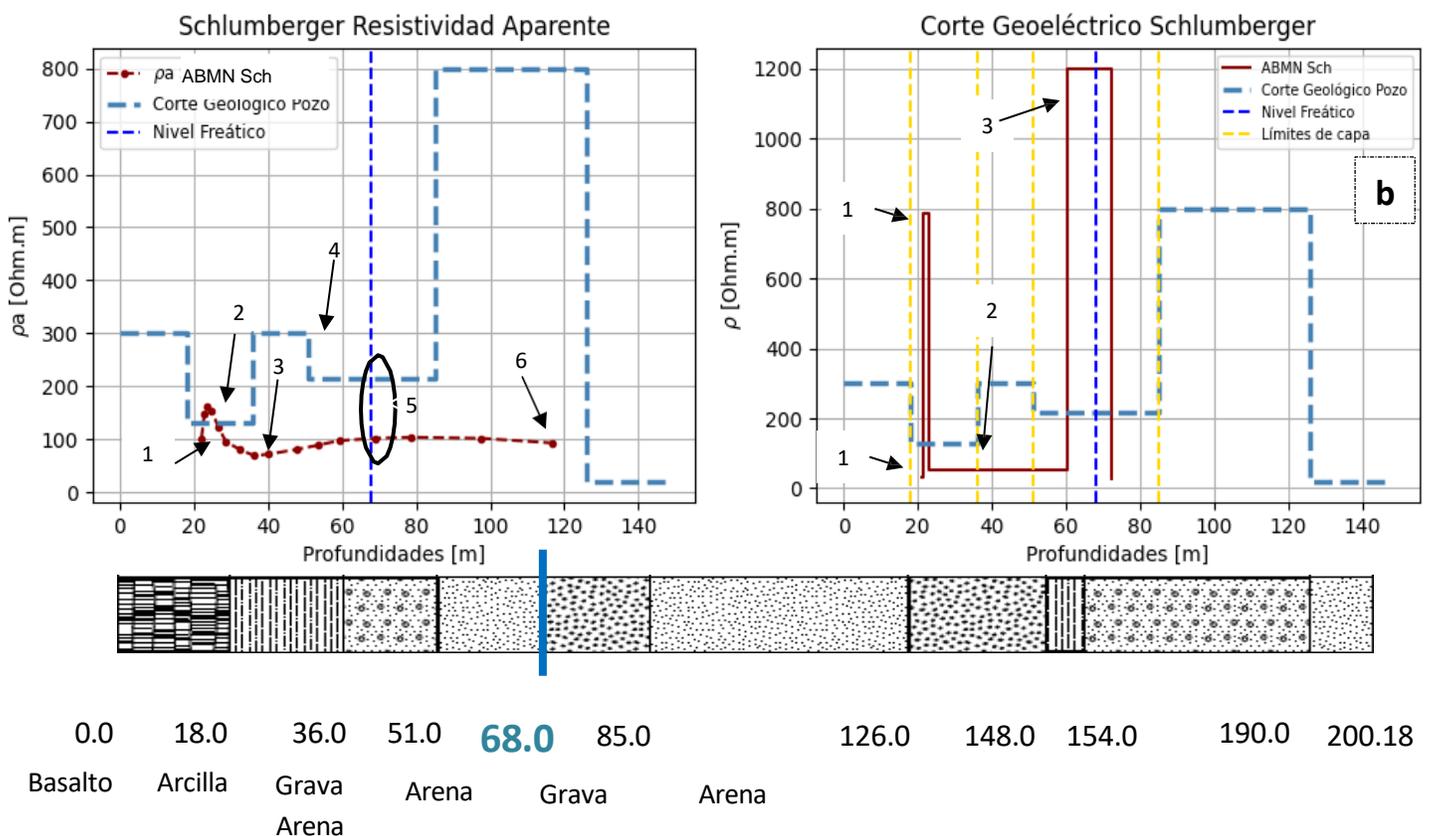


Figura 5.4 Gráficas de Resistividades aparentes y Cortes Geoelectricos del arreglo Schlumberger Cantera A3 Primer Levantamiento. Gráfica que muestra en el inciso a) las curvas de resistividades aparentes de los datos observados con el arreglo Schlumberger, mientras que la gráfica b) presenta los cortes geoelectricos de la inversión de esos datos aparentes. SCH AB: Schlumberger para fuente derecha; SCH BA: Schlumberger para fuente izquierda (Tovar Jara, 2024).

1. En las profundidades de 21 m y en los 21.69 a 23 m, hay dos estratos de espesores muy pequeño, donde el segundo estrato muestra un cambio muy abrupto y significativo de la resistividad. Ambos se corresponden con la curva de resistividades aparentes del inciso a en esa misma sección.
2. Entre los 23 m y los 60 m se mantiene constante el valor de resistividad de ese estrato, además de representar un espesor considerable, con alrededor de 37 m, y los materiales que lo conforman son arcillas, arenas y grava, de acuerdo con la litología del Pozo 266 Metro CU.
3. Se observa que este corte coincide con la línea punteada del Nivel Freático estimado, que se ubica a los 68 m de profundidad. Una propuesta para explicar este comportamiento es que en esa zona hay presencia de arenas y gravas, de acuerdo con los observado en el Pozo 266 Metro CU y al Cuadro 2.4 en donde se muestra que las gravas pueden tener valores de resistividad desde 300 [Ohm.m] y las arenas secas pueden llegar a valores de 1500 [Ohm.m].

5.2.2 Arreglo Dipolo Dipolo

Para este arreglo Dipolo Dipolo se obtuvieron las mediciones de resistividades aparentes para la Fuente Derecha ABMC y ABCN y las mediciones de resistividades aparentes para la Fuente Izquierda BACN y BAMC, las cuales se pueden observar en la Figura 5.5 en el inciso a, en donde se representan las curvas de los valores obtenidos en campo. En esta primera imagen, lo que se puede apreciar es que:

1. En las profundidades entre 22 m y 24 m es que el valor de la resistividad es de 120 [Ohm.m], muy cercano al cambio de espesor correspondiente al corte geológico del Pozo 266 Metro CU.
2. Después, se observa que el valor de la resistividad disminuye cuando llega a las profundidades de 24 m y 29 m, en donde alcanza un valor de resistividad muy cercano a cero [Ohm.m].
3. Posteriormente, entre los 29 m y 43 m vuelve a incrementarse su valor de resistividad alrededor de los 60 [Ohm.m], además de coincidir con el límite de capa del estrato de grava y arena, cuyo espesor va desde las profundidades de 43 m a 53 m.
4. Hay un valor que presenta un comportamiento un poco anómalo en la Curva roja ρ_{a_raw} , ya que, a pesar de coincidir con la capa del corte geológico, parece contener un poco del ruido debido al arreglo Dipolo Dipolo.
5. En las profundidades entre 51 m a 81 m se encontraría el nivel freático, es decir, los 68 m, de acuerdo con los estratos del pozo, y los materiales presentes en este segmento son

arena y grava. Se puede apreciar que, dentro de este segmento, las curvas de resistividad presentan un incremento en sus valores, siendo éstos de 114 [Ohm.m] y 118 [Ohm.m] en los 68 m de profundidad, que es el punto donde se observa el mayor valor de resistividades, aunque inmediatamente, se ve una disminución de este valor de resistividad.

6. En las profundidades 81 m a 118 m se vuelve a ver un incremento constante de la resistividad y corresponde con el cambio de estrato de arena a grava, observado en el corte geológico del pozo.
7. Finalmente, en las profundidades 118 m a 140 m se ve que las resistividades disminuyen considerablemente y que este cambio también se ve relacionado con el cambio de la litología en el corte geológico, ya que es una transición de arena a grava.

Respecto a la segunda imagen, la Figura 5.5 inciso b, lo que se puede apreciar son los cortes geoelectricos de los modelos de inversión realizados con el software ZONDIP para el arreglo Dipolo Dipolo, tanto para la Fuente Derecha ABMN como para la Fuente Izquierda BANM, y se graficaron

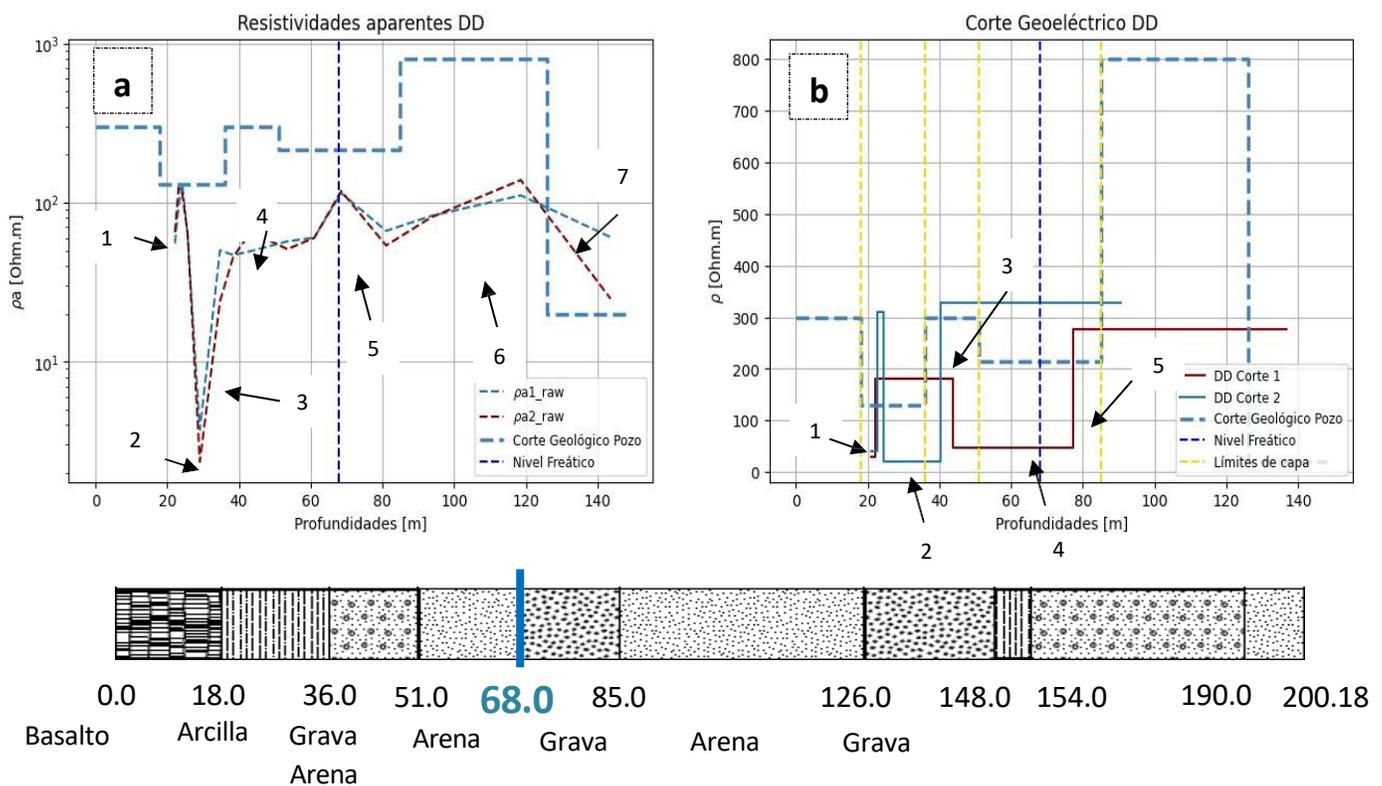


Figura 5.5 Gráficas de Resistividades aparentes y Cortes Geoelectricos del arreglo Dipolo Dipolo Cantera A3 Primer Levantamiento. La gráfica a) muestra las curvas de resistividades aparentes de los datos observados, mientras que la gráfica b) presenta los cortes geoelectricos de la inversión de los datos de resistividades (Tovar Jara, 2024).

junto con el nivel freático, representado con una línea punteada azul, a la profundidad estimada por el Pozo 266 Metro CU, la cual era alrededor de los 68 m.

Es la curva roja “DD_Corte1” la que representa mejor los estratos que se espera encontrar, de acuerdo con el Pozo 266 Metro CU, ya que sus cambios de capa parecen coincidir mejor con las profundidades de éste. Por el contrario, la curva azul “DD_Corte2” sólo concuerda con los primeros cambios de litología y, al llegar a mayores profundidades, disminuye su ajuste. Por lo tanto, se mencionan los hallazgos basados en la curva “DD_Corte1”.

1. En estos cortes se ve que en la profundidad de 21 m sus valores de resistividad son entre 30 [Ohm.m] y 40 [Ohm.m], justo en el límite de capa con basalto y algo de escoria.
2. Después, en las profundidades entre los 22 m y los 43 m los valores de resistividad de los cortes son de 180 y de 310 [Ohm.m], probablemente la diferencia se deba al error en la inversión debido a los valores levantados en campo, ya fuera debido al ruido en el sitio o por las características propias del arreglo. Aun así, ambos cortes detectan un cambio entre el estrato de basalto con escorias y el estrato de arcillas, la cual ocurre alrededor de los 20 m.
3. En los 36 m se observa el otro cambio de litología, esta vez entre arcillas y grava con arena, la cual también fue detectada en los cortes geoeléctricos de acuerdo con la litología del Pozo 266 Metro CU.
4. Posteriormente, en las profundidades de 51 m, el corte geológico del Pozo 266 Metro CU muestra que a los 51 m ocurre otro cambio de estrato, de gravas y arenas a sólo arenas, y coincide con el corte geoeléctrico que tiene un cambio cercano a los 40 m.
5. Es hasta casi los 80 m en donde se ve que el corte sí detectó un cambio de estrato, variando desde gravas hacia arenas, y con valores de resistividad entre 277 [Ohm.m] y 328 [Ohm.m].

5.2.3 Segundas Diferencias de Potencial con el arreglo Dipolo Dipolo

Para calcular las Segundas Diferencias de Potencial (SDP) también se colocaron la fuente derecha con un arreglo de electrodos ABMC y ABCN y la fuente izquierda con los arreglos BAMC y BACN, ya que se utilizó el mismo arreglo Dipolo Dipolo mencionado previamente. De estos arreglos se obtuvieron dos curvas, una para cada fuente, las cuales se muestran en la siguiente gráfica en la Figura 5.6.

