



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

EXPLORACIÓN GEOFÍSICA EN SANTA MARÍA NOGALAR PARA LA
IDENTIFICACIÓN DE ZONAS MINERALIZADAS POR SULFUROS
DE PLOMO MEDIANTE TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD
ELECTRICA

TESIS
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEOFÍSICO

QUE PRESENTA
LUIS ENRIQUE ANDRADE TENORIO

DIRECTORES:
INTERNO: M.C. JULIO CESAR GONZÁLEZ HERNÁNDEZ
EXTERNO: ING. JESÚS MÉNDEZ GAYTÁN

Vo. Bo. Coordinación IGF 21/02/2022
Julio César González Hernández

PUEBLA, PUE.2022



BUAP

Oficio No. SAC/0360/2022

**C. Luis Enrique Andrade Tenorio -201205508-
Pasante de la Licenciatura en Ingeniería
Geofísica
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional en línea, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

“EXPLORACIÓN GEOFÍSICA EN SANTA MARÍA NOGALAR PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ZONAS MINERALIZADAS POR SULFUROS DE PLOMO MEDIANTE TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA”

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como Asesor Interno de tema al Mtro. Julio César González Hernández.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente

“Pensar bien para vivir mejor”

H. Puebla de Z. a 28 de febrero de 2022

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director



M'ACGZ/M'VGL/barv
C.c.p. Archivo

Facultad
de Ingeniería

Bvd. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
222 229 55 00 Ext. 7610

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
P r e s e n t e.

El que suscribe: Mtro. Julio César González Hernández, asesor del tema de tesis:

**“EXPLORACIÓN GEOFÍSICA EN SANTA MARÍA NOGALAR PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ZONAS MINERALIZADAS
POR SULFUROS DE PLOMO MEDIANTE TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA”**

Presentada por la C. Luis Enrique Andrade Tenorio -201205508-, pasante del Colegio de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. SAC/0360/2022 con fecha de emisión 28 de febrero de 2022, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

A t e n t a m e n t e
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z., a 01 de marzo de 2022



Mtro. Julio César González Hernández
Asesor de Tema

M' JCR/BARV
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo

Agradecimientos

A mis padres Carlos y Gabi por el apoyo, paciencia y cariño, por impulsarme a alcanzar mis metas y proyectos. Que han estado a mi lado a lo largo del camino. A mis hermanos Carlos y Paoly por confiar y creer en mí, por sus consejos y momentos llenos de alegría. A mi madre por la comprensión y motivación de siempre seguir adelante, de luchar por cumplir con mis metas.

Me gustaría ofrecer mi más sincero agradecimiento al Colegio de Geofísica, en particular a los profesores que con la enseñanza de sus valiosos conocimientos me han permitido crecer profesionalmente, gracias a ustedes por su tiempo, paciencia y dedicación. Al profesor Julio y José Serrano por su tiempo y paciencia en el desarrollo de la presente tesis que me brindaron de su ayuda y por ser parte de este gran logro.

Deseo agradecer al ingeniero Jesús Méndez y al equipo de trabajo de Geophysical Surveys Mara, Ariana, Alexis, Jacobo y Sergio, por permitirme desarrollar mis prácticas profesionales, así como los conocimientos adquiridos y demás aventuras de campo, por sus consejos y apoyo.

A mis amigos de la universidad Javier, Armando, Alejandro, Josué, Alfonso Erik y Eder que han sido un gran pilar en esta travesía por sus consejos, conocimientos y por los gratos momentos.

Gracias a todos los que formaron parte de este largo camino.

INDICE

Agradecimientos.....	I
Índice de Figuras.....	IV
Resumen.....	VI
Abstract.....	VII
Capítulo I Introducción.....	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.2 Justificación.....	3
1.3 Objetivo General.....	4
1.4 Objetivos Especificos.....	4
Capitulo II Zona de Estudio.....	5
2.1 Geología del Área Mineralizada Santa María Nogalar.....	6
Capitulo III Marco Teórico.....	9
3. Resistividad eléctrica de las rocas.....	9
3.1 Fundamentos de la prospección eléctrica.....	11
3.2 Ecuaciones Generales del Método Geoeléctrico.....	11
3.2.1 Fuente Puntual en un Semiespacio.....	14
3.3 Factor Geométrico y Resistividad Aparente.....	15
3.4 Tomografía de Resistividad Eléctrica.....	17
3.5 Arreglos electródicos.....	18
3.5.1 Arreglo Wenner.....	18
3.5.2 Arreglo Wenner- Schlumberger (W-Sc).....	20
3.5.3 Arreglo Dipolo-Dipolo (D-D).....	23
3.6 Roll-Along.....	24
3.7 Efecto de la Topografía.....	25
3.8 Ruido.....	26
Capítulo IV.....	28
4. Metodología.....	28
4.1 Adquisición de datos.....	28
4.2 ANÁLISIS Y FILTRADO DE RUIDO.....	30
4.3 Inversión de Datos.....	32

4.4	VISUALIZACIÓN DE LOS MODELOS GEOELÉCTRICOS 2D	36
Capítulo V	Resultados	37
5	Análisis de Resultados obtenidos	37
5.1	Análisis de los valores de Resistividad	39
5.2	Perfiles e Interpretación.....	42
5.3	Visualizaciones 3D	66
5.4	Conclusiones	72
5.5	Recomendaciones.....	73
Capítulo VI	Referencias y anexos	75
6.	Referencias.....	75
6.1	Anexo. Características de Barrenación	77
6.2	Glosario de unidades.....	81

Índice de Figuras

Ilustración 1 Mapa de ubicación de la Zona de Estudio.	5
Ilustración 2 Mapa Geológico del Área de Estudio.	6
Ilustración 3 Vectores densidad de corriente en un semiespacio homogéneo, con electrodo puntual A (Orellana,1982).	14
Ilustración 4 Esquema de los electrodos de corriente A-B y de potencial M-N (Udias.1997).	16
Ilustración 5 Arreglo Wenner (Ramirez.2016).	18
Ilustración 6 Disposición de los electrodos para un levantamiento de TRE con el arreglo Wenner (Loke).	19
Ilustración 7 Arreglo Wenner-Schlumberger (Telfordf.1997).	20
Ilustración 8 Disposición de los electrodos para un levantamiento de TRE con el arreglo Wenner-Schlumberger (Loke).	22
Ilustración 9 Arreglo Dipolo-Dipolo (Ramirez.2016).	23
Ilustración 10 Método Roll-Along (Avance continuo (Loke).	24
Ilustración 11 Distorsión de un campo uniforme por topografía (Telford.2004).	25
Ilustración 12 A) Geomative GD-10 A, B) Fuente de energía Externa, C) Cable Líder, D) Cables Multinúcleo (Geomative GD-10 System).	29
Ilustración 13 Grafica de resistividad aparente (ρ) por niveles.	31
Ilustración 14 Error Sistemático y filtrado.	31
Ilustración 15 Formato de archivo para Res2DInv®.	32
Ilustración 16 A) Pseudosección de resistividad aparente observada y calculada, junto al modelo obtenido por el programa de inversión. B) Etapas seguidas en el proceso de inversión (Arlandi Rodríguez,2004).	33
Ilustración 17 Diferentes métodos para incluir la topografía en el modelo de inversión 2D.	35
Ilustración 18 Mapa de ubicación de los perfiles de TRE.	37
Ilustración 19 Mapa de ubicación de los perfiles 6,7 y 8.	38
Ilustración 20 Perfil 1 Wenner-Schlumberger.	42
Ilustración 21 Perfil 1 Dipolo-Dipolo.	43
Ilustración 22 Perfil 2 Wenner Schlumberger.	44
Ilustración 23 Perfil 2 Dipolo-Dipolo.	45
Ilustración 24 Perfil 3 Wenner-Schlumberger.	46
Ilustración 25 Perfil 3 Dipolo-Dipolo.	47
Ilustración 26 Perfil 4 Wenner-Schlumberger.	48
Ilustración 27 Perfil 4 Dipolo-Dipolo.	49
Ilustración 28 Perfil 5 Wenner-Schlumberger.	50
Ilustración 29 Perfil 5 Dipolo-Dipolo.	51
Ilustración 30 Perfil 6 Wenner-Schlumberger.	52
Ilustración 31 Perfil 6 Dipolo-Dipolo.	53
Ilustración 32 Perfil 7 Wenner-Schlumberger.	54
Ilustración 33 Perfil 7 Dipolo-Dipolo.	55
Ilustración 34 Perfil 8 Wenner-Schlumberger.	56

Ilustración 35 Perfil 8 Dipolo-Dipolo.	57
Ilustración 36 Perfil 9 Wenner-Schlumberger.	58
Ilustración 37 Perfil 9 Dipolo-Dipolo.	59
Ilustración 38 Perfil 10 Wenner-Schlumberger.	60
Ilustración 39 Perfil 10 Dipolo-Dipolo.	61
Ilustración 40 Perfil 11 Wenner-Schlumberger.	62
Ilustración 41 Perfil 11 Dipolo-Dipolo.	63
Ilustración 42 Perfil 12 Wenner-Schlumberger.	64
Ilustración 43 Perfil 12 Dipolo-Dipolo.	65
Ilustración 44 Modelo digital de elevación del área de estudio con los perfiles Geoeléctricos en Voxler®.....	67
Ilustración 45 Imagen 3D Zona A, arreglo Wenner- Schlumberger.....	67
Ilustración 46 Imagen 3D, Zona A, arreglo Dipolo-Dipolo.	68
Ilustración 47 Imagen 3D Zona B, arreglo Wenner- Schlumberger.....	69
Ilustración 48 Imagen 3D Zona B, arreglo Dipolo-Dipolo.	69
Ilustración 49 Imagen 3D Zona C, arreglo Wenner-Schlumberger.....	70
Ilustración 50 Imagen 3D Zona C, arreglo Dipolo-Dipolo.	71
Ilustración 51 Propuesta de nuevos perfiles de TRE.....	74
Ilustración 52 Perfil 3 y barrenos propuestos.	77
Ilustración 53 Perfil 4 y barrenos propuestos.	79
Ilustración 54 Perfil 11 y barrenos propuestos.	79
Tabla 1 Concentración de muestras tomadas por el SGM (2001).....	7
Tabla 2 Tabla de resistividades de las rocas y sedimentos. (Telford,1992). Se destacaron con tono amarillo las litologías presentes en el área de estudio.....	10
Tabla 3 Tabla de Unidades resistivas.	39
Tabla 4 Características de Barrenación Perfil 3.....	77
Tabla 5 Características de Barrenación Perfil 4.	78
Tabla 6 Características de Barrenación Perfil 11.	80
Tabla 7 Unidades compuestas.....	81
Tabla 8 Unidades básicas.....	81

Resumen

El presente estudio tiene como finalidad el obtener las características eléctricas del subsuelo para identificar las estructuras mineralizadas por sulfuro de plomo y zinc, así como su distribución. Para ello se aplicó exploración geofísica en particular perfiles de tomografía de resistividad eléctrica. La adquisición de datos fue efectuada por Geophysical Surveys S.A. de C.V. empresa que proporcionó los datos para su análisis, procesamiento e interpretación. La Zona Mineralizada de Santa María Nogalar se encuentra en el Estado de Tamaulipas, a 180 km de Ciudad Victoria. Se realizaron doce perfiles de TRE distribuidos de forma estratégica en el área de estudio, los arreglos Electrónicos empleados fueron Wenner-Schlumberger y Dipolo-Dipolo, que por sus características nos brindan información detallada de la zona de estudio. En cada perfil se realizaron mediciones con ambos arreglos para analizar las diferencias que estos presentan bajo las mismas circunstancias.

La longitud de los perfiles fue de 240, 480 y 720 metros. Posteriormente se llevó a cabo un análisis y filtrado exhaustivo de los datos de resistividad eléctrica obtenidos. Con los perfiles obtenidos fue posible realizar visualizaciones 3D que, asociados a la información geológica y estructural del área, sustentarán la base de la Interpretación Geofísica.

Con base en los modelos geoeléctricos 2D obtenidos, se identificaron los contactos entre roca caliza y roca ígnea, al igual que la presencia de un cuerpo intrusivo de origen ígneo esto fue gracias a los contrastes de resistividad eléctrica obtenidos, asimismo se determinó la ubicación de dichas estructuras en los perfiles 3,4,5,7,8,10 y 11. Los cuales presentan anomalías resistivas altas ($>1900 \Omega \cdot m$) asociadas a galena y hornblenda de interés minero.

Abstract

The purpose of this study is to obtain the electrical characteristics of the subsoil to identify the structures mineralized by lead and zinc sulfide, as well as their distribution. For this purpose, geophysical exploration was applied, in particular electrical resistivity tomography profiles. Data acquisition was carried out by Geophysical Surveys S.A. de C.V., which is the company that provided the data for analysis, processing and interpretation. The Santa Maria Nogalar Mineralized Zone is located in the State of Tamaulipas, 180 km from Ciudad Victoria. Distributed strategically twelve ERT profiles were carried out, in the study area, using Wenner-Schlumberger and Dipole-Dipole-Dipole electrode arrays, which due to their characteristics provide detailed information of the studied area. In each profile, two both arrays were made in order to analyze the differences that they presented under the same circumstances.

The length of the profiles was 240, 480 and 720 meters. Subsequently, an exhaustive analysis and filtering of the electrical resistivity data obtained was carried out. With the obtained profiles it was possible to obtain 3D visualizations that, associated to the geological and structural information of the area, will support the basis of the Geophysical Interpretation.

Based on the 2D geoelectric models acquired, the contacts between limestone and igneous rock were identified, as well as the presence of an intrusive body of igneous origin by the electrical resistivity contrasts obtained, likewise the location of these structures was determined in profiles 3,4,5,7,8,10 and 11, which present high resistive anomalies ($>1900 \Omega \cdot m$) associated to galena and hornblende of mining interest.

Capítulo I Introducción

Los métodos geofísicos se basan en la respuesta que tienen las rocas debido a sus propiedades físicas tales como resistividad eléctrica, densidad, susceptibilidad magnética, elasticidad, temperatura y radioactividad (Ávila Angulo.2015). Generalmente estas propiedades dependen de la mineralogía de las rocas.

Los métodos Geoeléctricos estudian el comportamiento de una corriente eléctrica cuando esta atraviesa el suelo, permitiendo investigar la distribución de resistividad eléctrica. Los factores que determinan la resistividad promedio de las rocas se conservan a menudo en toda una unidad geoeléctrica, y debido a esto, puede diferenciarse un tipo de litología de otra tomando como base las mediciones de la resistividad. Las variaciones de la resistividad son valores relacionados con las estructuras y características subterráneas, en consecuencia, pueden ser interpretadas geológicamente (litología, contactos, fallas, fracturas, agua, cavidades, etc.).

Para el presente trabajo se realizaron doce perfiles de TRE para su análisis e interpretación. Se utilizaron los arreglos electródicos Wenner - Schlumberger y Dipolo – Dipolo con la finalidad de obtener datos detallados de la zona a partir de mediciones realizadas desde la superficie.

El área de estudio se encuentra en Santa María Nogalar en la Sierra de Tamaulipas que se caracteriza por su potencial minero, en estas zonas se encuentran las minas de Lourdes y la Navilla. En la región se ha observado vetas con espesor de 0.60 a 1.50 metros de longitud asociadas a depósitos hidrotermales donde la mena se compone de galena y hornblenda. Los perfiles de TRE nos permitirán determinar las diferentes morfologías presentes como los contactos entre rocas caliza y roca ígnea, la distribución espacial de los materiales con potencial minero, así como las estructuras geológicas.

La primera etapa del presente trabajo fue el análisis, filtrado y eliminación de ruido de los datos de resistividad eléctrica. Posteriormente se realizó la inversión de los datos con el programa Res2DInv®, gracias al cual obtuvimos un modelo geoelectrico de los perfiles de tomografía, mismos que sustentan la interpretación de la distribución del subsuelo. Para finalizar se empleó el programa Voxler® para obtener visualizaciones 3D y de esta manera relacionar los perfiles y obtener mayor información de la zona de estudio.

Los resultados permitirán caracterizar las zonas anómalas más importantes, es decir zonas de alteración en las que se podría encontrar las vetas de minerales, de acuerdo a los parámetros de resistividad.

1.1 Planteamiento del Problema

La zona de santa maría Nogalar presenta potencial minero debido a que se han identificado vetas de galena con contenido de plomo y zinc con un espesor de 0.60 a 1.50 metros, sin embargo, la distribución espacial de estas se desconoce por su inmersión al subsuelo, por tal razón existe la incógnita sobre la posible continuidad de las vetas a profundidad lo que limita su eficiente extracción. Los depósitos minerales en la zona se atribuyen a depósitos hidrotermales y pirometazomaticos causados por vulcanismo.

1.2 Justificación

El empleo de diversas técnicas de exploración geofísica nos brinda la oportunidad de obtener información detallada del subsuelo a partir de algún parámetro físico. En este caso el método geoelectrico nos permite obtener la resistividad de las diferentes litologías presentes en el subsuelo, de esta manera podemos localizar cuerpos y estructuras inmersas.

Se empleó el método geoelectrico para explorar el área, con el fin de identificar y delimitar las estructuras y litologías de origen ígneo mineralizadas por sulfuros de plomo y zinc de interés minero. Con base en los resultados obtenidos permitirá evaluar si es viable continuar con el proceso de extracción de los recursos minerales.

Los perfiles de tomografía se planearon de forma estratégica para cubrir las áreas de interés, identificar los contactos entre la roca caja (caliza) y las rocas ígneas, conocer la distribución de las estructuras ígneas a profundidad, realizar una correlación entre los perfiles para obtener imágenes 3D que nos ayudan a inferir la distribución de los materiales presentes.

1.3 Objetivo General

Aplicar la efectividad de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) en la identificación de cuerpos mineralizados de sulfuro de plomo (Galena), ubicados en Santa María Nogalar que se observan en superficie para determinar su continuación a profundidad, mediante variaciones de resistividad eléctrica que se presentan por los contactos entre los diferentes tipos de roca.