1. En las profundidades entre los 18 m y los 36 m, entre los límites de capa del estrato de arcillas, se observa un descenso del valor de las resistividades aparentes, desde 476 [Ohm.m] hasta casi cero [Ohm.m]. Dentro de este estrato se observa que, alrededor de los

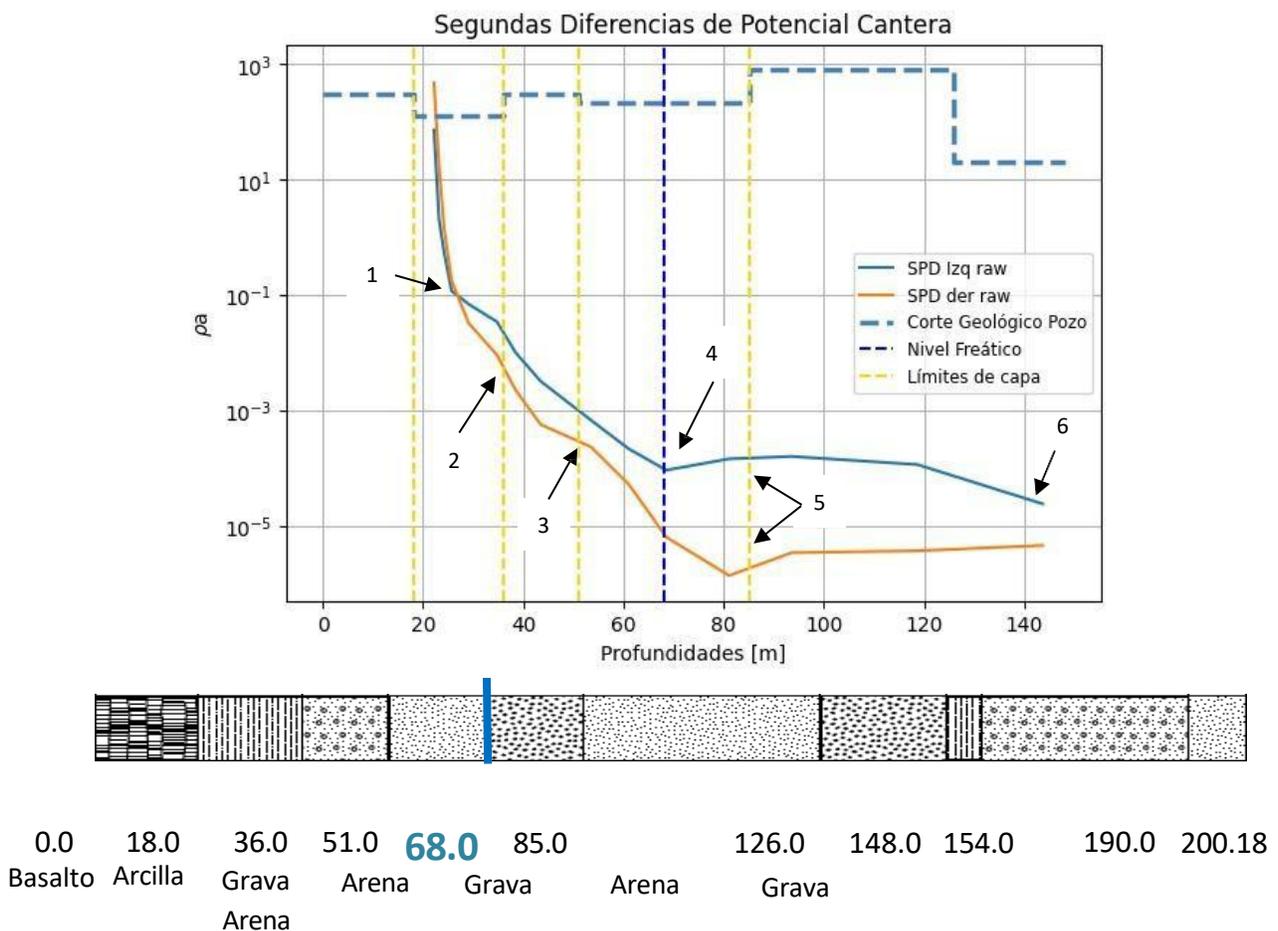


Figura 5.6 Gráfica de SDP Cantera A3 Primer Levantamiento. La gráfica muestra las curvas con los valores de las Segundas Diferencias de Potencial (SDP) para las fuentes Izquierda y Derecha junto con el valor de profundidad esperado para el Nivel Freático de la zona (~68 m) indicado con la línea punteada color azul (Tovar Jara, 2024).

29 m hay un cruce entre las dos curvas de SDP y, posteriormente, cada curva continúa en su descenso de resistividad.

2. Alrededor de los 36 m, las curvas se separan y presentan un ligero cambio en su resistividad, muy cercano al cambio de estrato del corte geológico con litologías de grava y arena.
3. Después, cercano a los 51 m, las curvas vuelven a presentar una ligera variación en sus valores, igualmente muy próximos a los cambios en los límites de capa, esta vez con litologías de arenas.
4. A partir de los 51 m hasta los 80 se observa una variación en los valores de resistividad, aunque las curvas mantienen un comportamiento muy similar. Es en este estrato en donde se espera encontrar el nivel freático, de acuerdo con el Pozo 266 Metro CU. Es posible que las curvas de resistividades aparentes presentaran esta separación debido a varias causas como, por ejemplo, que la inyección de corriente hubiera variado en cada fuente y que, además, al haberse intercambiado la medición entre los electrodos, esto generó un cambio en las líneas de corriente al viajar por el medio. Otro motivo que se propone es que, a pesar de haber realizado el filtrado de los datos, éstos aún mantuvieran cierto nivel de error, el cual generó este comportamiento en las curvas.
5. Alrededor de los 68 m y de los 80 m se observa que ambas curvas tienen un ligero cambio en sus resistividades, probablemente debido al cambio en el tipo de litología de los estratos, cambiando de arena a grava y el cual ocurre a los 85 m.
6. Finalmente, el último segmento de las curvas se mantiene más estable, aunque esta parte puede no ser tan confiable, debido al ruido de los datos durante el levantamiento.

Cortes Geoeléctricos 1er Levantamiento REPSA Dipolo Dipolo			
Curvas	Espesores	Resistividades	RMS Error %
DD_corte 1	1.15	30.26	34.4
	21.73	180.65	
	33.54	47.6	
	59.37	277.09	
DD_corte 2	1.61	1.19	24.9
	1.82	41.19	
	15.94	310.32	
	50.24	21.27	
		328.39	
Cortes Geoeléctricos 1er Levantamiento REPSA Schlumberger			
Curvas	Espesores	Resistividades	RMS Error %
ABMN Sch	0.69	32.26	2.2
	1.32	786.13	
	37.23	54.08	
	11.99	1199.53	
		26.46	

Cuadro 5.2 Espesores y resistividades de los Cortes geoeléctricos Arreglos DD y Schlumberger Primer Levantamiento REPSA. Se muestran los espesores de cada capa obtenidos con los cortes geoeléctricos, sus resistividades reales y el porcentaje de error (RMS) obtenidos durante la inversión de los datos tanto para los arreglos Dipolo Dipolo como el arreglo Schlumberger realizados para el Primer Levantamiento en REPSA (Tovar Jara, 2024).

5.3 Resultados. Segundo Levantamiento en REPSA

En esta sección se muestran los resultados obtenidos mediante las curvas de resistividad aparente y los cortes geoelectrónicos conseguidos con el arreglo Dipolo Dipolo y mediante el uso de los Canales 1 y 2. Al igual que los resultados pertenecientes al primer levantamiento, los resultados que se muestran a continuación presentan las profundidades ajustadas con la diferencia de alturas entre el Pozo 266 Metro CU y la altura del lugar donde se realizó el levantamiento de datos, por lo que esta diferencia se consideró de 21 m.

También, todas las curvas obtenidas fueron graficadas junto con el corte geológico correspondiente a la litología y los espesores del Pozo 266 Metro CU, además de contar con la representación de los límites de capa de cada litología mediante las líneas punteadas amarillas, junto con la línea punteada azul que representa la posición estimada del nivel freático, a 68 m.

5.3.1 Arreglo Dipolo Dipolo

En la Figura 5.7, gráfica a, se pueden apreciar los valores de resistividad aparente de los datos observados en campo para el segundo levantamiento en REPSA con el arreglo Dipolo Dipolo.

1. En los 21.5 m de profundidad se tienen unos valores entre 230 [Ohm.m] y 206 [Ohm.m] y se encuentra muy cercano al cambio de capa, de basalto y escoria a arcillas.
2. Después, aún dentro del estrato de arcillas, el valor de resistividades disminuye alrededor de los 30 m de profundidad a valores de 40 [Ohm.m] para el Canal 1 y de 45 [Ohm.m] para el Canal 2.
3. Posteriormente, los valores de resistividad aparente tienen un ligero incremento, llegando a los 47.7 [Ohm.m] en el Canal 1 y a 59.9 [Ohm.m] en el Canal 2, muy cercano a la profundidad del siguiente límite de capa, cuya litología corresponde a grava y arena, y que se encuentra a una profundidad de 36 m.
4. En el estrato comprendido entre los 36 m y los 51 m con la litología de grava y arena, se observa unos valores de resistividad de 64.6 [Ohm.m] para el Canal 1 a una profundidad de 46.6 m y 78.9 [Ohm.m] para el Canal 2 a una profundidad de 45.8 m.

5. A los 68 m, que es donde se espera ver el nivel freático, se ve que las dos curvas tienen un pico que corresponde con este elemento y sus valores de resistividad son de 281.7 [Ohm.m] para el Canal 1 y de 95.9 [Ohm.m] para el Canal 2. Finalmente, los segmentos de las curvas

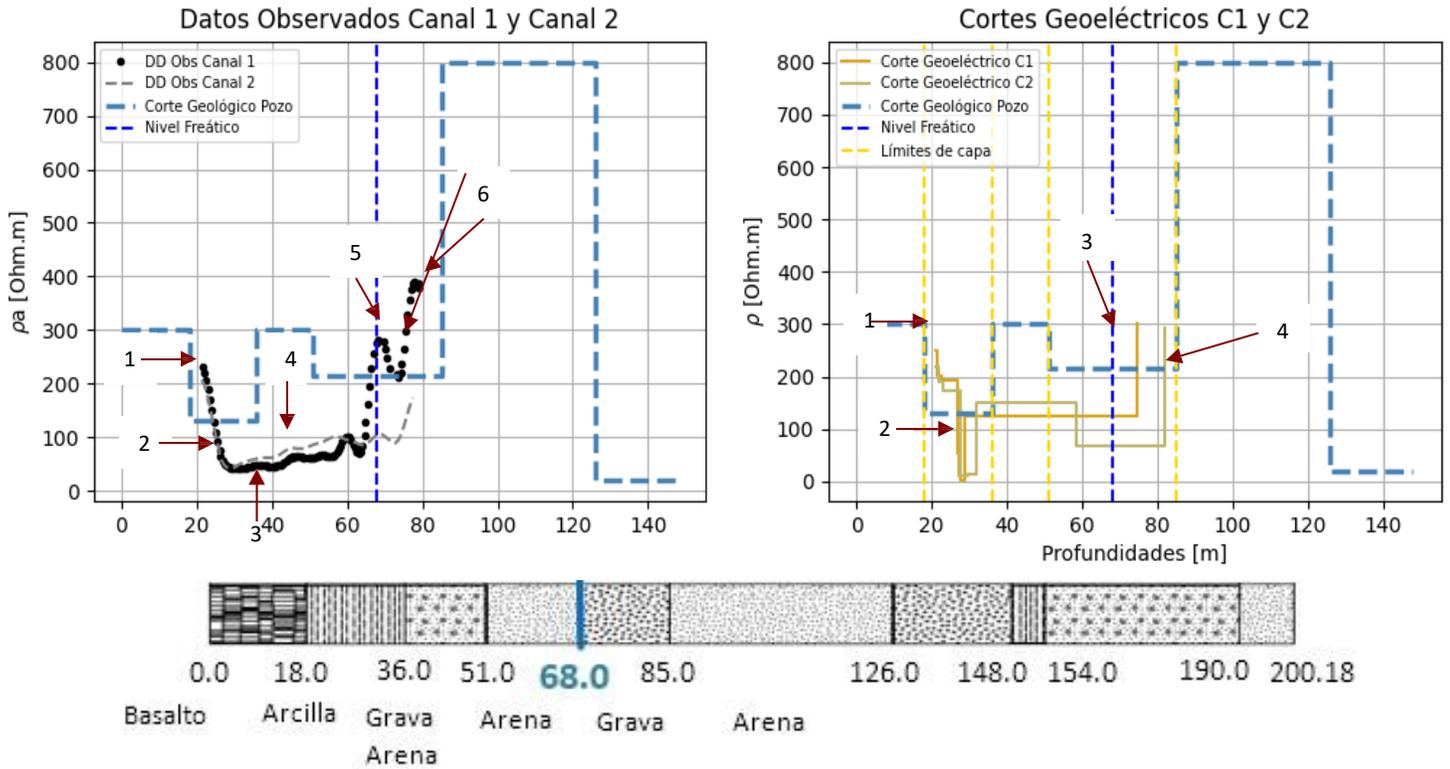


Figura 5.7 Gráficas de Resistividades aparentes y Cortes Geoelectricos del arreglo Dipolo Dipolo Cantera A3 Segundo Levantamiento. Inciso a: curvas de Resistividades Aparentes de los Datos Observados para el arreglo Dipolo Dipolo para los Canales 1 y 2. Inciso b: Se muestran los Cortes Geoelectricos obtenidos mediante la inversión de los datos y se comparan con el Corte Geológico del Pozo 266 Metro CU (Tovar Jara, 2024).

de resistividad entre los 78 m y los 77 m tienen un último incremento en sus valores y se encuentran muy próximos a los límites de capa, la cual se encuentra a los 85 m y corresponde a arenas. Para el Canal 1 se tiene un valor de 389 [Ohm.m] y para el Canal 2 de 172 [Ohm.m].

Respecto a la gráfica b de la Figura 5.7, se tienen que:

1. Los estratos más superficiales, comprendidos entre los 21 m y 22 m son de menor espesor y sus valores de resistividad aparente son de 218 [Ohm.m] para el Canal 2 y de 249 [Ohm.m] para el Canal 1 y corresponden a la litología de arcillas.
2. Entre los límites de 18 m y 43 m hay varios cambios en las resistividades, pero se observa que son estratos con espesores muy pequeños, de entre 1 m y 4 m, pero el cambio más

significativo dentro de este estrato corresponde al corte que se encuentra entre los 27 m y 29 m y cuyas resistividades son de 9 [Ohm.m] para el Canal 2 y entre los 27 m y los 28 m con resistividades de 3 [Ohm.m] para el Canal 1. Además, estos se observan muy cercanos al cambio de estrato, que se encuentra a los 36 m con litología de grava y arena.

3. Después, los cortes geoeléctricos muestran otro estrato entre las profundidades de 60 m y 80 m, y es justo aquí donde se espera encontrar el nivel freático, de acuerdo con el Pozo 266 Metro Cu.
4. Finalmente, se puede apreciar que los cortes geoeléctricos en las mayores profundidades no presentan variaciones en sus valores de resistividad, sólo hasta que llegan a los 74 m de profundidad en el caso del Canal 1 y a los 81 m para el Canal 2, justo cuando se encuentran cercanos al siguiente cambio de límite de capa, que se encuentra a los 85 m de profundidad y con una litología conformada por arena.

5.3.2 Segundas Diferencias de Potencial (SDP) obtenidas con el Arreglo Dipolo Dipolo

En este apartado se muestran las Figuras 5.8 y 5.9, en las cuales se ilustran los resultados de los datos obtenidos en el levantamiento de campo en REPSA mediante el arreglo Dipolo Dipolo. Con esos datos se realizaron los cálculos de las Segundas Diferencias de Potencial (SDP), mostrados a continuación.

En la Figura 5.8 se graficaron tanto las SDP como las Curvas de Resistividad Aparente y los Cortes Geoeléctricos generados mediante la inversión de los datos de campo mediante el software ZONDIP 1D. También, en esta gráfica se incluyeron los límites de capa de cada estrato correspondientes al Pozo 266 Metro CU, representados mediante las líneas punteadas amarillas y la línea punteada de color azul indica la localización estimada del nivel freático en la zona de estudio.