1.4 Objetivos Específicos

Obtener modelos geoelectrónicos 2D, y a partir de estos elaborar visualizaciones 3D, que permitan identificar las estructuras que delimitan las zonas mineralizadas por sulfuros de plomo, a partir de la caracterización de resistividad eléctrica.

Realizar una correlación entre los arreglos Wenner-Schlumberger y Dipolo-Dipolo, con el fin de identificar de manera certera las morfologías y estructuras geológicas presentes en el subsuelo.

Realizar una interpretación de los modelos geoelectrónicos con base en la información geológica del área, con el fin de asociar con el menor grado de incertidumbre las estructuras y litologías presentes en el subsuelo.

Capítulo II Zona de Estudio

Santa María Nogalar se encuentra ubicada en el estado de Tamaulipas, en el municipio de Casas, en la zona Sur-Este con una elevación de 900 a 1150 m.s.n.m. se empleó el sistema coordenado UTM, Datum WGS84 y la zona 14R.

Los estudios realizados por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) lo han denominado como un área mineralizada. Por tal motivo en esta zona se tienen minas y prospectos de manifestación mineral, podemos destacar las minas La Navilla y Lourdes, la mena la constituyen principalmente galena, blenda y malaquita, en tanto que la ganga la constituyen barita, cuarzo y piritita (Carrizales.2001).

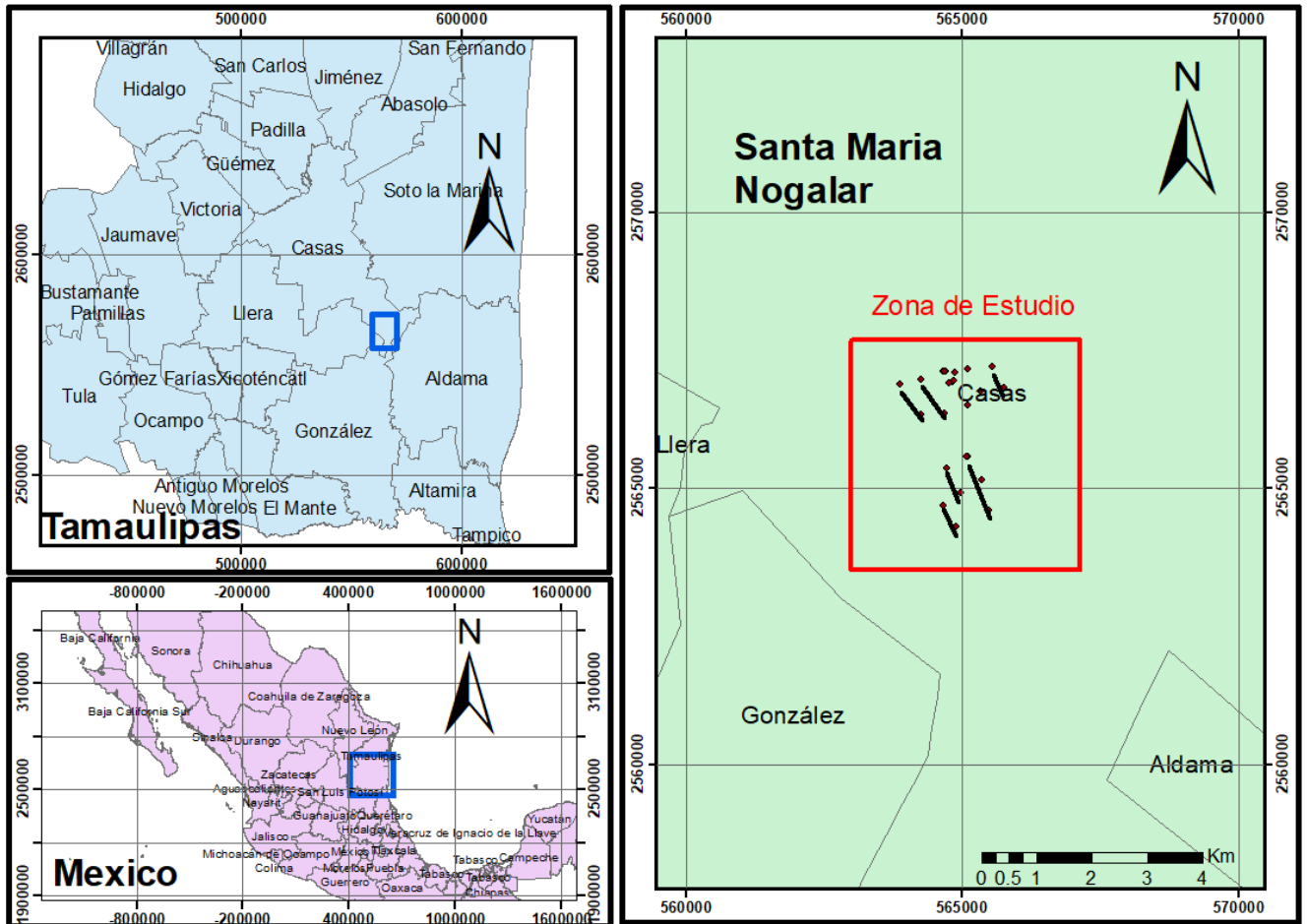


Ilustración 1 Mapa de ubicación de la Zona de Estudio.

2.1 Geología del Área Mineralizada Santa María Nogalar

Los procesos sedimentarios que han intervenido para la depositación de las unidades Cretácicas, así como el vulcanismo y la deformación en la zona, han originado las concentraciones de diferentes materiales metálicos y no metálicos que actualmente se observan directamente en el área o bien de los cuales se tienen indicios y ocurren posiblemente a profundidad. Con base a los estudios realizados por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) la Zona mineralizada Santa María Nogalar cubre una superficie de 150 Km².

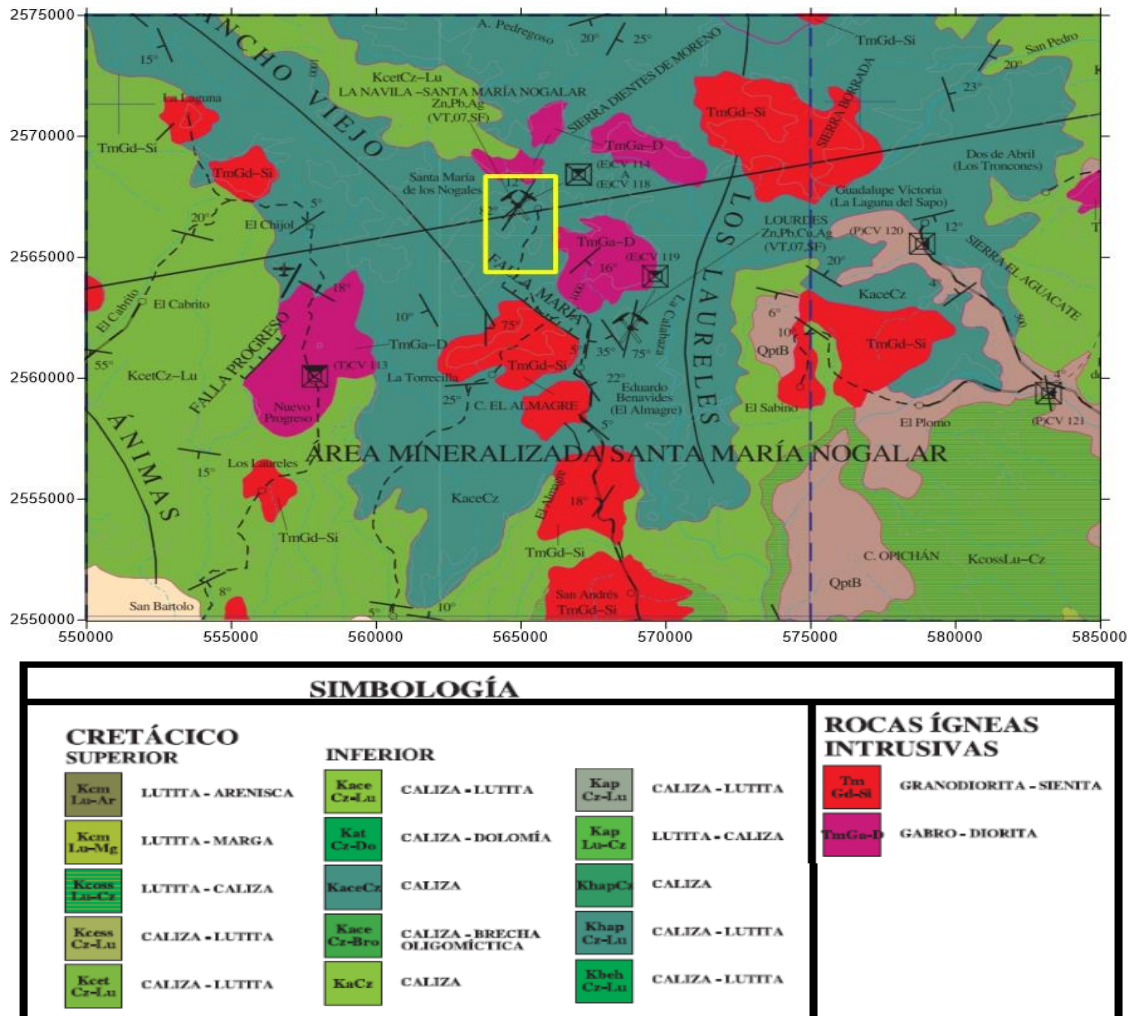


Ilustración 2 Mapa Geológico del Área de Estudio.