1. En los estratos superficiales, alrededor de los 21 m de profundidad, los cortes geoeléctricos presentan valores de resistividad alrededor de 200-250 [Ohm.m] para ambos canales y las SDP presentan una disminución en sus valores de resistividad, pero ambos coinciden en mostrar un posible cambio litológico alrededor de esta misma profundidad.
2. El siguiente cambio significativo en las curvas de resistividades más someros se encuentra entre los 27 y los 28 m con resistividades de casi 200 [Ohm.m] para el Canal 1 y entre los 27 y 29 m y con resistividad de 175 [Ohm.m] para el Canal 2 y, en el caso de las SDP, en la profundidad de 30 m se tiene un valor alrededor de -1500, que coincide con los cambios de capa de los cortes geoeléctricos los cuales, posiblemente, sean debidos a cambio en la litología.

3. El corte geoelectrico para el Canal 2, cercano a los 30 m, presenta un valor de resistividad alrededor de 175-200 [Ohm.m], y se observa que hay una coincidencia con el comportamiento de la curva de SDP, ya que ésta presenta dos picos con valores alrededor de los -1500 [Ohm.m] en la profundidad de 30 [m]. Esta coincidencia también se puede percibir con el Canal 1 y es posible que también se trate a cambios en la litología del medio, aunque no coincida con los materiales indicados en el esquema del Pozo 266 Metro CU.
4. Los cortes geoelectricos se mantienen estables sin mostrar cambios en sus resistividades hasta que llegan a una profundidad alrededor de los 60 m , mientras que la curva de las SDP mantienen variaciones en sus valores de resistividad, siendo esta porción la que contiene la mayor cantidad de valores positivos de toda la curva, además de que uno de sus valores coincide con el cambio en la litología indicada en el Pozo 266 Metro CU, a una profundidad de 51 m y con un valor cercano a los 300 [Ohm.m].
5. Finalmente, se puede apreciar que las SDP tienen un valor cercano a los -4000 [Ohm.m] en la profundidad de 68 [m], en donde coincide con la profundidad estimada para localizar el nivel freático. Por otro lado, se observa que los cortes geoelectricos se muestran con un valor de resistividad estable en esa profundidad y sólo cambian su valor a partir de los 75 m para el Canal 1 y después de los 80 m para el canal 2.

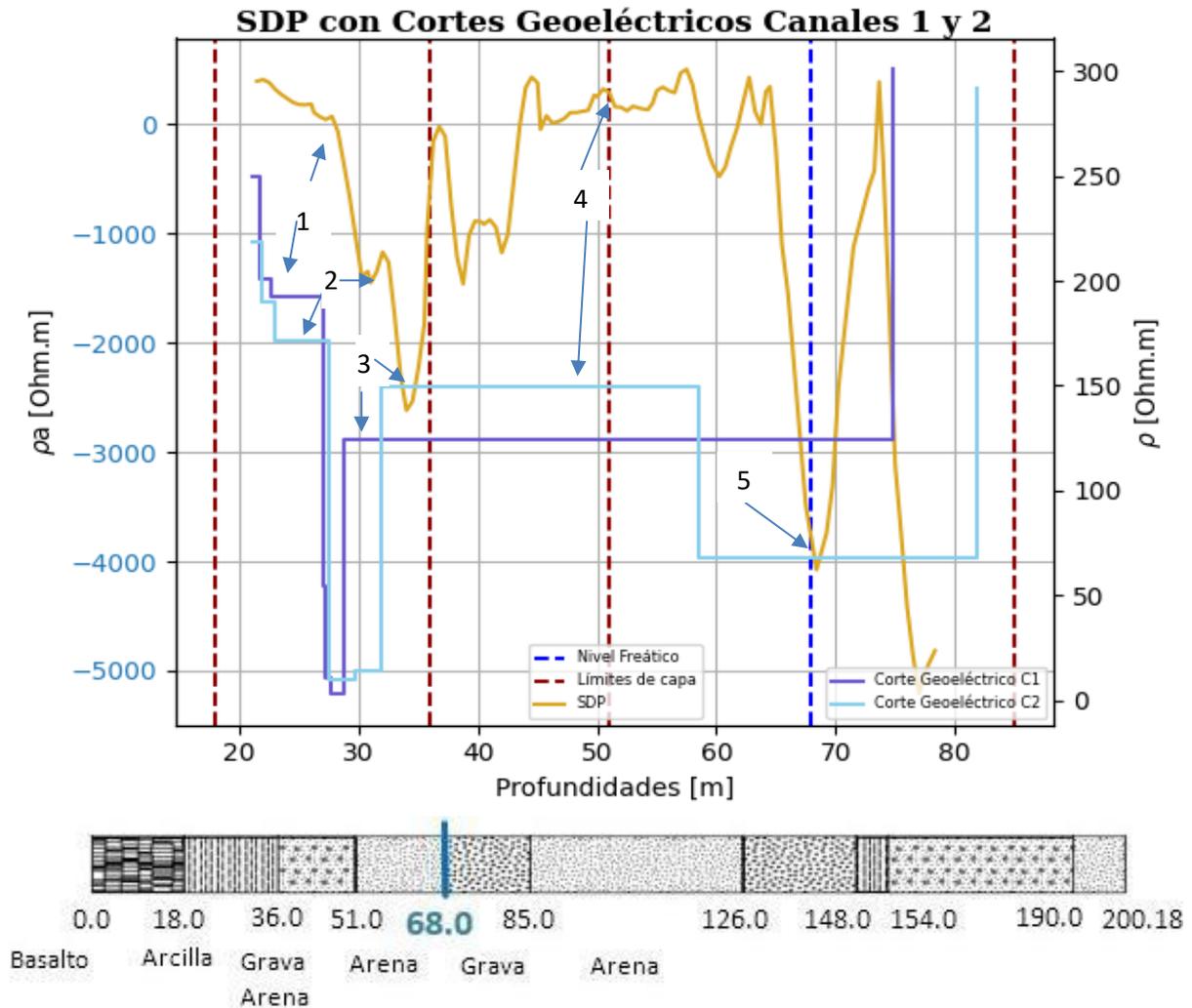


Figura 5.8 Gráfica de SDP y Cortes Geoelectricos Cantera A3 Segundo Levantamiento. Gráficas de las SDP comparadas con cortes geoelectricos y resistividades aparentes junto con el corte geológico del Pozo 266 Metro CU y el nivel freático estimado (Tovar Jara, 2024).

En la Figura 5.9 se observa la curva de las Segundas Diferencias de Potencial (SDP) graficadas junto con el corte geológico perteneciente al Pozo 266 Metro CU.

1. Respecto a los valores de resistividad de las SDP presentes en el estrato más somero, comprendidas entre los 21 m y los 26 m de profundidad, se aprecia que son positivos alcanzando el valor máximo de 564 [Ohm.m] y el mínimo de 1.6 [Ohm.m].
2. Después, aproximadamente a los 26.7 m de profundidad se puede ver que los valores de resistividad se hacen negativos. Luego, los picos de máxima negatividad en las profundidades de 30 m y 35 m presentan valores de resistividad cercanos a -1500 [Ohm.m] y el otro casi en -2500 [Ohm.m], respectivamente. Además, estas variaciones ocurren muy próximas al cambio de litología, el cual se encuentra a los 36 m de profundidad y corresponde a gravas y arenas, en donde se observa que las SDP vuelven a repuntar y se acercan a un valor de cero, justo después de ese cambio litológico.
3. Posteriormente, alrededor de los 38.7 m y de los 42 m de profundidad se observa otro cambio importante en el valor de resistividad, siendo también negativo y el cual va entorno a los -1000 [Ohm.m] y se encuentra dentro del estrato de grava y arena.
4. A continuación, se aprecia que los valores de resistividad de SDP vuelven a hacerse positivos y se mantienen con valores pequeños desde los 45 m hasta los 50 m de profundidad y cuyas litologías corresponden a arenas y gravas.
5. Es alrededor de los 50 m de profundidad en donde se presenta otro cambio, ya que se observa un valor positivo en las SDP y que coincide con el cambio de litología del Pozo 266 Metro CU, cuya composición es de arenas.
6. Finalmente, a la profundidad de casi a los 70 m se observa un pico con el máximo valor, negativo de toda la gráfica, y cuyo valor es de -4000 [Ohm.m] y es justo en esa profundidad, a los 68 m, en donde se espera el nivel freático, de acuerdo con el Pozo 266 Metro CU. El resto de los valores al final de la curva de SDP pueden ser atribuidos a ruido y no necesariamente indican otro tipo de estructura o cambio en la litología de la zona.

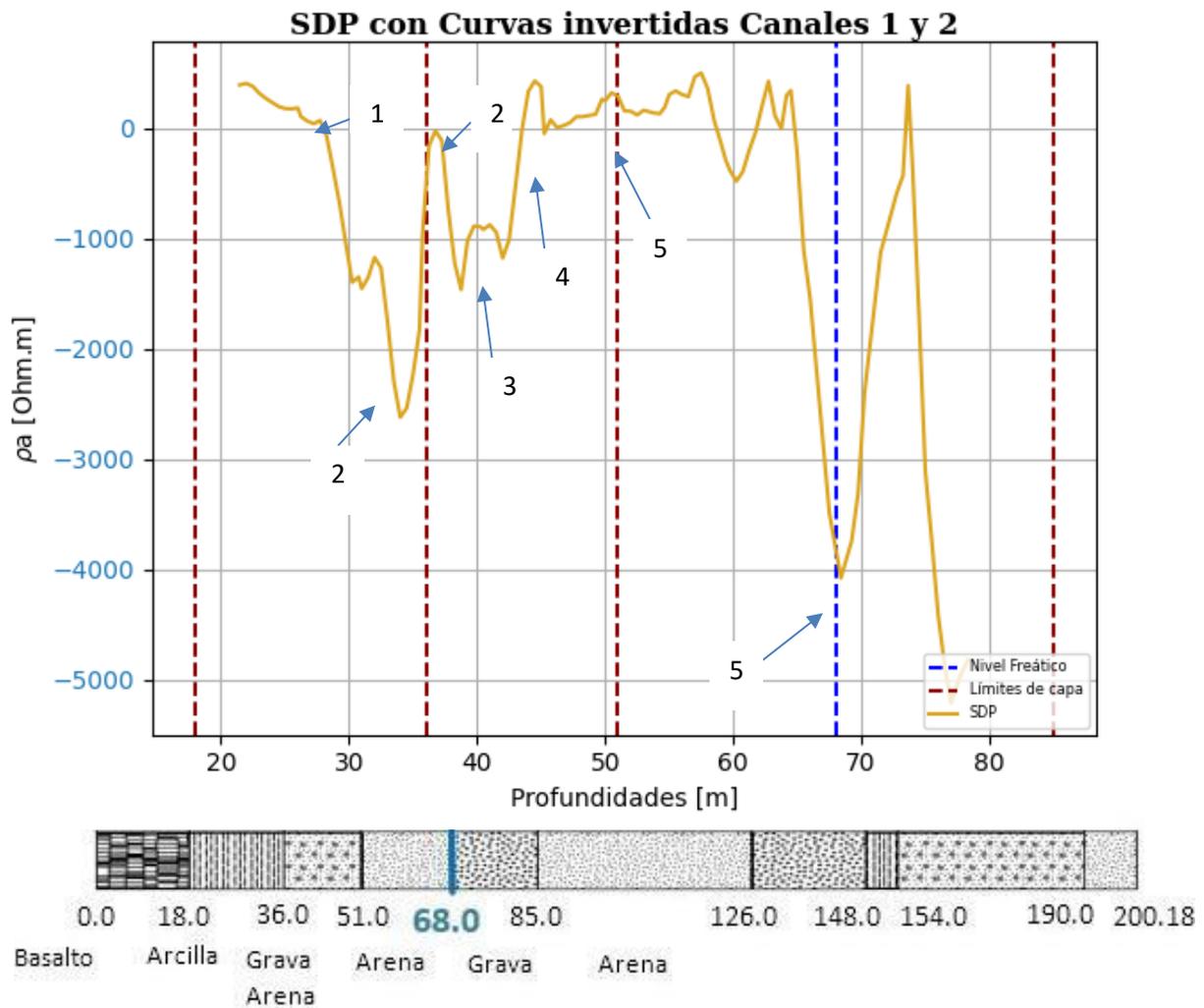


Figura 5.9 Gráfica de SDP y Cortes Geológico Cantera A3 Segundo Levantamiento. Gráficas de las SDP comparadas los límites de capa del corte geológico (líneas punteadas color rojo) del Pozo 266 Metro CU y el nivel freático estimado junto con la curva de las SDP, indicada con la línea punteada color azul (Tovar Jara, 2024).

Cortes Geoeléctricos 2do Levantamiento REPSA Dipolo Dipolo			
Curvas	Espesores	Resistividades	RMS Error %
DD_C1	0.68	249.69	23.5
	1.03	200.98	
	4.28	192.46	
	0.23	54.68	
	0.48	10.72	
	1.01	3.02	
	46.1	124.53	
		300.92	
DD_C2	0.79	218.27	5.9
	1.17	190.18	
	4.54	171.63	
	2.24	9.39	
	2.13	14.17	
	26.64	149.85	
	23.32	68.13	
		291.64	

Cuadro 5.3 Espesores y resistividades de los Cortes geoeléctricos arreglo Dipolo Dipolo Segundo Levantamiento REPSA. Se muestran los valores de cada espesor junto con sus resistividades reales y el porcentaje de error (RMS) obtenidos durante la inversión de los datos correspondientes al arreglo Dipolo Dipolo del segundo levantamiento en REPSA (Tovar Jara, 2024).

Capítulo 6. Conclusiones y Discusión

6.1 Levantamiento en el Jardín de la Escuela Nacional de Lenguas, Lingüística y Traducción (ENALLT)

Para este levantamiento se puede concluir que sí se encontró la tubería, aunque no a la profundidad esperada para el arreglo Schlumberger, ya que el cambio en el corte geoelectrico se observa después de los 80 [cm], mientras que en el arreglo Dipolo Dipolo el corte geoelectrico indica que el cambio se encuentra antes de los 50 [cm]. Por lo que puede decirse que el arreglo Dipolo Dipolo funciona mejor para observar detalles y es más preciso al estimar la profundidad de la tubería, especialmente las curvas “DD_BAMC_der” y la “DD_BACN_der” tanto en resistividad aparente como en los valores de resistividad real de las curvas de los cortes geoelectricos. Además, el arreglo Schlumberger presentó menos variación en sus valores de resistividad en la profundidad esperada, siendo casi imperceptible.

Respecto a las SDP obtenidas con los datos del arreglo Dipolo Dipolo, se puede concluir que nos muestran un cambio en sus valores de resistividad aparente un poco antes de la profundidad esperada para localizar la tubería, entre los 30 cm y los 50 cm, pero es a partir de los 50 cm que se muestra un mayor cambio en la resistividad y, a partir de aquí, se observa que los valores de la curva de resistividad son más estables, es decir, se presenta una disminución en la respuesta del medio y que lo más posible es que se deba a que el medio tiende a ser homogéneo. También, puede ser a causa de que el método empleado llegó a su límite de resolución.