Se localiza en la sierra de Tamaulipas en la porción sur de la misma sierra donde se observan dos áreas o zonas mineralizadas, las cuales corresponden a dos tipos o clases de depósitos minerales hidrotermales y pirometazomaticos.

Los depósitos hidrotermales (profundidad y temperatura moderada) se localizan en la región de Santa María, la mena consiste principalmente de galena y hornblenda, la ganga la forman cuarzo, pirita, calcita y granate. Se encuentra en vetas bien definidas de rumbo 65°NE con un echado de 70°SE y cuyo espesor vario de 0.60 a 1.50 metros con una longitud no determinada debido a lo abundante de la vegetación.

Estructuralmente la depositacion de minerales ha sido controlada por la presencia de fracturas y fallas de tensión, pre-minerales y contactos entre diferentes tipos de roca. Estas estructuras guiaron las soluciones mineralizantés para la formación de vetas. Los contactos entre roca ígnea plutónica y calizas del Cretácico Superior han dado lugar a la formación de cuerpos irregulares.

De acuerdo con Carrizales-Aguilar (et. al 2001), la intrusión de roca ígneas terciarias provocaron la formación de skarn con mineralización de plomo, zinc como mena y de barita como ganga.

En el área se tomaron muestras de Esquirlas las cuales fueron analizadas, de las cuales se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 1 Concentración de muestras tomadas por el SGM (2001).

Mina /Prospecto	MUESTRA No	Au g/t	Ag g/t	Pb %	Zn %	Cu %
STA. MARÍA NOGALAR	CV 114	N. D	N. D	0.02	1.33	0.01
LA NAVILLA	CV 115	N. D	N. D	0.26	1.15	0.01

LA NAVILLA	CV 116	N. D	N. D	0.01	0.09	N. D
ANA MARÍA	CV 117	N. D	5	0.04	0.25	N. D
ANA MARÍA	CV 118	N. D	3	0.03	0.26	N. D
LOURDES	CV 119	0.00	N. D	0.06	0,0395	0,2

Capítulo III Marco Teórico

3. Resistividad eléctrica de las rocas

La resistividad de las rocas y los minerales es una de las propiedades físicas más variables, algunos minerales son buenos conductores de la corriente eléctrica como los metales nativos y el grafito. No obstante, la mayoría de los minerales que conforman las rocas son aislantes. La resistividad eléctrica de las rocas puede determinarse in situ o estado natural y en muestras en laboratorio (Telford.1992). Como se ha mencionado si la resistividad de las rocas solo dependiera de los materiales que la componen habrían de considerarse aislantes en la mayoría de los casos, afortunadamente las rocas son afectadas por diversos factores como la porosidad, la saturación de fluidos presentes, la compactación, la composición de las soluciones, el grado de fracturamiento de las rocas y otras variables del ambiente como presión y temperatura (Orellana.1982).

Los estudios realizados en laboratorio han permitido asignar valores de resistividad a los diferentes tipos de rocas y minerales, estos datos están plasmados en tablas con rangos y valores específicos de resistividad para cada material. Al conocer la geología del área y los datos de resistividad eléctrica podemos asociarlos de forma certera con la variedad de rocas que existen, pero no debemos olvidar influir los factores que afectan la resistividad para realizar una relación correcta.

A continuación, se muestra una tabla con los rangos de resistividad ($\Omega \cdot m$) para los diferentes tipos de rocas y sedimentos.

Tabla 2 Tabla de resistividades de las rocas y sedimentos. (Telford, 1992). Se destacaron con tono amarillo las litologías presentes en el área de estudio.

Tipo de roca	Rango de resistividad ($\Omega \cdot m$)
Pórfido granítico	4×10^5 (húmedo)- 1.3×10^6 (seco)
Pórfido feldespático	4×10^3 (húmedo)
Sienita	10^2 - 10^6
Diorita	1.9×10^3 (húmedo)- 2.8×10^4 (seco)
Pórfirita	10 - 5×10^4 (húmedo)- 3.3×10^3 (seco)
Pórfido carbonizado	2.5×10^3 (húmedo)- 6×10^4 (seco)
Diorita cuarzosa	2×10^4 - 2×10^6 (húmedo)- 1.8×10^5 (seco)
Pórfidos (varios)	60 - 10^4
Dacita	2×10^4 (húmedo)
Andesita	4.5×10^4 (húmedo)- 1.7×10^2 (seco)
Diabasa (varios)	20 - 5×10^7
Lavas	10^2 - 5×10^4
Gabro	10^3 - 10^6
Basalto	10 - 1.3×10^7 (seco)
Olivino	10^3 - 6×10^4 (húmedo)
Peridotita	3×10^3 (húmedo)- 6.5×10^3 (seco)
Esquisto de hornfelts	8×10^3 (húmedo)- 6×10^7 (seco)
Toba	2×10^3 (húmedo)- 10^5 (seco)
Esquisto de grafito	10 - 10^2
Pizarras (varios)	6×10^2 - 4×10^7
Gneis (varios)	6.8×10^4 (húmedo)- 3×10^6 (seco)
Mármol	10^2 - 2.5×10^8 (seco)
Skarn	2.5×10^2 (húmedo)- 2.5×10^8 (seco)
Cuarcita (varios)	10 - 2×10^8
Lutita compacta	20 - 2×10^3
Argilita	10 - 8×10^2
Conglomerados	2×10^3 - 10^4
Areniscas	1 - 6.4×10^8
Caliza	50 - 10^7
Dolomita	3.5×10^2 - 5×10^3
Arcilla húmeda no consolidada	20
Margas	3-70
Arcillas	1-100
Arenas bituminosas	4-800

3.1 Fundamentos de la prospección eléctrica

Los métodos de prospección eléctrica en corriente continua se fundamentan en la teoría general del campo eléctrico estacionario y se basan en detectar los efectos superficiales que produce el flujo de una corriente eléctrica, natural o inducida, por el subsuelo. El método eléctrico se basa en la Ley de Ohm:

$$R = V/I \quad (3)$$

A grandes rasgos consiste en calcular la resistividad del terreno inyectando una corriente eléctrica conocida (I) mediante electrodos clavados en el suelo y medir la diferencia de potencial en dos electrodos (ΔV) intermedios (Teixeidó I Ullod, 2012).

3.2 Ecuaciones Generales del Método Geoelectrico

Para establecer las leyes del principio físico, partiremos de las Ecuaciones de Maxwell, en particular Ley de Faraday (3.1) y Ley de Ampere (3.2) que se muestran a continuación:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.2)$$

Donde:

\vec{E} es el Campo Eléctrico [V/m],

\vec{B} es el Campo de Inducción Magnética [T],

\vec{H} es el Campo Magnético [A/m],

\vec{J} es la Densidad de Corriente [A/m^2]

\vec{D} es el Campo de desplazamiento [C/m^2].

Por tratarse de un campo estacionario, habrán de anularse las derivadas temporales y tendremos:

$$\nabla \times E = 0 \quad (3.3)$$

$$\nabla \times H = J \quad (3.4)$$

La ecuación (3.5) nos dice que el campo eléctrico \vec{E} es conservativo o irrotacional, por lo que deriva de un potencial escalar \vec{U} . Es decir que.

$$\vec{E} = -\nabla U \quad (3.5)$$

Para tal caso debe cumplirse la Ley de Ohm, en su forma diferencial para medios isótropos:

$$J = \sigma \vec{E} \quad (3.6)$$

La ecuación (3.6) se deduce de la fórmula de un cilindro conductor homogéneo de resistencia R , longitud l y sección s .

$$R = \rho l/s \quad (3.7)$$

Por otra parte:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{El}{I} = \frac{El}{sJ} \quad (3.8)$$

Y Entonces:

$$\frac{El}{sJ} = \rho \frac{l}{s} \quad (3.9)$$

De donde:

$$J = \frac{E}{\rho} = \sigma E \quad (3.10)$$

Si el conductor es suficientemente pequeño para que \vec{J} y \vec{E} , se puedan suponer constantes (Orellana.1982).

La cual nos dice que la densidad de corriente \vec{J} en un punto, tiene la misma dirección y sentido que el campo \vec{E} en el mismo punto, y es proporcional a él. El factor de proporcionalidad es la conductividad σ inversa de la resistividad ρ .

En todos los puntos se cumplirá la ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (3.11)$$

Entonces:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (3.12)$$

En todos los puntos excepto los electrodos.

Relacionando esta ecuación con las anteriores, tenemos que:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = 0 \quad (3.13)$$

Desarrollando la ecuación:

$$\nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = \sigma \nabla \cdot \mathbf{E} + \mathbf{E} \cdot \nabla \sigma = -\sigma \nabla \cdot \nabla U + \mathbf{E} \cdot \nabla \sigma = -\sigma \nabla^2 U + \mathbf{E} \cdot \nabla \sigma = 0 \quad (3.14)$$

Si σ es constante en todo el medio, $\nabla \sigma = 0$ por lo tanto

$$\nabla^2 U = 0 \quad (3.15)$$

Que es la ecuación de Laplace, la cual es válida en todo el semiespacio conductor, pero no en los electrodos (Telford. 1992).