Por todo lo previamente mencionado, se concluye que el arreglo Dipolo Dipolo permite obtener con mayor precisión detalles presentes en el subsuelo, aunque con valores de error considerablemente elevados durante el procesamiento de los datos, mientras que estos detalles del subsuelo pueden pasar desapercibidos para el arreglo Schlumberger, aunque este último ofrece la ventaja de no generar tanto error en el procesamiento en los datos.

6.2 Primer Levantamiento en REPSA.

En este sitio se esperaba localizar el nivel freático a los 68 m, pero no se observa gran cambio en los valores de la curva de resistividades reales del arreglo Schlumberger Figura 5.4 en esa profundidad, sino entre los 20 - 60 m de profundidad. También, en la misma Figura 5.4, se observa que el estrato perteneciente a la profundidad de 68 m tiene una gran variación en sus valores de resistividad, siendo alto-resistivos, pero esto puede atribuirse a ruido. Por lo tanto, se puede concluir el nivel freático, puede estar más superficial, y que el arreglo sirve como punto de comparación debido a su bajo nivel de error en sus datos.

Por otro lado, el arreglo Dipolo Dipolo, observado en la Figura 5.5, fue el que permitió obtener más detalles sobre los estratos del subsuelo de la Cantera Oriente, ya que los cortes geoelectricos permitieron observar los cambios de cada capa del subsuelo y se pudo correlacionar con los estratos del Pozo 266 Metro CU. Aunque los cortes geoelectricos indicaron que la variación esperada para observar el Nivel Freático de la resistividad real se encontró alrededor de los 20-30 [m] y no a los 68 [m] estimados previamente por el Pozo 266 Metro CU. También, cabe mencionar que para el arreglo Dipolo Dipolo, el estrato comprendido entre los 18 y los 36 m de profundidad muestra la porción de la curva de resistividades aparentes con los valores más bajo- resistivos, con un pico que llega a valores muy cercanos a cero [Ohm.m], que se encuentra justo a los 29 [m].

Respecto a los resultados obtenidos para las Segundas Diferencias de Potencial, los cuales pueden observarse en la Figura 5.6, es posible que los descensos en los valores de resistividad de las SDP se deban a que, a partir de la profundidad en donde se encontró el nivel freático, los estratos yano contaron con tanto grado de humedad, lo cual hizo que las curvas presentaran ese comportamiento, como si no hubiera tanto contraste entre en las resistividades de los estratos.

También, de acuerdo con lo observado en las gráficas correspondientes a las Segundas Diferencias de Potencial, es posible ver que los valores más bajos de resistividad de segundas diferencias ocurren en entre los 40 y los 60 [m], justo antes de la profundidad esperada para localizar el nivel freático a los 68 m, pero justo alrededor de esta profundidad se ve que hay variación en el comportamiento de las curvas, como un indicador de humedad o de la posible presencia del nivel freático o por el cambio en la litología.

Lo mencionado anteriormente puede indicar que el nivel freático se encuentra en las profundidades más superficiales, entre los 21 y los 40 [m] y que, conforme se desciende en la profundidad, es muy probable que los estratos presenten cierto grado de humedad.

6.3 Segundo Levantamiento en REPSA

En los resultados obtenidos con el arreglo Dipolo Dipolo se observó que las curvas de resistividad aparente detectaron una disminución en los valores de resistividad del subsuelo alrededor de los 30 m de profundidad y coincide con las curvas de los cortes geoelectricos, ya que estas también muestran un cambio de capa y con valores de resistividad pequeños.

Respecto a los valores de resistividad aparente en la profundidad esperada de 68 [m], el punto donde se esperaba encontrar el nivel freático, se observa un incremento en los valores de resistividad. Contrariamente, en los cortes geoelectricos de estas mismas curvas no se pudo

apreciar ese cambio, por lo cual, se puede concluir que el nivel freático se localiza más superficialmente a lo indicado en el Pozo 266 Metro CU.

En el caso de las SDP en este segundo levantamiento, mostradas en la Figura 5.8, muestran más detalles en los cambios litológicos en comparación con los cortes geoeléctricos, ya que en estos últimos se observan sólo los cambios más perceptibles y, en el caso de las capas más someras, sí se observan más detalladamente los cambios de las capas, aunque sean pequeñas. Esto puede ser debido a la capacidad de resolución del equipo y del arreglo y, en el caso de las capas a mayores profundidades, puede ser que el ruido durante la toma de datos y la menor capacidad de resolución del arreglo hayan impedido obtener una mayor calidad en los datos, lo cual no facilitó obtener detalles de cada capa, como sí ocurrió con las SDP.

Sobre el corte geoeléctrico del canal 2, perteneciente a la Figura 5.8, se muestran mayores coincidencias con el comportamiento de la curva de SDP en la detección de cortes litológicos y de los cuerpos de agua, tanto los superficiales como el del nivel freático del sitio. Este corte geoeléctrico muestra un último cambio de estructura alrededor de los 60 [m] y, a partir de aquí, muestra estabilidad en su valor de resistividad y, al comparar con las SDP se observa que alrededor de esa profundidad hay una variación en su comportamiento, posiblemente debido a la presencia de un cuerpo de agua o de humedad en el medio y, desde aquí, esa presencia de agua se mantiene en el estrato, incluyendo al nivel freático, y es lo que demuestra el corte geoeléctrico.

Por lo tanto, como conclusión se puede mencionar que, en cuanto a detalles, es más precisa la curva de SDP, ya que es sensible a los pequeños cambios de resistividad del medio, tanto para indicar cambios en la litología como para determinar presencia de humedad o de cuerpos de agua. También, es posible apreciar cambios en las litologías si se emplean los arreglos Schlumberger y Dipolo Dipolo tradicionales, aunque el que presenta mayor detalle es el Dipolo Dipolo, pero es preciso conocer la litología de la zona y la geología, ya que este arreglo también presenta gran nivel de ruido, el cual puede afectar la interpretación.

De este modo, los estudios sí permitieron precisar que hay presencia de cuerpos de agua de manera superficial, desde los 27 a 29 [m] para los cortes geoeléctricos del arreglo Dipolo Dipolo y para las SDP de los 30 a 36 [m] y que, para el caso del nivel freático estimado alrededor de los 68 [m], este sí se encuentra presente, aunque en el levantamiento del mes de diciembre puede ser posible estimarlo a un nivel un poco más superficial, cercano a los 60 [m].

Capítulo 7. Anexos

7.1 Tablas de Humedad y Evaporación Media Mensual en Ciudad Universitaria

Humedad Relativa Media Mensual CU												
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1963	61	43	52	55	73	71	76	83	77	78	70	67
1964	68	45	52	50	50	72	74	72	78	70	68	70
1965	62	55	49	57	64	69	84	82	72	73	78	70
1966	65	65	68	64	54	62	75	75	72	73	65	63
1967	57	51	52	52	60	63	64	74	79	70	65	63
1968	60	57	45	61	62	68	76	74	75	67	66	70
1969	59	55	51	47	47	58	71	78	75	69	66	66
1970	52	58	40	40	53	67	78	73	75	66	57	68
1971	52	45	49	43	43	67	75	74	77	70	64	61
1972	58	51	48	49	58	67	73	69	68	68	70	63
1973	54	55	48	50	58	68	76	73	71	75	67	64
1974	65	61	54	57	59	71	75	74	70	74	66	68
1975	62	54	50	52	71	79	80	77	76	71	59	55
1976	60	42	57	67	68	66	83	77	70	84	71	71
1977	63	48	53	55	60	67	75	71	75	74	71	68
1978	60	55	62	61	50	60	76	72	50	77	70	69
1979	61	61	52	55	58	65	68	77	73	54	64	66
M.M.	60	53	52	54	58	67	75	72	71	66	66	66

Cuadro 7.1 Humedad Relativa Media Mensual Ciudad Universitaria.

Tomada de Rojo Curiel (1994)

AÑO	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANUAL
1963	4.17	5.95	6.40	8.03	7.68	6.08	4.81	5.62	4.38	2.78	3.59	3.11	5.20
1964	3.48	6.00	8.78	11.68	7.68	5.72	6.00	5.63	4.38	2.78	3.59	2.49	5.83
1965	3.76	4.76	5.68	7.07	5.12	5.98	4.49	4.98	4.83	4.92	3.63	2.13	5.00
1966	4.21	.09	5.79	6.31	7.52	6.99	4.99	6.12	5.43	4.77	4.83	3.09	5.28
1967	3.52	4.49	6.24	7.65	5.98	6.22	6.53	4.61	5.18	4.44	3.74	3.25	5.06
1968	2.75	4.62	7.11	6.06	6.29	6.02	5.12	5.63	3.68	4.12	3.62	2.80	4.77
1969	3.33	3.83	6.39	7.03	7.16	6.63	5.18	4.19	4.13	4.03	3.91	2.75	4.78
1970	3.50	4.19	7.07	7.04	6.32	4.80	4.98	4.37	4.04	3.48	3.42	2.97	4.39
1971	3.30	4.72	5.18	6.44	6.18	5.27	4.08	4.32	3.95	4.01	2.74	2.55	4.38
1972	3.04	4.96	5.44	6.79	5.58	4.88	3.76	4.12	3.96	3.86	2.89	2.66	4.33
1973	3.96	4.80	7.70	6.08	5.86	5.25	4.09	4.25	3.59	3.84	3.06	2.21	4.50
1974	3.23	4.31	4.74	5.16	5.43	4.97	3.93	4.32	4.49	3.25	4.17	2.58	4.25
1975	3.06	3.46	5.77	7.01	4.15	4.86	4.44	5.13	4.12	3.98	3.62	3.07	4.38
1976	3.18	4.41	5.75	5.09	5.32	5.45	4.11	4.30	4.38	3.88	2.84	2.38	4.19
1977	3.47	4.46	6.81	5.72	6.11	5.58	5.22	4.91	5.01	3.33	2.84	2.41	4.76
1978	3.14	4.59	5.46	6.58	6.54	3.23	3.70	4.27	3.89	4.60	2.62	1.96	4.08
1979	3.06	3.61	5.86	5.71	5.35	5.31	4.47	3.85	2.49	3.06	2.90	2.00	4.12
M. M.	3.42	4.63	6.24	6.79	6.08	5.48	4.7	4.74	4.17	3.98	3.38	2.65	4.68

Cuadro 7.2 Evaporación Media Mensual Ciudad Universitaria.

Tomada de Rojo Curiel (1994)

7.2 Levantamiento arreglo Schlumberger en la ENALLT

SCH ABMC						PROF	SCH ABCN					
A	B	M	N	V/I	Rhoa		A	B	M	N	V/I	Rhoa
-1.00	1.00	-0.5	0	12.59211	59.3389	0.2976	-1.0	1.0	0	0.5	12.8148	60.3885
-1.50	1.50	-0.5	0	4.33679	54.4978	0.5190	-1.5	1.5	0	0.5	3.8926	48.9164
-2.00	2.00	-0.5	0	1.90376	44.8563	0.7249	-2.0	2.0	0	0.5	1.5875	37.4054
-2.50	2.50	-0.5	0	1.03997	39.2060	0.9249	-2.5	2.5	0	0.5	0.8391	31.6343
-3.00	3.00	-0.5	0	0.69844	38.3988	1.1221	-3.0	3.0	0	0.5	0.5522	30.3612
-3.50	3.50	-0.5	0	0.49405	37.2502	1.3177	-3.5	3.5	0	0.5	0.3921	29.5642
-4.00	4.00	-0.5	0	0.34302	33.9458	1.5122	-4.0	4.0	0	0.5	0.2772	27.4313
-4.50	4.50	-0.5	0	0.25652	32.2356	1.7061	-4.5	4.5	0	0.5	0.2103	26.4285
-5.00	5.00	-0.5	0	0.21370	33.2319	1.8996	-5.0	5.0	0	0.5	0.1716	26.6823
-5.50	5.50	-0.5	0	0.01895	3.5728	2.0927	-5.5	5.5	0	0.5	0.0155	2.9248

Cuadro 7.3 Posiciones y datos observados en campo para los arreglos Schlumberger ABMC y ABCN. Se incluye una columna con la profundidad de penetración que se obtuvo con este arreglo (Tovar Jara, 2024).

7.3 Levantamiento arreglo Dipolo Dipolo en la ENALLT

Dipolo Dipolo BAMN				Dipolo Dipolo BAMN			
A	B	M	N	A	B	M	N
12.50	12.00	13.00	13.50	12.50	12.00	13.50	14.00
12.00	11.50	13.00	13.50	12.00	11.50	13.50	14.00
11.50	11.00	13.00	13.50	11.50	11.00	13.50	14.00
11.00	10.50	13.00	13.50	11.00	10.50	13.50	14.00
10.50	10.00	13.00	13.50	10.50	10.00	13.50	14.00
10.00	9.50	13.00	13.50	10.00	9.50	13.50	14.00
9.50	9.00	13.00	13.50	9.50	9.00	13.50	14.00
9.00	8.50	13.00	13.50	9.00	8.50	13.50	14.00
8.50	8.00	13.00	13.50	8.50	8.00	13.50	14.00
8.00	7.50	13.00	13.50	8.00	7.50	13.50	14.00
7.50	7.00	13.00	13.50	7.50	7.00	13.50	14.00
7.00	6.50	13.00	13.50	7.00	6.50	13.50	14.00
6.50	6.00	13.00	13.50	6.50	6.00	13.50	14.00
6.00	5.50	13.00	13.50	6.00	5.50	13.50	14.00
5.50	5.00	13.00	13.50	5.50	5.00	13.50	14.00

Cuadro 7.4 Fuentes BAMC y BACN para arreglo Dipolo Dipolo ENALLT. La letra C indica al electrodo central y sustituye al electrodo M o al N según corresponda (Tovar Jara, 2024).

7.4 Primer Levantamiento REPSA Schlumberger

Schlumberger ABMN								
AB/2	A	B	M	N	V/I SG1	Rhoa SG1	V/I SG2	Rhoa SG2
3	247	253	249	251	7.24E+00	90.9962	7.24E+00	90.9962
5	245	255	249	251	4.51E+00	169.8992	4.51E+00	169.8992
7	243	257	249	251	1.90E+00	143.1534	1.90E+00	143.1534
10	240	260	249	251	1.02E+00	157.9054	1.02E+00	157.9054
15	235	265	249	251	3.62E-01	127.2721	3.62E-01	127.2721
20	230	270	249	251	1.32E-01	82.5636	1.32E-01	82.5636
30	220	280	249	251	6.46E-02	91.1634	6.46E-02	91.1634
40	210	290	249	251	2.62E-02	65.7209	2.62E-02	65.7209
50	200	300	249	251	1.76E-02	69.0613	1.76E-02	69.0613
70	180	320	249	251	1.13E-02	87.0776	1.13E-02	87.0776
85	165	335	249	251	7.55E-03	85.7242	7.55E-03	85.7242
100	150	350	249	251	6.06E-03	95.1547	6.06E-03	95.1547
125	125	375	249	251	4.31E-03	105.8502	4.31E-03	105.8502
150	100	400	249	251	2.78E-03	98.3309	2.78E-03	98.3309
200	50	450	249	251	1.66E-03	104.5547	1.66E-03	104.5547
250	0	500	249	251	9.70E-04	95.2495	9.70E-04	95.2495

Cuadro 7.5 Datos Primer Levantamiento REPSA Schlumberger ABMN. Tabla que muestra los datos filtrados de Resistencia (V/I) y Resistividad Aparente (Rhoa) del Primer Levantamiento con el arreglo Schlumberger con Canal 1 ABMN (Tovar Jara, 2024).

Schlumberger BANM								
BA/2	A	B	M	N	V/I SG1	Rhoa SG1	V/I SG2	Rhoa SG2
3	253	247	249	251	7.24E+00	91.0260	7.24E+00	91.0260
5	255	245	249	251	4.53E+00	170.6519	4.53E+00	170.6519
7	257	243	249	251	1.91E+00	144.3079	1.91E+00	144.3079
10	260	240	249	251	1.01E+00	157.2096	1.01E+00	157.2096
15	265	235	249	251	3.62E-01	127.4641	3.62E-01	127.4641
20	270	230	249	251	1.32E-01	82.5656	1.32E-01	82.5656
30	280	220	249	251	6.46E-02	91.1693	6.46E-02	91.1693
40	290	210	249	251	2.62E-02	65.7523	2.62E-02	65.7523
50	300	200	249	251	1.76E-02	69.0713	1.76E-02	69.0713
70	320	180	249	251	1.14E-02	87.3823	1.14E-02	87.3823
85	335	165	249	251	7.53E-03	85.4537	7.53E-03	85.4537
100	350	150	249	251	5.97E-03	93.8448	5.97E-03	93.8448
125	375	125	249	251	4.23E-03	103.9244	4.23E-03	103.9244
150	400	100	249	251	2.78E-03	98.0811	2.78E-03	98.0811
200	450	50	249	251	1.64E-03	102.7515	1.64E-03	102.7515
250	500	0	249	251	9.45E-04	92.7288	9.45E-04	92.7288

Cuadro 7.6 Datos Primer Levantamiento REPSA Schlumberger BANM. Datos filtrados de Resistencia (V/I) y Resistividad Aparente (Rhoa) del Primer Levantamiento con el arreglo Schlumberger con Canal 2 ABMN (Tovar Jara, 2024).

7.5 Valores finales del Primer Levantamiento REPSA Dipolo Dipolo

A [m]	B [m]	M [m]	N [m]	V/I Filtro SG1	Rhoa_SG1	V/I Filtro SG2	Rhoa_SG2
0	8	492	496	-0.0020906	24142.8192	2.61E-03	-30183.75
50	58	442	446	-0.0006420	3737.8371	-1.63E-04	946.65
150	158	342	346	-0.0001598	107.5080	-9.90E-05	66.56
180	188	312	316	-0.0002321	49.9338	-3.66E-04	78.81
200	208	292	296	-0.0009319	66.3642	-7.99E-04	56.93
210	218	282	286	-0.0008964	29.9380	-1.01E-03	33.63
220	224	276	278	-0.0002397	15.6089	-2.44E-03	159.08
230	232	268	260	0.0084469	57.7536	5.06E-03	34.60
240	241	259	259.5	-0.0193568	800.2837	-2.24E-02	926.13
247	248	252	252.5	-0.0666771	43.6585	-5.97E-02	39.07

Cuadro 7.7 Datos Primer Levantamiento DD REPSA ABMN Canal 1. Datos finales de Fuente Izquierda ABMN empleados para el filtrado y la inversión geofísica (Tovar Jara, 2024).

DD Fuente Derecha Canal 1 BANM							
A [m]	B [m]	M [m]	N [m]	V/I Filtro SG1	Rhoa_SG1	V/I Filtro SG2	Rhoa_SG2
252.5	252	248	247	-5.99E-02	3.92E+01	-4.24E-02	27.74
259.5	259	241	240	-1.36E-03	5.63E+01	-1.60E-02	662.27
260	268	232	230	-4.34E-04	-2.97E+00	3.46E-03	23.67
278	276	224	220	-6.15E-04	4.00E+01	-1.73E-03	112.92
286	282	218	210	-1.35E-03	4.52E+01	-9.92E-04	33.12
296	292	208	200	-7.73E-04	5.51E+01	-8.31E-04	59.18
316	312	188	180	-2.38E-04	5.12E+01	-3.71E-04	79.82
346	342	158	150	-1.71E-04	1.15E+02	-8.73E-05	58.70
446	442	58	50	-2.50E-05	1.46E+02	-2.37E-04	1380.76
496	492	8	0	-2.20E-05	2.54E+02	1.83E-03	-21123.13

Cuadro 7.8 Datos Primer Levantamiento DD REPSA BANM Canal 1. Datos finales de Fuente Derecha BANM empleados para el filtrado y la inversión geofísica (Tovar Jara, 2024).

DD Fuente Izquierda Canal 2							
A [m]	B [m]	M [m]	N [m]	V/I Filtro SG1	Rhoa_SG1	V/I Filtro SG2	Rhoa_SG2
0	8	496	500	-0.0000020	2.37E+01	-1.80E-03	21285.88
50	58	446	450	-0.0000230	1.38E+02	-5.47E-04	3281.13
150	158	346	350	-0.0001650	1.18E+02	-1.19E-04	85.23
180	188	316	320	-0.0002160	5.09E+01	-2.72E-04	64.10
200	208	296	300	-0.0008120	6.59E+01	-9.02E-04	73.25
210	218	286	290	-0.0011580	4.57E+01	-8.03E-04	31.73
220	224	278	280	-0.0007700	5.58E+01	-2.92E-04	21.14
230	232	260	270	-0.0003970	2.34E+00	7.33E-03	-43.21
240	241	259.5	260	-0.0014420	6.45E+01	-1.68E-02	751.83
247	248	252.5	253	-0.0731790	6.50E+01	-5.78E-02	51.32

Cuadro 7.9 Datos Primer Levantamiento DD REPSA ABMN Canal 2. Datos finales de Fuente Izquierda ABMN empleados para el filtrado y la inversión geofísica (Tovar Jara, 2024).

DD Fuente Derecha Canal 2							
A [m]	B [m]	M [m]	N [m]	V/I Filtro SG1	Rhoa_SG1	V/I Filtro SG2	Rhoa_SG2
253	252.5	248	247	-4.73E-02	4.20E+01	-4.24E-02	37.65
260	259.5	241	240	-1.39E-02	6.21E+02	-1.60E-02	716.74
270	260	232	230	5.86E-03	-3.46E+01	3.46E-03	-20.42
280	278	224	220	-1.78E-04	1.29E+01	-1.73E-03	125.72
290	286	218	210	-9.19E-04	3.63E+01	-9.92E-04	39.17
300	296	208	200	-9.46E-04	7.68E+01	-8.31E-04	67.45
320	316	188	180	-2.48E-04	5.84E+01	-3.71E-04	87.43
350	346	158	150	-1.40E-04	1.00E+02	-8.73E-05	62.52
450	446	58	50	-5.64E-04	3.39E+03	-2.37E-04	1423.74
500	496	8	0	-1.50E-03	1.77E+04	1.83E-03	-21645.05

Cuadro 7.10 Datos Primer Levantamiento DD REPSA BANM Canal 2. Datos finales de Fuente Derecha BANM empleados para el filtrado y la inversión geofísica (Tovar Jara, 2024).

7.7 Primer Levantamiento. Segundas Diferencias de Potencial

Dipolo Dipolo Izquierda						
R1	R2	R SDP	K1	K2	K SDP	SDP
-8.46E-02	-7.32E-02	1.14E-02	-654.774	-888.622	-2488.141	-28.309
-2.31E-02	-2.52E-02	-2.09E-03	-4174.907	-4936.546	-27059.585	56.650
-1.02E-02	-7.85E-03	2.38E-03	-12972.930	-14563.949	-118752.202	-282.299
-1.52E-03	-1.44E-03	7.62E-05	-41343.862	-44744.439	-543998.184	-41.469
-5.45E-04	-3.97E-04	1.47E-04	6837.248	-5898.802	3166.725	0.466
-7.70E-04	-1.08E-01	-1.07E-01	-65119.389	-72501.345	-639565.432	68676.064
-1.40E-03	-1.16E-03	2.43E-04	-33399.259	-39492.367	-216476.678	-52.535
-6.97E-04	-8.12E-04	-1.15E-04	-71216.136	-81173.407	-580566.322	66.915
-2.65E-04	-2.16E-04	4.91E-05	-215179.571	-235692.597	-2472391.530	-121.323
-1.50E-04	-1.39E-04	1.09E-05	-401495.629	-432399.474	-5617634.322	-61.282
-1.71E-04	-1.65E-04	5.65E-06	-672634.696	-716049.935	-11093801.418	-62.647
-4.90E-05	-3.77E-05	1.12E-05	-1356225.607	-1425205.556	-28021190.237	-314.747
-3.44E-05	-3.24E-05	2.09E-06	-2393245.697	-2493680.843	-59421340.087	-124.053
-1.91E-05	-2.31E-05	-4.05E-06	-5822097.717	-6003114.714	-193079771.214	781.204
-5.25E-06	-2.10E-06	3.15E-06	-11548239.369	-11833400.163	-479220637.785	-1510.770

Cuadro 7.11 Datos para el cálculo de las Segundas Diferencias de Potencial (SDP) para la Fuente Izquierda. Se muestran los valores de resistencia de ambas fuentes (R1 y R2), la resistencia de las SDP (R SDP), el factor geométrico de ambos canales (K1 y K2) y el correspondiente a las SDP (K SDP) y, finalmente, el valor de las SDP para la Fuente Izquierda (Tovar Jara, 2024).

Dipolo Dipolo Derecha						
R1	R2	R SDP	K1	K2	K SDP	SDP
-9.85E-02	-5.99E-02	3.87E-02	-654.774	-888.622	-2488.141	-96.172
-2.44E-02	-2.39E-02	4.87E-04	-4174.907	-4936.546	-27059.585	-13.182
-7.67E-03	-1.04E-02	-2.73E-03	-12972.930	-14563.949	-118752.202	323.787
-1.58E-03	-1.36E-03	2.21E-04	-41343.862	-44744.439	-543998.184	-120.243
-2.02E-03	-4.34E-04	1.58E-03	6837.248	-5898.802	3166.725	5.018
-6.88E-04	-6.15E-04	7.29E-05	-65119.389	-72501.345	-639565.432	-46.616
-1.22E-03	-1.35E-03	-1.36E-04	-33399.259	-39492.367	-216476.678	29.451
-9.26E-04	-7.73E-04	1.54E-04	-71216.136	-81173.407	-580566.322	-89.152
-2.26E-04	-2.38E-04	-1.21E-05	-215179.571	-235692.597	-2472391.530	29.937
-1.64E-04	-1.49E-04	1.54E-05	-401495.629	-432399.474	-5617634.322	-86.705
-3.68E-04	-1.71E-04	1.98E-04	-672634.696	-716049.935	-11093801.418	-2192.094
-4.66E-05	-3.84E-05	8.13E-06	-1356225.607	-1425205.556	-28021190.237	-227.890
-2.19E-05	-3.75E-05	-1.56E-05	-2393245.697	-2493680.843	-59421340.087	926.835
-1.47E-05	-2.51E-05	-1.05E-05	-5822097.717	-6003114.714	-193079771.214	2022.278
-4.37E-05	-2.17E-05	2.20E-05	-11548239.369	-11833400.163	-479220637.785	-10538.648

Cuadro 7.12 Datos para el cálculo de las Segundas Diferencias de Potencial (SDP) para la Fuente Derecha. Se muestran los valores de resistencia de ambas fuentes (R1 y R2), la resistencia de las SDP (R SDP), el factor geométrico de ambos canales (K1 y K2) y el correspondiente a las SDP (K SDP) y, finalmente, el valor de las SDP para la Fuente Derecha (Tovar Jara, 2024).

7.8 Segundo Levantamiento en REPSA para el arreglo Dipolo Dipolo

Canal 1			
A	B	M	N
3	2	0.5	0
5	4	0.5	0
7	6	0.5	0
9	8	0.5	0
11	10	0.5	0
13	12	0.5	0
15	14	0.5	0
17	16	0.5	0
19	18	0.5	0
21	20	0.5	0
23	21	1	0
25	23	1	0
27	25	1	0
29	27	1	0
31	29	1	0
33	31	1	0
35	33	1	0
37	35	1	0
39	37	1	0
41	39	1	0
43	40	1.5	0
45	42	1.5	0
47	44	1.5	0
49	46	1.5	0
51	48	1.5	0
53	50	1.5	0
55	52	1.5	0
57	54	1.5	0
59	56	1.5	0
61	58	1.5	0
63	59	2	0
65	61	2	0
67	63	2	0
69	65	2	0
71	67	2	0
73	69	2	0
75	71	2	0
77	73	2	0
79	75	2	0
81	77	2	0
83	78	2.5	0
85	80	2.5	0
87	82	2.5	0
89	84	2.5	0
91	86	2.5	0
93	88	2.5	0
95	90	2.5	0
97	92	2.5	0
99	94	2.5	0
101	96	2.5	0
103	97	3	0
105	99	3	0
107	101	3	0
109	103	3	0
111	105	3	0
113	107	3	0
115	109	3	0
117	111	3	0
119	113	3	0
121	115	3	0

123	116	3.5	0
125	118	3.5	0
127	120	3.5	0
129	122	3.5	0
131	124	3.5	0
133	126	3.5	0
135	128	3.5	0
137	130	3.5	0
139	132	3.5	0
141	134	3.5	0
143	135	4	0
145	137	4	0
147	139	4	0
149	141	4	0
151	143	4	0
153	145	4	0
155	147	4	0
157	149	4	0
159	151	4	0
161	153	4	0
163	154	4.5	0
165	156	4.5	0
167	158	4.5	0
169	160	4.5	0
171	162	4.5	0
173	164	4.5	0
175	166	4.5	0
177	168	4.5	0
179	170	4.5	0
181	172	4.5	0
183	173	5	0
185	175	5	0
187	177	5	0
189	179	5	0
191	181	5	0
193	183	5	0
195	185	5	0
197	187	5	0
199	189	5	0
201	191	5	0
203	192	5.5	0
205	194	5.5	0
207	196	5.5	0
209	198	5.5	0
211	200	5.5	0
213	202	5.5	0
215	204	5.5	0
217	206	5.5	0
219	208	5.5	0
221	210	5.5	0
223	211	6	0
225	213	6	0
227	215	6	0
229	217	6	0
231	219	6	0
233	221	6	0
235	223	6	0
237	225	6	0
239	227	6	0
241	229	6	0
243	230	7.5	0

Cuadro 7.13 Posiciones de cada electrodo para el arreglo Dipolo Dipolo para el Canal 1. (Tovar Jara, 2024)