3.2.1 Fuente Puntual en un Semiespacio

En relación con un semiespacio, el cual es homogéneo y de resistividad ρ , alrededor de un electrodo "A" que al ser pequeño comparado con la longitud de estudio se considera como una fuente puntual. Donde la densidad de corriente \vec{J} es constante. La integral de \vec{J} sobre la superficie semiesférica es I y el radio r tenemos que:

$$2\pi r^2 J = I \quad (3.16)$$

Despejando y sustituyendo

$$J = \sigma E = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (3.17)$$

Entonces

$$E = \frac{I}{\sigma 2\pi r^2} = \frac{I \rho}{2\pi r^2} \quad (3.18)$$

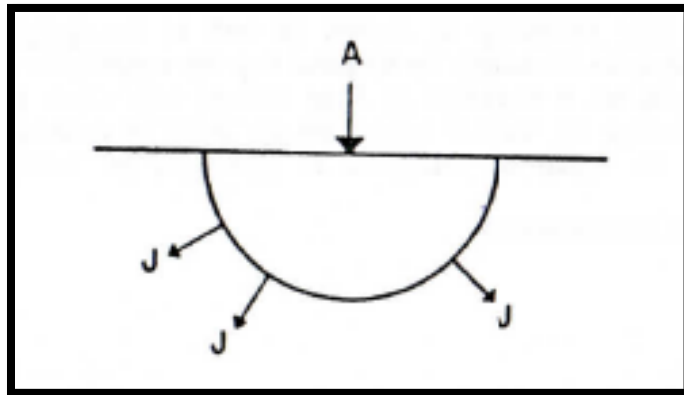


Ilustración 3 Vectores densidad de corriente en un semiespacio homogéneo, con electrodo puntual A (Orellana, 1982).

La diferencia de potencial entre dos puntos M y N, se deduce de la ecuación (3.5) por:

$$U_N^M = - \int_N^M E \cdot dl \quad (3.19)$$

Debido a que el campo es conservativo, si r_1 y r_2 son las distancias de los puntos M y N al electrodo A, tenemos:

$$U_N^M = \frac{I \rho}{2 \pi} = - \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{I \rho}{2 \pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (3.20)$$

$$U_M = \frac{I \rho}{2 \pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (3.21)$$

3.3 Factor Geométrico y Resistividad Aparente

Los arreglos electródicos emplean cuatro electrodos (A, M, N, B), dos electrodos de corriente uno positivo (A) y otro negativo (B), los electrodos M y N sirven para medir la diferencia de potencial entre dos puntos. El potencial medido por los electrodos M y N será (Udías.1997):

$$V_M = \frac{I \rho}{2 \pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (3.22)$$

$$V_N = \frac{I \rho}{2 \pi} \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \quad (3.23)$$

Entonces la diferencia de Potencial ΔV_{MN} entre ambos puntos es:

$$\Delta V_{MN} = \frac{I \rho}{2 \pi} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (3.24)$$

Donde r_i es el espacio entre electrodos de corriente y de potencial, como se muestra en la Ilustración 4

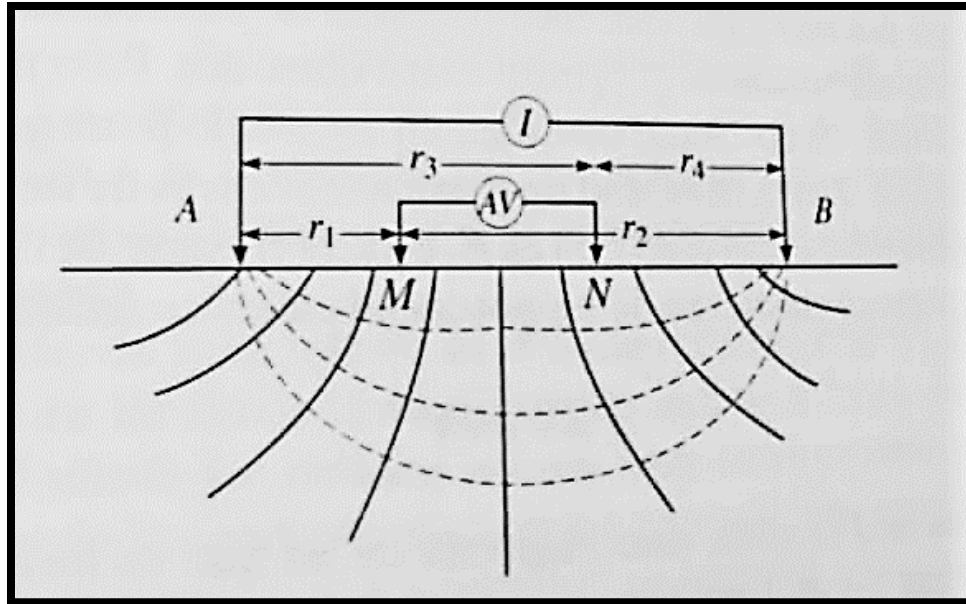


Ilustración 4 Esquema de los electrodos de corriente A-B y de potencial M-N (Udías, 1997).

Al despejar la resistividad de la ecuación (3.20) obtenemos:

$$\rho_a = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)\right]} \frac{\Delta V}{I} = k \frac{\Delta V}{I} \quad (3.25)$$

Si el medio no es homogéneo, y el espaciado de electrodos es variado, o permanece fijo mientras se mueve el arreglo, entonces la relación cambia, esto da como resultado un valor diferente de ρ para cada medición. Esta cantidad se conoce como resistividad aparente (ρ_a). La resistividad aparente es un valor promedio y solo en el caso de un medio homogéneo es igual a la resistividad real (Telford, 1992).

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} k \quad (3.26)$$

Donde k es un coeficiente que depende únicamente de la geometría del dispositivo electródico.

$$k = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)\right]} \quad (3.27)$$

3.4 Tomografía de Resistividad Eléctrica

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) es una técnica que consiste en determinar las variaciones verticales y laterales de la resistividad del subsuelo, a partir de mediciones superficiales que se basan en arreglos lineales (2D), con el fin de generar un modelo de la distribución espacial de la resistividad del suelo (Álvarez, 2016). Es un método que permite investigar la variación de la resistividad a profundidad y lateralmente.

Para realizar la cobertura de mediciones en forma bidimensional, estas deben de llevarse a cabo sucesivamente y acorde al arreglo eléctrico seleccionado. La cantidad de datos que puede obtenerse para un determinado número de electrodos a lo largo de una línea de sondeo, depende del tipo de configuración eléctrica que se utiliza (Loke, 2016). En los estudios de TRE se realizan una gran cantidad de mediciones con el propósito de obtener una buena resolución del subsuelo, e identificar los cambios laterales, así como a profundidad.

Los dispositivos modernos son una pieza clave en la obtención de datos de TRE, debido a que la adquisición es proceso totalmente automatizado ya que cuenta con un software capaz de procesar y almacenar un gran volumen de información. Es una técnica de resistividad multi-electrodo en la cual el arreglo geométrico varía dependiendo el objetivo de estudio.

3.5 Arreglos electródicos

En cualquier arreglo electródico, si se conoce el factor geométrico (k), la corriente inyectada por los electrodos A B, y la diferencia de potencial entre los electrodos M N, es posible determinar la resistividad aparente (ρ_a) mediante la ecuación (3.26). Existen diferentes arreglos debido a que los electrodos pueden adoptar diversas configuraciones geométricas sobre un plano, que representa la superficie del terreno.

Los arreglos más comunes para la prospección eléctrica son:

- A) Arreglo Wenner
- B) Arreglo Wenner- Schlumberger
- C) Arreglo Dipolo-Dipolo

3.5.1 Arreglo Wenner

En este arreglo los electrodos están espaciados uniformemente. Si $r_1 = r_4 = a$ y $r_2 = r_3 = 2a$ entonces la ecuación (3.26) para este caso es:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (3.28)$$

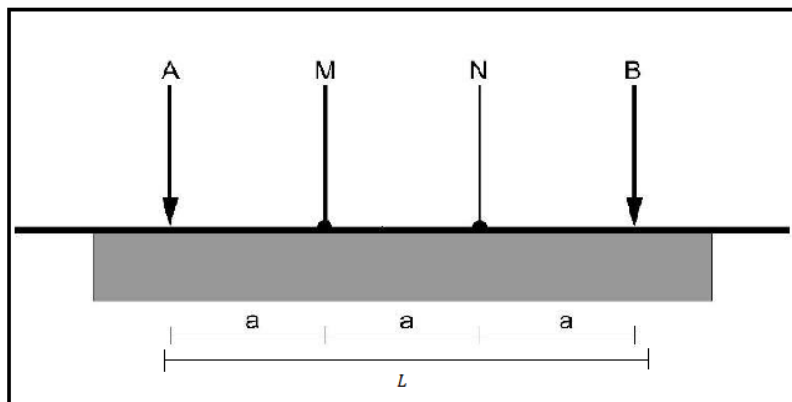


Ilustración 5 Arreglo Wenner (Ramirez.2016).