Canal 2			
A	B	M	N
3	2	0	-0.5
5	4	0	-0.5
7	6	0	-0.5
9	8	0	-0.5
11	10	0	-0.5
13	12	0	-0.5
15	14	0	-0.5
17	16	0	-0.5
19	18	0	-0.5
21	20	0	-0.5
23	21	0	-1
25	23	0	-1
27	25	0	-1
29	27	0	-1
31	29	0	-1
33	31	0	-1
35	33	0	-1
37	35	0	-1
39	37	0	-1
41	39	0	-1
43	40	0	-1.5
45	42	0	-1.5
47	44	0	-1.5
49	46	0	-1.5
51	48	0	-1.5
53	50	0	-1.5
55	52	0	-1.5
57	54	0	-1.5
59	56	0	-1.5
61	58	0	-1.5
63	59	0	-2
65	61	0	-2
67	63	0	-2
69	65	0	-2
71	67	0	-2
73	69	0	-2
75	71	0	-2
77	73	0	-2
79	75	0	-2
81	77	0	-2
83	78	0	-2.5
85	80	0	-2.5
87	82	0	-2.5
89	84	0	-2.5
91	86	0	-2.5
93	88	0	-2.5
95	90	0	-2.5
97	92	0	-2.5
99	94	0	-2.5
101	96	0	-2.5
103	97	0	-3
105	99	0	-3
107	101	0	-3
109	103	0	-3
111	105	0	-3
113	107	0	-3
115	109	0	-3
117	111	0	-3
119	113	0	-3
121	115	0	-3

123	116	0	-3.5
125	118	0	-3.5
127	120	0	-3.5
129	122	0	-3.5
131	124	0	-3.5
133	126	0	-3.5
135	128	0	-3.5
137	130	0	-3.5
139	132	0	-3.5
141	134	0	-3.5
143	135	0	-4
145	137	0	-4
147	139	0	-4
149	141	0	-4
151	143	0	-4
153	145	0	-4
155	147	0	-4
157	149	0	-4
159	151	0	-4
161	153	0	-4
163	154	0	-4.5
165	156	0	-4.5
167	158	0	-4.5
169	160	0	-4.5
171	162	0	-4.5
173	164	0	-4.5
175	166	0	-4.5
177	168	0	-4.5
179	170	0	-4.5
181	172	0	-4.5
183	173	0	-5
185	175	0	-5
187	177	0	-5
189	179	0	-5
191	181	0	-5
193	183	0	-5
195	185	0	-5
197	187	0	-5
199	189	0	-5
201	191	0	-5
203	192	0	-5.5
205	194	0	-5.5
207	196	0	-5.5
209	198	0	-5.5
211	200	0	-5.5
213	202	0	-5.5
215	204	0	-5.5
217	206	0	-5.5
219	208	0	-5.5
221	210	0	-5.5
223	211	0	-6
225	213	0	-6
227	215	0	-6
229	217	0	-6
231	219	0	-6
233	221	0	-6
235	223	0	-6
237	225	0	-6
239	227	0	-6
241	229	0	-6

Cuadro 7.14 Posiciones de cada electrodo para el arreglo Dipolo Dipolo para el Canal 2. (Tovar Jara, 2024)

Dipolo Dipolo BAMN								
DD IZQ BAMC					DD IZQ BACN			
V/I	SG1 V/I	Rhoa	SG1 Rhoa	PROF DD	V/I	SG1 V/I	Rhoa	SG1 Rhoa
6805.8498	5854.85544	32071.8118		0.2080	7713.7583	6537.0171	19897.88	
1843.8914	2695.60311	23171.0223	23271.213	0.3486	1715.7662	2791.1311	14118.37	14049.354
628.2425	277.572407	14802.6162	15221.9	0.4808	524.3875	68.787349	8827.33	8778.728
233.6419	278.938822	8808.0937	11147.775	0.6101	181.9720	238.89312	5559.93	7098.02
146.6249	145.995826	8061.1247	8579.387	0.7379	85.6178	90.845253	5561.28	5650.04
109.8894	108.512739	8285.4669	6607.96	0.8650	55.4490	55.433867	5860.72	4386.076
59.3780	64.6312828	5876.0571	5089.657	0.9916	32.6500	33.6982	4259.22	3391.283
32.2964	28.7799102	4058.4855	3983.115	1.1179	19.0069	19.912404	3019.43	2673.32
11.5299	14.8184332	1792.9960	3217.347	1.2439	15.7487	14.654275	1337.19	2202.48
12.7610	10.1907438	2405.3836	2707.883	1.3698	10.8160	11.472117	1883.00	1909.849
9.1255	10.2107915	2049.7942	2377.651	1.4955	7.9661	7.6788953	1641.63	1759.17
7.8001	7.56420115	2058.3870	2168.552	1.6212	5.3166	5.3673287	1652.66	1706.095
7.8463	8.22088124	2403.3685	2037.042	1.7468	4.2002	4.4357041	1923.29	1707.286
8.1972	7.40822442	2884.2635	1953.445	1.8724	4.7491	4.3665489	2350.02	1747.799
4.7473	5.5309921	1901.5344	1900.605	1.9979	3.8239	4.1077153	1504.76	1821.209

Cuadro 7.15 Arreglo DD para la Fuente Izquierda BAMN. Se incluyen sus dos canales BAMC y BACN con los valores Raw y los valores filtrados mediante una iteración de SG (SG1) tanto de los valores de Resistencia (V/I) como los de Resistividad aparente (Rhoa) (Tovar Jara, 2024).

Dipolo Dipolo BAMN								
DD DER BAMC					DD DER BACN			
V/I	SG1 V/I	Rhoa	SG1 Rhoa	PROF DD	V/I	SG1 V/I	Rhoa	SG1 Rhoa
7713.7583	6537.0171	58160.3671		0.2080	1726.5332	1525.7557	13017.7534	
1715.7662	2791.1311	46202.0447	46321.237	0.3486	625.4206	796.98892	16841.2869	16789.118
524.3875	68.7873	32948.2368	32815.712	0.4808	249.4747	185.22344	15674.9580	14554.824
181.9720	238.8931	21827.8521	23888.892	0.6101	104.9533	110.47298	12589.3314	13474.397
85.6178	90.8453	17380.0101	19521.588	0.7379	57.1360	57.812228	11598.3282	13014.779
55.4490	55.4339	17559.1845	17169.494	0.8650	40.9583	40.349665	12970.3615	12773.436
32.6500	33.6982	15204.9277	15565.486	0.9916	26.6546	27.036316	12412.9218	12581.444
19.0069	19.9124	12445.2033	14322.517	1.1179	16.6440	17.479976	10898.0377	12402.396
15.7487	14.6543	13994.6070	13365.352	1.2439	14.2979	13.386589	12705.4068	12249.685
10.8160	11.4721	12675.8675	12685.103	1.3698	10.3428	10.882453	12121.2671	12144.826
7.9661	7.6789	12024.6646	12259.618	1.4955	7.8861	7.6169648	11903.7848	12105.64
5.3166	5.3673	10132.8544	12056.141	1.6212	5.3401	5.3996503	10177.7184	12140.829
4.2002	4.4357	9937.3805	12032.863	1.7468	4.2785	4.5046369	10122.5933	12250.747
4.7491	4.3665	13745.4129	12147.372	1.8724	4.8592	4.4876805	14064.2015	12430.831
3.8239	4.1077	13367.2696	12364.392	1.9979	3.9996	4.2715365	13981.6845	12673.505

Cuadro 7.16 Arreglo DD para la Fuente Derecha BAMN. Se incluyen sus dos canales BAMC y BACN con los valores Raw y los filtrados SG1 tanto de Resistencia (V/I) como de Resistividad aparente (Rhoa) (Tovar Jara, 2024).

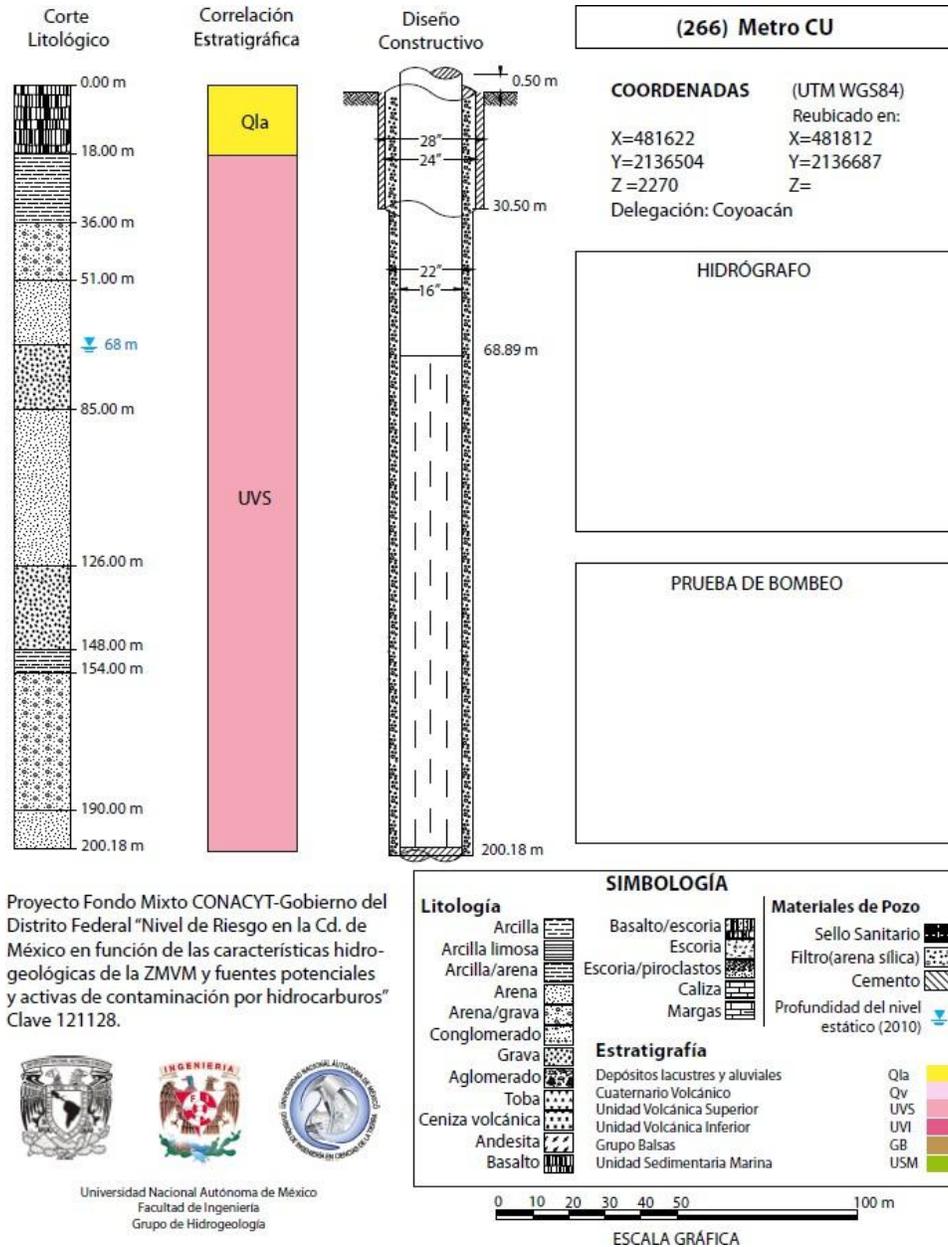
7.9 Datos para las SDP con el arreglo DD Segundo Levantamiento

Canal 1					Canal 2					SDP			
K_Canal2	Vp_Canal2	In_Canal2	V/L_Canal2	Rhoa_Canal 2	K_Canal1	Vp_Canal1	In_Canal1	V/L_Canal1	Rhoa_Canal1	R2	K2	V2	Rhoa_SDP
-1.20E+02	-1.84E+01	9.45E+00	-1.95E+00	2.34E+02	-6.28E+01	-4.08E+01	9.07E+02	-4.50E-02	2.83E+00	1.90E+00	1.32E+02	1.90E+00	2.51E+02
-6.55E+02	-1.45E+01	3.95E+01	-3.67E-01	2.40E+02	-4.66E+02	-2.31E+01	1.35E+03	-1.70E-02	7.93E+00	3.50E-01	1.61E+03	3.50E-01	5.64E+02
-1.91E+03	-1.38E+01	1.50E+02	-9.20E-02	1.75E+02	-1.51E+03	-1.88E+01	8.34E+02	-2.26E-02	3.41E+01	6.94E-02	7.26E+03	6.94E-02	5.04E+02
-4.17E+03	-1.52E+01	4.05E+02	-3.75E-02	1.57E+02	-3.50E+03	-1.91E+01	1.00E+03	-1.91E-02	6.67E+01	1.84E-02	2.15E+04	1.84E-02	3.96E+02
-7.76E+03	-1.54E+01	6.94E+02	-2.22E-02	1.73E+02	-6.73E+03	-1.85E+01	1.02E+03	-1.81E-02	1.22E+02	4.13E-03	5.03E+04	4.13E-03	2.08E+02
-1.30E+04	-1.12E+01	1.04E+03	-1.07E-02	1.39E+02	-1.15E+04	-1.30E+01	1.21E+03	-1.07E-02	1.23E+02	1.60E-05	1.01E+05	1.60E-05	1.62E+00
-2.01E+04	-6.16E+00	9.76E+02	-6.31E-03	1.27E+02	-1.81E+04	-6.86E+00	1.28E+03	-5.37E-03	9.73E+01	9.40E-04	1.84E+05	9.40E-04	1.73E+02
-2.95E+04	-2.97E+00	8.62E+02	-3.44E-03	1.01E+02	-2.69E+04	-3.18E+00	1.24E+03	-2.56E-03	6.88E+01	8.82E-04	3.09E+05	8.82E-04	2.72E+02
-4.13E+04	-1.78E+00	8.87E+02	-2.01E-03	8.29E+01	-3.81E+04	-1.83E+00	1.32E+03	-1.38E-03	5.27E+01	6.22E-04	4.89E+05	6.22E-04	3.04E+02
-5.61E+04	-1.33E+00	8.99E+02	-1.48E-03	8.30E+01	-5.21E+04	-1.34E+00	1.22E+03	-1.10E-03	5.71E+01	3.84E-04	7.38E+05	3.84E-04	2.84E+02
-1.78E+04	-2.84E+00	9.42E+02	-3.01E-03	5.36E+01	-1.55E+04	-3.49E+00	1.18E+03	-2.95E-03	4.58E+01	6.52E-05	1.21E+05	6.52E-05	7.92E+00
-2.30E+04	-1.93E+00	1.03E+03	-1.87E-03	4.30E+01	-2.03E+04	-2.36E+00	1.17E+03	-2.01E-03	4.08E+01	-1.42E-04	1.72E+05	-1.42E-04	-2.45E+01
-2.91E+04	-1.17E+00	9.50E+02	-1.23E-03	3.58E+01	-2.59E+04	-1.29E+00	1.02E+03	-1.26E-03	3.27E+01	-3.10E-05	2.38E+05	-3.10E-05	-7.36E+00
-3.63E+04	-1.06E+00	9.96E+02	-1.06E-03	3.86E+01	-3.26E+04	-1.19E+00	1.02E+03	-1.17E-03	3.80E+01	-1.04E-04	3.20E+05	-1.04E-04	-1.34E+01
-4.44E+04	-1.01E+00	9.55E+02	-1.05E-03	4.68E+01	-4.02E+04	-1.15E+00	1.14E+03	-1.01E-03	4.06E+01	4.37E-05	4.22E+05	4.37E-05	1.84E+01
-5.38E+04	-1.02E+00	9.41E+02	-1.08E-03	5.83E+01	-4.90E+04	-1.17E+00	7.04E+02	-1.66E-03	8.12E+01	-5.74E-04	5.46E+05	-5.74E-04	-3.13E+02
-6.44E+04	-8.97E-01	9.69E+02	-9.25E-04	5.96E+01	-5.89E+04	-1.02E+00	8.63E+02	-1.18E-03	6.96E+01	-2.56E-04	6.97E+05	-2.56E-04	-1.79E+02
-7.62E+04	-7.58E-01	1.07E+03	-7.06E-04	5.38E+01	-7.01E+04	-8.01E-01	3.93E+02	-2.04E-03	1.43E+02	-1.33E-03	8.76E+05	-1.33E-03	-1.17E+03
-8.95E+04	-4.25E-01	1.27E+03	-3.34E-04	2.99E+01	-8.27E+04	-4.48E-01	2.44E+02	-1.83E-03	1.52E+02	-1.50E-03	1.09E+06	-1.50E-03	-1.63E+03
-1.04E+05	-3.39E-01	1.17E+03	-2.91E-04	3.03E+01	-9.67E+04	-3.86E-01	2.19E+02	-1.77E-03	1.71E+02	-1.47E-03	1.34E+06	-1.47E-03	-1.97E+03
-5.25E+04	-7.82E-01	1.01E+03	-7.73E-04	4.06E+01	-4.71E+04	-7.25E-01	2.19E+02	-3.31E-03	1.56E+02	-2.54E-03	4.57E+05	-2.54E-03	-1.16E+03
-6.03E+04	-6.82E-01	8.69E+02	-7.85E-04	4.74E+01	-5.44E+04	-5.96E-01	2.26E+02	-2.64E-03	1.43E+02	-1.85E-03	5.52E+05	-1.85E-03	-1.02E+03
-6.89E+04	-7.35E-01	8.73E+02	-8.42E-04	5.80E+01	-6.24E+04	-6.68E-01	2.28E+02	-2.93E-03	1.83E+02	-2.08E-03	6.61E+05	-2.08E-03	-1.38E+03
-7.82E+04	-4.58E-01	7.24E+02	-6.33E-04	4.95E+01	-7.11E+04	-3.72E-01	1.87E+02	-1.99E-03	1.41E+02	-1.35E-03	7.86E+05	-1.35E-03	-1.06E+03
-8.84E+04	-5.06E-01	7.35E+02	-6.89E-04	6.09E+01	-8.07E+04	-4.29E-01	2.03E+02	-2.12E-03	1.71E+02	-1.43E-03	9.27E+05	-1.43E-03	-1.32E+03
-9.94E+04	-5.25E-01	8.68E+02	-6.05E-04	6.01E+01	-9.11E+04	-4.20E-01	1.20E+02	-3.49E-03	3.17E+02	-2.88E-03	1.09E+06	-2.88E-03	-3.13E+03
-1.11E+05	-5.20E-01	8.36E+02	-6.22E-04	6.92E+01	-1.02E+05	-4.77E-01	2.82E+02	-1.69E-03	1.73E+02	-1.07E-03	1.27E+06	-1.07E-03	-1.36E+03
-1.42E+05	-5.34E-01	1.32E+03	-4.04E-04	5.01E+01	-1.14E+05	-4.67E-01	1.76E+02	-2.65E-03	3.04E+02	-2.25E-03	1.47E+06	-2.25E-03	-3.30E+03
-1.38E+05	-4.72E-01	1.19E+03	-3.96E-04	5.46E+01	-1.27E+05	-4.20E-01	1.78E+02	-2.37E-03	3.01E+02	-1.97E-03	1.69E+06	-1.97E-03	-3.33E+03
-1.52E+05	-3.24E-01	9.95E+02	-3.26E-04	4.97E+01	-1.41E+05	-2.81E-01	2.80E+02	-1.00E-03	1.42E+02	-6.79E-04	1.94E+06	-6.79E-04	-1.32E+03
-9.33E+04	-5.44E-01	9.37E+02	-5.80E-04	5.42E+01	-8.46E+04	-5.25E-01	5.35E+02	-9.82E-04	8.30E+01	-4.01E-04	9.01E+05	-4.01E-04	-3.62E+02
-1.03E+05	-4.29E-01	7.77E+02	-5.52E-04	5.67E+01	-9.33E+04	-3.86E-01	6.53E+02	-5.91E-04	5.51E+01	-3.87E-05	1.03E+06	-3.87E-05	-3.97E+01
-1.13E+05	-3.96E-01	7.48E+02	-5.29E-04	5.96E+01	-1.03E+05	-3.77E-01	4.38E+02	-8.60E-04	8.83E+01	-3.31E-04	1.16E+06	-3.31E-04	-3.84E+02
-1.23E+05	-4.39E-01	8.73E+02	-5.03E-04	6.20E+01	-1.13E+05	-4.10E-01	5.71E+02	-7.18E-04	8.09E+01	-2.16E-04	1.31E+06	-2.16E-04	-2.83E+02
-1.34E+05	-2.91E-01	7.54E+02	-3.86E-04	5.19E+01	-1.23E+05	-1.96E-01	4.79E+02	-4.09E-04	5.04E+01	-2.36E-05	1.48E+06	-2.36E-05	-3.48E+01
-1.46E+05	-4.15E-01	8.21E+02	-5.05E-04	7.39E+01	-1.34E+05	-3.44E-01	5.05E+02	-6.81E-04	9.16E+01	-1.76E-04	1.66E+06	-1.76E-04	-2.91E+02
-1.59E+05	-3.87E-01	7.76E+02	-4.99E-04	7.93E+01	-1.46E+05	-3.44E-01	1.67E+02	-2.06E-03	3.02E+02	-1.57E-03	1.85E+06	-1.57E-03	-2.90E+03
-1.72E+05	-3.01E-01	8.47E+02	-3.55E-04	6.12E+01	-1.59E+05	-2.29E-01	1.53E+02	-1.49E-03	2.37E+02	-1.14E-03	2.06E+06	-1.14E-03	-2.35E+03
-1.86E+05	-2.15E-01	6.44E+02	-3.34E-04	6.21E+01	-1.72E+05	-1.57E-01	3.50E+02	-4.48E-04	7.72E+01	-1.14E-04	2.29E+06	-1.14E-04	-2.62E+02
-2.01E+05	-2.58E-01	9.29E+02	-2.78E-04	5.58E+01	-1.86E+05	-1.29E-01	4.73E+02	-2.73E-04	5.08E+01	5.01E-06	2.54E+06	5.01E-06	1.27E+01
-9.33E+04	-2.86E-01	7.37E+02	-3.88E-04	5.31E+01	-1.25E+05	-2.43E-01	4.06E+02	-5.99E-04	7.48E+01	-2.11E-04	1.40E+06	-2.11E-04	-2.96E+02
-1.47E+05	-3.58E-01	1.02E+03	-3.51E-04	5.17E+01	-1.34E+05	-3.44E-01	4.29E+02	-8.02E-04	1.08E+02	-4.51E-04	1.55E+06	-4.51E-04	-6.96E+02
-1.58E+05	-2.86E-01	8.56E+02	-3.34E-04	5.29E+01	-1.45E+05	-2.15E-01	2.60E+02	-8.27E-04	1.20E+02	-4.93E-04	1.70E+06	-4.93E-04	-8.38E+02
-1.69E+05	-3.44E-01	8.52E+02	-4.04E-04	6.84E+01	-1.55E+05	-3.72E-01	1.50E+02	-2.49E-03	3.86E+02	-2.08E-03	1.87E+06	-2.08E-03	-3.89E+03
-1.81E+05	-2.86E-01	6.36E+02	-4.50E-04	8.16E+01	-1.67E+05	-2.58E-01	6.36E+02	-4.06E-04	6.76E+01	4.41E-05	2.05E+06	4.41E-05	9.02E+01
-1.94E+05	-2.72E-01	6.84E+02	-3.98E-04	7.71E+01	-1.78E+05	-2.43E-01	6.84E+02	-3.55E-04	6.34E+01	4.24E-05	2.24E+06	4.24E-05	9.50E+01
-2.07E+05	-1.86E-01	7.09E+02	-2.62E-04	5.42E+01	-1.91E+05	-5.70E-02	7.09E+02	-8.04E-05	1.53E+01	1.82E-04	2.44E+06	1.82E-04	4.45E+02
-2.20E+05	-2.58E-01	7.71E+02	-3.35E-04	7.37E+01	-2.03E+05	-2.15E-01	7.71E+02	-2.79E-04	5.67E+01	5.58E-05	2.66E+06	5.58E-05	1.48E+02
-2.34E+05	-3.01E-01	8.34E+02	-3.61E-04	8.46E+01	-2.17E+05	-2.15E-01	8.34E+02	-2.58E-04	5.59E+01	1.03E-04	2.90E+06	1.03E-04	2.99E+02
-2.49E+05	-3.01E-01	8.63E+02	-3.49E-04	8.68E+01	-2.31E+05	-2.86E-01	8.63E+02	-3.31E-04	7.64E+01	1.74E-05	3.14E+06	1.74E-05	5.46E+01
-1.82E+05	-3.15E-01	6.93E+02	-4.54E-04	8.28E+01	-1.66E+05	-3.01E-01	6.93E+02	-4.34E-04	7.23E+01	2.02E-05	1.93E+06	2.02E-05	3.90E+01
-1.93E+05	-3.29E-01	8.57E+02	-3.84E-04	7.41E+01	-1.77E+05	-2.58E-01	8.57E+02	-3.01E-04	5.32E+01	8.28E-05	2.09E+06	8.28E-05	1.73E+02
-2.05E+05	-3.44E-01	8.61E+02	-4.00E-04	8.17E+01	-1.88E+05	-3.87E-01	8.61E+02	-4.50E-04	8.43E+01	-5.00E-05	2.26E+06	-5.00E-05	-1.13E+02
-2.16E+05	-2.29E-01	6.54E+02	-3.50E-04	7.58E+01	-1.99E+05	-1.72E-01	6.54E+02	-2.63E-04	5.23E+01	8.72E-05	2.44E+06	8.72E-05	2.13E+02
-2.29E+05	-2.58E-01	9.08E+02	-2.84E-04	6.50E+01	-2.10E+05	-1.57E-01	9.08E+02	-1.73E-04	3.64E+01	1.11E-04	2.63E+06	1.11E-04	2.92E+02
-2.41E+05	-3.29E-01	7.50E+02	-4.38E-04	1.06E+02	-2.23E+05	-4.44E-01	7.50E+02	-5.92E-04	1.32E+02	-1.53E-04	2.83E+06	-1.53E-04	-4.34E+02
-2.55E+05	-2.15E-01	7.15E+02	-3.01E-04	7.66E+01	-2.35E+05	-1.72E-01	7.15E+02	-2.40E-04	5.65E+01	6.01E-05	3.04E+06	6.01E-05	1.83E+02
-2.83E+05	-1.86E-01	8.80E+02	-2.11E-04	5.98E+01	-2.62E+05	-1.15E-01	8.80E+02	-1.31E-04	3.42E+01	8.07E-05	3.50E+06	8.07E-05	2.82E+02
-2.97E+05	-2.15E-01	1.00E+03	-2.14E-04	6.36E+01	-2.76E+05	-1.00E-01	1.00E+03	-9.95E-05	2.74E+01	1.14E-04	3.75E+06	1.14E-04	4.29E+02
-2.28E+05	-4.15E-01	1.17E+03	-3.55E-04	8.11E+01	-2.09E+05	-3.44E-01	1.17E+03	-2.95E-04	6.15E+01	6.08E-05	2.48E+06	6.08E-05	1.51E+02
-2.40E+05	-4.15E-01	1.08E+03	-3.83E-04	9.17E+01	-2.20E+05	-3.72E-01	1.08E+03	-3.43E-04	7.54E+01	3.97E-05	2.65E+06	3.97E-05	1.05E+02
-2.51E+05	-3.01E-01	8.63E+02	-3.49E-04	8.77E+01	-2.31E+05	-2.00E-01	8.63E+02	-2.32E-04	5.35E+01	1.17E-04	2.83E+06	1.17E-04	3.31E+02
-2.64E+05	-3.01E-01	9.73E+02	-3.09E-04	8.15E+01	-2.43E+05	-1.57E-01	9.73E+02	-1.61E-04	3.91E+01	1.48E-04	3.02E+06	1.48E-04	4.46E+02
-2.76E+05	-3.29E-01	9.15E+02	-3.59E-04	9.93E+01	-2.54E+05	-2.72E-01	9.15E+02	-2.97E-04	7.56E+01	6.23E-05	3.22E+06	6.23E-05	2.00E+02
-2.89E+05	-3.58E-01	8.92E+02	-4.01E-04	1.16E+02	-2.67E+05	-4.44E-01	8.92E+02	-4.98E-04	1.33E+02				