La disposición de los electrodos para el arreglo Wenner es A, M, N, B como se muestra en la ilustración 5, la separación entre electrodos es “a”, con esta configuración se realizarán mediciones a lo largo del perfil. Para obtener datos a mayor profundidad el valor de “a” debe incrementarse en múltiplos de “n”, los electrodos se deben mantener equidistantes.

Este arreglo es sensible a los cambios verticales del subsuelo, por lo cual es una buena opción para identificar estructuras horizontales como capas sedimentarias. La profundidad de investigación puede variar dependiendo de las características del terreno, pero la profundidad media de investigación es aproximadamente 0.5 veces el espaciamiento de “a” utilizado. Al aplicar este arreglo en un perfil de TRE es el que proporciona el menor número de mediciones debido a que va perdiendo tres mediciones en cada nivel.

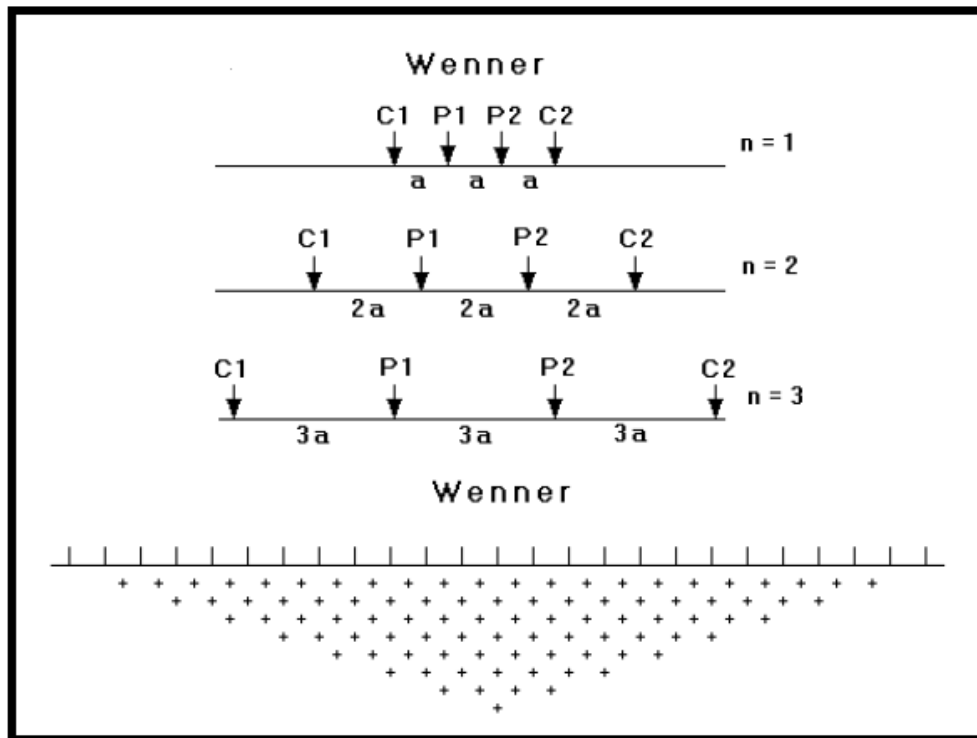


Ilustración 6 Disposición de los electrodos para un levantamiento de TRE con el arreglo Wenner (Loke).

La fuerza de la señal en este arreglo es inversamente proporcional al factor geométrico utilizado para calcular la resistividad aparente; el cual en este caso es $2\pi a$ para cualquier nivel. Este tipo de arreglo tiene el factor geométrico más pequeño, y por lo tanto tiene una mayor fuerza de señal. Esta cualidad hace que el arreglo Wenner sea la mejor opción si se requiere hacer estudios de tomografía en áreas con gran ruido ambiental, (Loke, 2012).

3.5.2 Arreglo Wenner- Schlumberger (W-Sc)

En este caso los electrodos de corriente A B se separan una distancia L, y los electrodos de potencial M N se mantienen fijos. Entonces:

$$r_1 = (L - x) - l \quad (3.29)$$

$$r_2 = (L + x) + l \quad (3.30)$$

$$r_3 = (L - x) + l \quad (3.31)$$

$$r_4 = (L + x) - l \quad (3.32)$$

Donde x es la distancia del punto medio entre los electrodos de potencial y el punto medio del tendido como se observa en la ilustración 7.

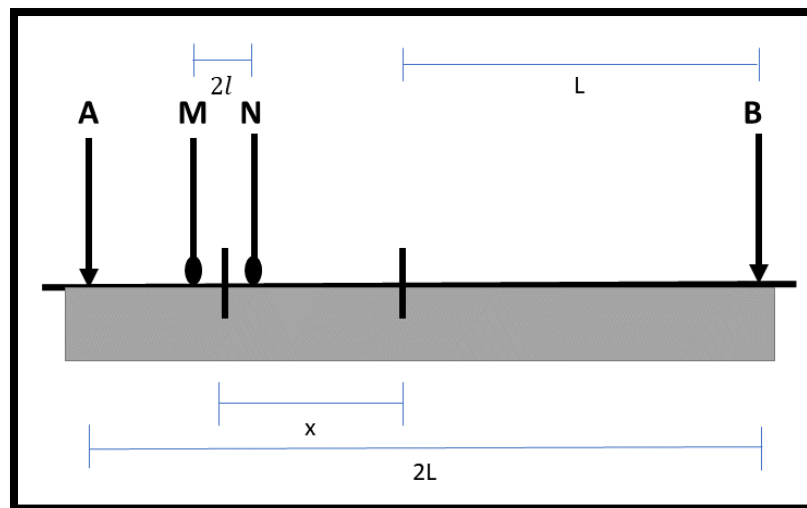


Ilustración 7 Arreglo Wenner-Schlumberger (Telfordf. 1997).

Sustituyendo estos valores en la ecuación (3.26).

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \left[\frac{2\pi}{\left(\frac{1}{(L-x)-l} - \frac{1}{(L+x)+l} \right) - \left(\frac{1}{(L-x)+l} - \frac{1}{(L+x)-l} \right)} \right] \quad (3.33)$$

La distancia entre los electrodos de corriente a los de potencial debe ser considerablemente mayor a la distancia entre los electrodos de potencial (por un factor de 10 o más), entonces $(L - x) \gg 3l$.

$$\rho_a \approx \frac{\pi (L^2 - x^2)^2}{2l (L^2 + x^2)} \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \quad (3.33 a)$$

Como es un arreglo simétrico, es decir $x=0$, entonces:

$$\rho_a \approx \frac{\pi L^2}{2l} \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \quad (3.33 b)$$

En este caso $L = 1/2 AB$ y $l = 1/2 MN$.

Es un híbrido entre los arreglos Wenner y Schlumberger (Pazdirek y Blaha 1996), surgió de estudios recientes de imagen eléctrica. La configuración de los electrodos del arreglo Wenner- Schlumberger es A, M, N, B en el cual los electrodos de potencial siempre estarán separados a una distancia "a", para este caso los electrodos de corriente se deben separar de los electrodos de potencial por un factor de "n", este factor depende del nivel que se esté midiendo. Mientras que la separación de los electrodos de potencial no debe cambiar.

Este arreglo es útil en la identificación de estructuras verticales, así como horizontales, en los niveles más someros resulta ser mejor en la detección de estructuras horizontales y a mayor profundidad para estructuras verticales. La profundidad media de investigación es 10% mayor que para el arreglo Wenner para una misma distancia entre electrodos C1 y C2. La intensidad de la señal es menor que la del arreglo Wenner, sin embargo, es mayor que el arreglo Dipolo-Dipolo (Loke, 2012).

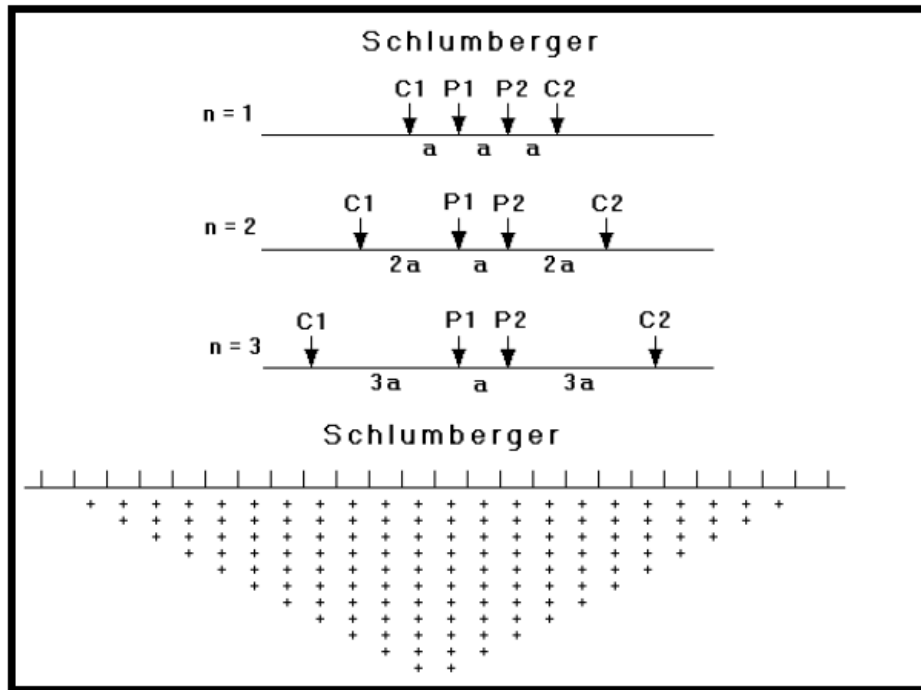


Ilustración 8 Disposición de los electrodos para un levantamiento de TRE con el arreglo Wenner-Schlumberger (Loke).

Este arreglo tiene una mejor cobertura horizontal, en el levantamiento de datos este arreglo solo pierde dos datos por nivel por lo que realiza más mediciones para la caracterización del subsuelo.

3.5.3 Arreglo Dipolo-Dipolo (D-D)

En este arreglo los electrodos se disponen sobre una línea en el orden A B M N, formando un doble dipolo.

$$\rho_a = \pi n (n + 1)(n + 2)a \frac{\Delta V}{I} \quad (3.34)$$

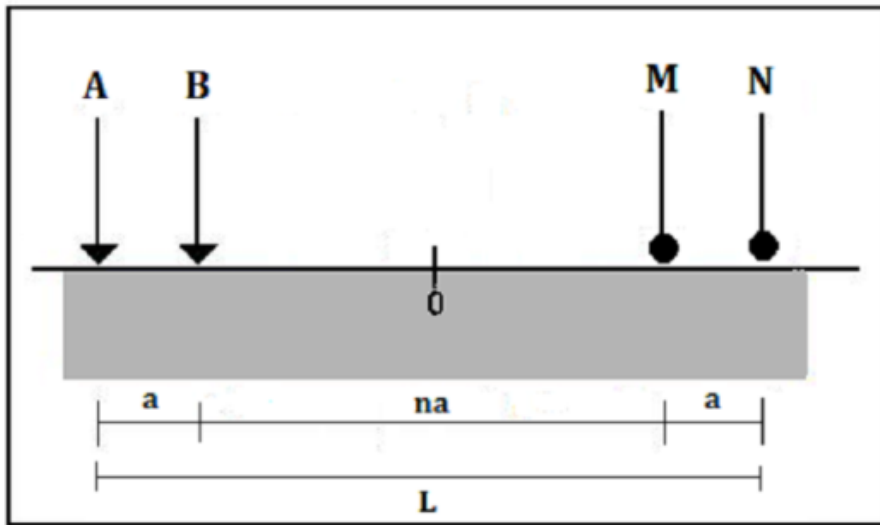


Ilustración 9 Arreglo Dipolo-Dipolo (Ramirez.2016).

La disposición de los electrodos es A, B y M, N los cuales se mantienen separados a una distancia “a” entre cada par de electrodos, cada par de electrodos se van a separar para aumentar la profundidad de investigación a un factor de “n”, sin modificar la separación de nuestro par de electrodos.

Es un arreglo muy útil en la identificación de estructuras verticales como diques y cavidades debido a su alta sensibilidad a cambios horizontales, pero no es recomendado en la búsqueda de capas sedimentarias o estructuras horizontales. Tiene una mayor resolución en los primeros niveles, es el arreglo con el mayor número de mediciones, ya que este solo va perdiendo un dato por nivel.

La intensidad de la señal resulta ser pequeña para valores altos del factor “n”. El voltaje es inversamente proporcional al cubo del factor “n”. Esto significa que para la misma corriente el voltaje medido decae en 200 veces cuando “n” incrementa de 1 a 6. Un método para solucionar este problema es aumentar el espacio entre el par de electrodos AB y MN, para reducir la caída del potencial al aumentar la longitud del arreglo para ganar una mayor profundidad (Loke, 2012).

3.6 Roll-Along

Es una técnica utilizada para extender horizontalmente el área de cobertura en un levantamiento TRE, particularmente para un sistema con un número limitado de electrodos es usado el método de Roll-Along (Avance Continuo). Después de completar la secuencia de mediciones el sistema es movido hasta el final de la línea. Todas las mediciones que implican la parte que se movió no se superponen, el nuevo final del levantamiento se repite (Loke).

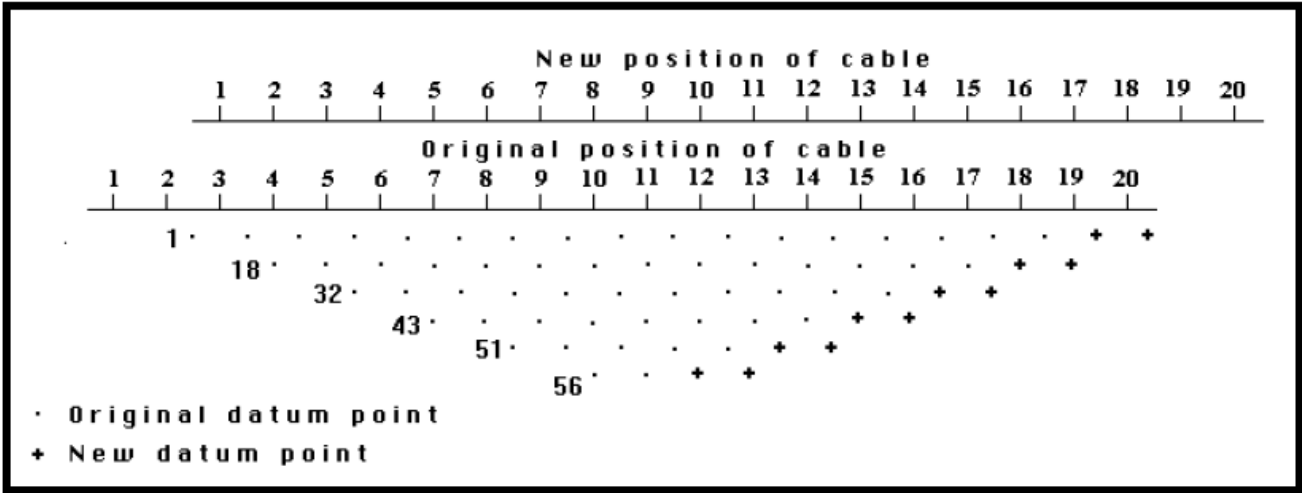


Ilustración 10 Método Roll-Along (Avance continuo (Loke).

Este método se emplea en equipos que cuentan con cables activos multi-electrodo. Que facilitan el levantamiento de datos de TRE. Estos cables cubren una sección del total del tendido, por lo que son muy prácticos para levantamientos en los que se debe cubrir una gran área. El método consiste en mover el tendido o una sección de este, de esta forma cubrir el área deseada.

3.7 Efecto de la Topografía

La topografía accidentada tendrá un efecto en el flujo de corriente, el cual se concentra o enfoca en los valles y se dispersa debajo de una colina (Telford,1992). Debido a que en la zona de estudio existe variaciones en la topografía de la superficie, se debe tener en cuenta el efecto que esto provocara en los levantamientos de TRE.

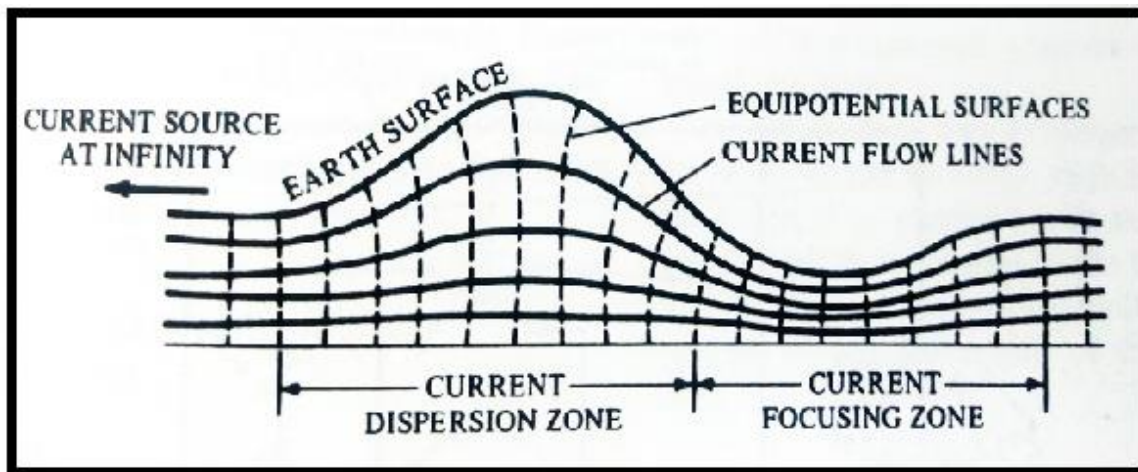


Ilustración 11 Distorsión de un campo uniforme por topografía (Telford.2004).

La dispersión del flujo de corriente se ve afectada por la topografía accidentada debido a esto en las crestas la corriente se dispersa fácilmente contrario a lo que sucede en los valles donde tenemos una mayor concentración del flujo de corriente.