-2.75E+05	-3.58E-01	1.07E+03	-3.34E-04	9.16E+01	-2.52E+05	-2.86E-01	1.07E+03	-2.66E-04	6.71E+01	6.71E-05	3.04E+06	6.71E-05	2.04E+02
-2.87E+05	-2.58E-01	7.42E+02	-3.48E-04	9.97E+01	-2.63E+05	-1.72E-01	7.42E+02	-2.32E-04	6.10E+01	1.16E-04	3.22E+06	1.16E-04	3.73E+02
-2.99E+05	-3.01E-01	8.76E+02	-3.44E-04	1.03E+02	-2.75E+05	-2.86E-01	8.76E+02	-3.27E-04	8.97E+01	1.71E-05	3.41E+06	1.71E-05	5.84E+01
-3.11E+05	-2.58E-01	7.59E+02	-3.40E-04	1.06E+02	-2.87E+05	-1.43E-01	7.59E+02	-1.89E-04	5.40E+01	1.52E-04	3.60E+06	1.52E-04	5.46E+02
-3.24E+05	-3.01E-01	1.01E+03	-2.99E-04	9.70E+01	-2.99E+05	-1.57E-01	1.01E+03	-1.56E-04	4.66E+01	1.43E-04	3.81E+06	1.43E-04	5.45E+02
-3.37E+05	-2.00E-01	7.00E+02	-2.86E-04	9.64E+01	-3.11E+05	-1.43E-01	7.00E+02	-2.04E-04	6.36E+01	8.15E-05	4.02E+06	8.15E-05	3.27E+02
-3.51E+05	-2.58E-01	8.96E+02	-2.88E-04	1.01E+02	-3.24E+05	-2.43E-01	8.96E+02	-2.71E-04	8.79E+01	1.67E-05	4.24E+06	1.67E-05	7.09E+01
-3.65E+05	-2.58E-01	9.07E+02	-2.84E-04	1.04E+02	-3.37E+05	-1.86E-01	9.07E+02	-2.05E-04	6.92E+01	7.94E-05	4.47E+06	7.94E-05	3.55E+02
-3.79E+05	-3.87E-01	1.35E+03	-2.86E-04	1.08E+02	-3.51E+05	-2.86E-01	1.35E+03	-2.11E-04	7.42E+01	7.46E-05	4.71E+06	7.46E-05	3.51E+02
-3.94E+05	-2.15E-01	8.34E+02	-2.58E-04	1.02E+02	-3.65E+05	-2.00E-01	8.34E+02	-2.40E-04	8.75E+01	1.80E-05	4.95E+06	1.80E-05	8.91E+01
-3.22E+05	-3.15E-01	1.00E+03	-3.15E-04	1.01E+02	-2.95E+05	-8.59E-01	1.00E+03	-8.58E-04	2.53E+02	-5.44E-04	3.61E+06	-5.44E-04	-1.96E+03
-3.34E+05	-2.58E-01	1.02E+03	-2.53E-04	8.43E+01	-3.07E+05	-2.72E-01	1.02E+03	-2.66E-04	8.17E+01	-1.37E-05	3.80E+06	-1.37E-05	-5.21E+01
-3.46E+05	-2.86E-01	1.21E+03	-2.36E-04	8.17E+01	-3.19E+05	-2.86E-01	1.21E+03	-2.36E-04	7.52E+01	0.00E+00	3.99E+06	0.00E+00	0.00E+00
-3.59E+05	-3.01E-01	1.28E+03	-2.36E-04	8.46E+01	-3.31E+05	-2.29E-01	1.28E+03	-1.79E-04	5.93E+01	5.64E-05	4.19E+06	5.64E-05	2.36E+02
-3.72E+05	-3.01E-01	1.24E+03	-2.42E-04	9.02E+01	-3.43E+05	-4.29E-01	1.24E+03	-3.46E-04	1.19E+02	-1.03E-04	4.40E+06	-1.03E-04	-4.54E+02
-3.85E+05	-3.29E-01	1.32E+03	-2.48E-04	9.58E+01	-3.56E+05	-3.58E-01	1.32E+03	-2.70E-04	9.62E+01	-2.19E-05	4.62E+06	-2.19E-05	-1.01E+02
-3.99E+05	-3.15E-01	1.22E+03	-2.58E-04	1.03E+02	-3.69E+05	-1.86E-01	1.22E+03	-1.52E-04	5.61E+01	1.06E-04	4.84E+06	1.06E-04	5.11E+02
-4.13E+05	-2.72E-01	1.18E+03	-2.30E-04	9.50E+01	-3.82E+05	-1.29E-01	1.18E+03	-1.09E-04	4.17E+01	1.21E-04	5.07E+06	1.21E-04	6.13E+02
-4.28E+05	-2.72E-01	1.17E+03	-2.32E-04	9.93E+01	-3.96E+05	-3.15E-01	1.17E+03	-2.69E-04	1.06E+02	-3.67E-05	5.31E+06	-3.67E-05	-1.95E+02
-4.42E+05	-1.86E-01	1.02E+03	-1.82E-04	8.06E+01	-4.10E+05	-1.72E-01	1.02E+03	-1.68E-04	6.90E+01	1.37E-05	5.56E+06	1.37E-05	7.62E+01
-3.69E+05	-2.43E-01	1.02E+03	-2.39E-04	8.82E+01	-3.39E+05	-1.15E-01	1.02E+03	-1.13E-04	3.84E+01	1.26E-04	4.19E+06	1.26E-04	5.28E+02
-3.81E+05	-2.58E-01	1.14E+03	-2.27E-04	8.64E+01	-3.51E+05	-4.87E-01	1.14E+03	-4.28E-04	1.50E+02	-2.01E-04	4.38E+06	-2.01E-04	-8.82E+02
-3.94E+05	-1.15E-01	7.04E+02	-1.63E-04	6.43E+01	-3.63E+05	-3.15E-01	7.04E+02	-4.47E-04	1.62E+02	-2.84E-04	4.58E+06	-2.84E-04	-1.30E+03
-4.07E+05	-1.86E-01	8.63E+02	-2.16E-04	8.77E+01	-3.75E+05	-1.43E-01	8.63E+02	-1.66E-04	6.21E+01	4.98E-05	4.78E+06	4.98E-05	2.38E+02
-4.20E+05	-7.20E-02	3.93E+02	-1.83E-04	7.70E+01	-3.88E+05	-2.15E-01	3.93E+02	-5.48E-04	2.12E+02	-3.64E-04	5.00E+06	-3.64E-04	-1.82E+03
-4.47E+05	-7.20E-02	2.19E+02	-3.29E-04	1.47E+02	-4.13E+05	-3.15E-01	2.19E+02	-1.44E-03	5.96E+02	-1.11E-03	5.44E+06	-1.11E-03	-6.04E+03
-4.62E+05	-4.30E-02	2.19E+02	-1.97E-04	9.07E+01	-4.27E+05	-2.00E-01	2.19E+02	-9.14E-04	3.90E+02	-7.18E-04	5.67E+06	-7.18E-04	-4.07E+03
-4.16E+05	-2.90E-02	1.87E+02	-1.55E-04	6.45E+01	-3.83E+05	-1.29E-01	1.87E+02	-6.89E-04	2.64E+02	-5.34E-04	4.77E+06	-5.34E-04	-2.55E+03
-4.29E+05	-8.60E-02	2.03E+02	-4.24E-04	1.82E+02	-3.95E+05	-2.00E-01	2.03E+02	-9.86E-04	3.89E+02	-5.62E-04	4.97E+06	-5.62E-04	-2.79E+03
-4.42E+05	-2.90E-02	1.20E+02	-2.41E-04	1.06E+02	-4.07E+05	-1.43E-01	1.20E+02	-1.19E-03	4.83E+02	-9.46E-04	5.17E+06	-9.46E-04	-4.89E+03
-4.55E+05	-4.30E-02	2.82E+02	-1.53E-04	6.94E+01	-4.19E+05	-2.90E-02	2.82E+02	-1.03E-04	4.32E+01	4.97E-05	5.38E+06	4.97E-05	2.67E+02
-5.10E+05	-7.20E-02	5.35E+02	-1.35E-04	6.86E+01	-4.72E+05	-5.70E-02	5.35E+02	-1.07E-04	5.03E+01	2.81E-05	6.28E+06	2.81E-05	1.76E+02
-5.24E+05	-8.60E-02	6.53E+02	-1.32E-04	6.90E+01	-4.85E+05	-5.70E-02	6.53E+02	-8.72E-05	4.23E+01	4.44E-05	6.52E+06	4.44E-05	2.89E+02
-5.39E+05	-1.00E-01	4.38E+02	-2.28E-04	1.23E+02	-4.99E+05	-2.29E-01	4.38E+02	-5.22E-04	2.61E+02	-2.94E-04	6.77E+06	-2.94E-04	-1.99E+03
-4.64E+05	-1.15E-01	5.71E+02	-2.02E-04	9.35E+01	-4.27E+05	-8.60E-02	5.71E+02	-1.51E-04	6.43E+01	5.08E-05	5.35E+06	5.08E-05	2.72E+02
-4.77E+05	-8.60E-02	4.79E+02	-1.80E-04	8.56E+01	-4.39E+05	-1.86E-01	4.79E+02	-3.88E-04	1.70E+02	-2.09E-04	5.56E+06	-2.09E-04	-1.16E+03
-4.90E+05	-1.43E-01	5.05E+02	-2.83E-04	1.39E+02	-4.51E+05	-3.44E-01	5.05E+02	-6.81E-04	3.07E+02	-3.98E-04	5.76E+06	-3.98E-04	-2.29E+03
-5.03E+05	-2.90E-02	1.67E+02	-1.74E-04	8.75E+01	-4.64E+05	-1.00E-01	1.67E+02	-6.00E-04	2.78E+02	-4.26E-04	5.97E+06	-4.26E-04	-2.55E+03
-5.16E+05	-1.40E-02	1.53E+02	-9.13E-05	4.71E+01	-4.77E+05	-1.72E-01	1.53E+02	-1.12E-03	5.35E+02	-1.03E-03	6.19E+06	-1.03E-03	-6.38E+03
-5.30E+05	-1.15E-01	3.50E+02	-3.28E-04	1.74E+02	-4.90E+05	-5.87E-01	3.50E+02	-1.68E-03	8.21E+02	-1.35E-03	6.41E+06	-1.35E-03	-8.65E+03
-5.44E+05	-1.00E-01	4.73E+02	-2.12E-04	1.15E+02	-5.03E+05	-1.72E-01	4.73E+02	-3.64E-04	1.83E+02	-1.52E-04	6.64E+06	-1.52E-04	-1.01E+03
-5.58E+05	-1.15E-01	4.06E+02	-2.84E-04	1.58E+02	-5.16E+05	-3.72E-01	4.06E+02	-9.17E-04	4.74E+02	-6.34E-04	6.88E+06	-6.34E-04	-4.36E+03
-5.87E+05	-1.15E-01	2.60E+02	-4.42E-04	2.60E+02	-5.44E+05	-3.01E-01	2.60E+02	-1.16E-03	6.30E+02	-7.15E-04	7.37E+06	-7.15E-04	-5.27E+03

Cuadro 7.17 Datos SDP Segundo Levantamiento REPSA. Tabla que muestra los datos empleados para el cálculo de las Segundas Diferencias de Potencial (SDP) Segundo Levantamiento REPSA (Tovar Jara, 2024).

7.10 Pozo 266 Metro CU



Pozo 266 Metro CU. Tomado de CONACyT-ICyTDF, 2012, Nivel de riesgo en la Ciudad de México en función de las características hidrogeológicas de la ZMCM y de fuentes potenciales y activas de contaminación por hidrocarburos. Proyecto FOMIX-CONACyT-GDF, clave 121128: Grupo de Hidrogeología, Facultad de Ingeniería, UNAM, reporte técnico, 176.

Referencias

- Carrillo Trueba, C. (2009). El Pedregal de San Ángel. Ciencias, (042). Recuperado a partir de <https://www.revistas.unam.mx/index.php/cns/article/view/11502>
- CONAGUA. (2023). Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Cd. de México (0901), Ciudad de México. [Archivo PDF]. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/cmdx/DR_0901.pdf
- CONACyT-ICyTDF. (2012). Nivel de riesgo en la Ciudad de México en función de las características hidrogeológicas en la ZMCM y de fuentes potenciales y activas de contaminación por hidrocarburos. Proyecto FOMIX-CONCACyT-GDF, clave 121128: Grupo de Hidrogeología, Facultad de Ingeniería, UNAM, reporte técnico, 176.
- Curiel Rojo, A. (1993). Plan de manejo Reserva Ecológica El Pedregal de San Ángel. http://www.repsa.unam.mx/documentos/Rojo-Curiel_1994_Plan_de_manejo.pdf
- Dipole-Dipole Array: Electrical Resistivity Methods, Part 3. (2017). Advanced Geosciences INC. <https://www.agiusa.com/dipole-dipole%E2%80%8B-%E2%80%8Barray%E2%80%8B>
- Dirección de Desarrollo Académico, Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA). Estudio vulcanológico de la porción sur de la Sierra de las Cruces en su intersección con el campo volcánico Chichinautzin, sur de la Cuenca de México, Proyectos Universitarios PAPIIT (PAPIIT). En Portal de datos abiertos UNAM (en línea), México, Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <http://datosabiertos.unam.mx/DGAPA:PAPIIT:IN107409>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (1997). Carta Geológico Minera. Ciudad de México E14-2, Edo. de México, Tlaxcala, Puebla, Hidalgo, Morelos, Esc. 1:250,000. [Archivo PDF].
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2024). Geografía y medio ambiente. Provincias Fisiográficas de México. Tomada y modificada de: <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/>
- Kalton, G., Flores-Cervantes, I. (2003). Weighting Methods. [Archivo PDF]. Journal of Official Statistics, 19(2), 81-97. <https://www.scb.se/contentassets/ca21efb41fee47d293bbee5bf7be7fb3/weighting-methods.pdf>
- Kearey, P., Brooks, M. (2013). An Introduction to Geophysical Exploration. Wiley Blackwell.
- Kunetz, G. (1966). Principles of Direct Current. Resistivity Prospecting. Gebrüder Borntraeger.
- López González, A. E (2014). Fuentes enfocadas en la polarización inducida y resistividad eléctrica aplicadas en la localización de acumulación de metales, en una parcela de cultivo en el Valle del Mezquital. [Tesis de Maestría, UNAM]. TESIUNAM.
- López González, A. E. (2019). Inversión 1D de datos de resistividad y cargabilidad de segundas diferencias de potencial empleando 2 fuentes superpuestas enfocadas. [Tesis de Doctorado, UNAM]. TESIUNAM.
- Lot. A. (2007). Guía Ilustrada de la Cantera Oriente. Caracterización Ambiental e Inventario Biológico. [Archivo PDF]. Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, Universidad Nacional Autónoma de México. http://www.repsa.unam.mx/documentos/Lot_2007-Guia_ilustrada_Cantera_Oriente.pdf
- Orellana, E. (1982). Prospección geoeléctrica en corriente continua. Parainfo, 578 p.
- Orfanidis, S. (1995–2009). Introduction to signal processing. [Archivo PDF].

www.ece.rutgers.edu/~orfanidis/intro2sp

- Pérez-Escobedo, H.M. 2013. Antecedentes Pedregal. Plan de manejo adaptativo de la REPSA CU, UNAM. Secretaría Ejecutiva de la REPSA, UNAM. CDMX, México. www.repsa.unam.mx.
- Pozo 266 Metro CU. Proyecto Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Distrito Federal “Nivel de Riesgo en la Cd. De México en función de las características hidrogeológicas de la ZMVM y fuentes potenciales y activas de contaminación por hidrocarburos” Clave 121128. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Sánchez, F. J. (2009). Fundamentos de prospección eléctrica en corriente continua. [Archivo PDF]. Departamento de Geología, Universidad de Salamanca. <https://hidrologia.usal.es/temas/SEV.pdf>
- Savitzky, A., Golay, M. J. E. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8), 1627-1639–1639. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1021/ac60214a047>
- Schafer, R. W. (2011). What Is a Savitzky-Golay Filter? [Lecture Notes]. *IEEE Signal Processing Magazine*, *Signal Processing Magazine*, IEEE, *IEEE Signal Process. Mag*, 28(4), 111–117. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1109/MSP.2011.941097>
- Schlumberger Array: Electrical Resistivity Methods, Part 2. (2017). Advanced Geosciences INC. <https://www.agiusa.com/schlumberger-array#overlay-context=blog>
- Siebe, C. (2009). La erupción del volcán Xitle y las lavas del Pedregal hace 1670 +/- 35 años AP y sus implicaciones. REPSA, UNAM. http://www.repsa.unam.mx/documentos/Siebe_2009_volcan_xitle.pdf
- Torres Cruz, I. (21 marzo 2022). Sobreexplotación y mal manejo hídrico secará la capital en cuatro décadas. [Sitio Web]. <https://www.cronica.com.mx/academia/sobreexplotacion-mal-manejo-hidrico-secara-capital-cuatro-decadas.html>
- Tovar Jara, J. (2024). Caracterización geoelectrica de la Cantera Oriente con SEV y Segundas Diferencias de Potencial. [Tesis de Licenciatura, UNAM].
- Vargas Cantero, J. (2018). Método de Newton Raphson. Universidad Tecnológica de Bolívar. [Archivo PDF]. <http://personal.cimat.mx:8181/~julio/courses/progra01/clase18/MetododeNewtonRaphson.pdf>
- Vazquez-Sanchez, E. & Jaimes, Ricardo. (1989). Geology of the Basin of Mexico [Geología de la Cuenca de Mexico]. *Geofisica Internacional*. 28. 133-190. 10.22201/igeof.00167169p.1989.28.2.1026.
- Zandz. (2024). Soil Resistivity. [Sitio Web]. <https://zandz.com/en/soil-resistivity/>
- ZONDIP 1D Software. (2024). [Sitio Web]. <https://zond-geo.com/english/zond-software/ert-and-aves/zondip1d/>