En estudios sobre áreas con cambios significativos en la elevación de la superficie, el efecto por topografía se debe tener en cuenta al realizar la inversión de los datos. En lugar de intentar corregir el efecto de la topografía en las mediciones, el método preferido ahora es incorporar la topografía al modelo de inversión. El software RES2DINV tiene tres métodos diferentes que pueden ser usados para incluir la topografía al modelo de inversión (Loke, 2000).

3.8 Ruido

En los estudios geofísicos están expuestos a una gran variedad de fuentes de ruido, cada una de las cuales tiende a degradar la calidad de los datos y de la interpretación resultante en un grado mayor o menor. Es importante para el geofísico conocer las distintas fuentes de ruido existentes en una zona particular y para la técnica concreta que se esté usando, para poder así minimizar, en lo posible, dichas fuentes de ruido (IGME.1985).

El ruido es una perturbación o variación en la señal original, al realizar un estudio de TRE, los datos obtenidos pueden estar afectados a grandes rasgos por dos tipos de ruido; ruido sistemático y ruido aleatorio (Loke,2012).

El ruido sistemático, se presenta por posibles fallas durante la adquisición de datos. Estas fallas generalmente involucran problemas relacionados con el equipo de estudio, así como su manipulación. Se puede llegar a comprometer la calidad de los datos de estudio, al tener una alta resistencia de contacto, electrodos desconectados, cables conectados en dirección contraria, cables dañados, entre otras situaciones similares. Todos los ejemplos mencionados anteriormente se consideran como ruido sistemático, las mediciones afectadas por este tipo de ruido son fácilmente identificadas, ya que suelen presentarse como datos aislados inusualmente bajos o altos (Álvarez Barrientos,2015).

Por otro lado, el ruido aleatorio se presenta en los datos sin tendencia laguna. Esto imposibilita identificar qué tipo de datos y en qué cantidad están siendo afectados. Como ejemplo de ruido aleatorio se puede mencionar los efectos producidos por las corrientes telúricas; efectos que generalmente se presentan en arreglos con factor geométrico muy alto, como en el caso del arreglo Dipolo-Dipolo (Loke,2012).

Capítulo IV

4. Metodología

La planeación de los perfiles de tomografía de resistividad eléctrica fue determinada por la aplicación de diversas técnicas multidisciplinarias, tales como estudios geológicos de campo, investigaciones geológicas y exploración geofísica.

El estudio se enfoca en la caracterización de la zona de interés, identificando estructuras geológicas, así como su distribución, continuidad y profundidad. Por tal motivo se optó por emplear dos configuraciones de electrodos diferentes. El arreglo Wenner-Schlumberger es útil para identificar estructuras verticales, así como horizontales y posee una buena cobertura horizontal. En tanto que el arreglo Dipolo-Dipolo presenta una alta resolución en identificar contrastes laterales, alcanza una mayor profundidad de investigación y es el arreglo con mayor número de mediciones.

4.1 Adquisición de datos

La empresa Geophysical Surveys llevo a cabo las mediciones en campo mediante el método de tomografía de resistividad eléctrica, con el equipo GEOMATIVE® GD-10 el cual es un resistivímetro multifuncional de última tecnología el cual permite visualizar los datos en campo, gracias a su poderoso software de operación Geomative Studio™. El equipo posee una interfaz ingeniosa que permite realizar una configuración eficaz de los diferentes parámetros involucrados durante el estudio tales como; voltaje, corriente, apilamiento (Stack) y arreglo electródico.

Se realizaron doce perfiles de tomografía de resistividad eléctrica aplicando los arreglos Wenner-Schlumberger y Dipolo-Dipolo respectivamente. La longitud de los perfiles 1, 2 y 3 fue de 720 metros con una separación entre electrodos de 10 metros, mientras que los perfiles 4, 5, 9, 10, 11 y 12 tienen una extensión de 480 metros y la separación entre electrodos fue de 10 metros, por ultimo los perfiles 5, 6 y 7 tuvieron una longitud de 240 metros y 5 metros de separación entre electrodos.

Para la ejecución del Geomative GD10 se emplearon dos fuentes de energía externas, tres cables líder inteligentes bidireccionales, dos cables multinúcleo con doce tomas de corriente por cada uno y cuarenta y ocho electrodos de acero inoxidable.

El cable líder inteligente del Geomative GD10 permiten aplicar la técnica de Roll-Along o de Traslape que nos brinda la oportunidad de realizar perfiles de mayor longitud.

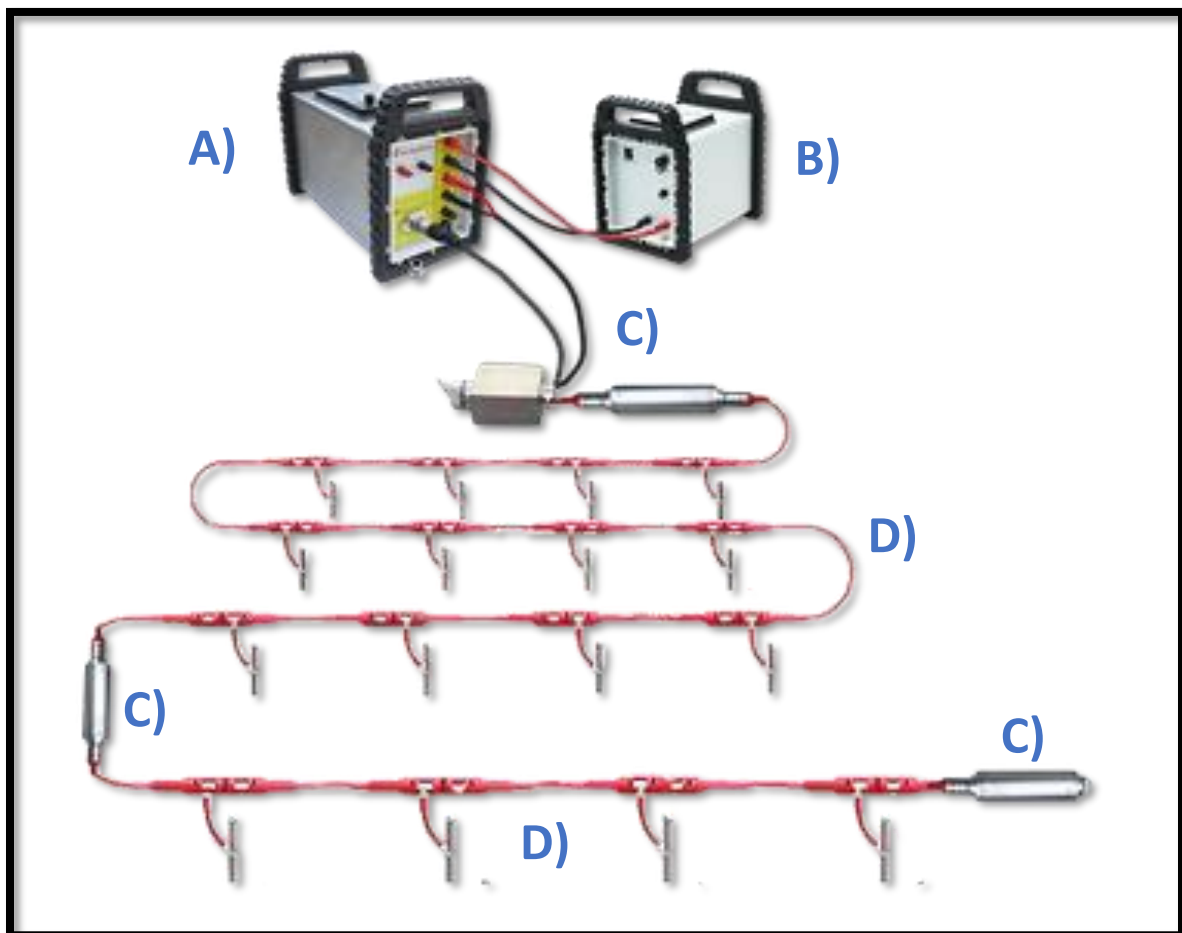


Ilustración 12 A) Geomative GD-10 A, B) Fuente de energía Externa, C) Cable Líder, D) Cables Multinúcleo (Geomative GD-10 System).

Al término del estudio se deben descargar los datos de resistividad del equipo para posteriormente realizar su análisis y filtrado de los mismos.

4.2 ANÁLISIS Y FILTRADO DE RUIDO

Los datos crudos descargados del Geomative GD10 se encuentran en formato .DAT los cuales son compatibles con los diferentes softwares de procesamiento e inversión de datos geoelectricos.

Una etapa fundamental del presente estudio es el análisis y filtrado de los datos crudos, con lo cual se busca identificar y corregir las señales erróneas o anómalas, las cuales se atribuyen con ruido al momento de tomar los datos en campo o por algún tipo de error ya sea error sistemático o error aleatorio.

Álvarez (2015) señala que *“El ruido sistemático es fácil de localizar debido a que son datos que destacan por ser muy bajos o altos y no poseer la tendencia de los datos reales”*. Los datos afectados por ruido son causados por eventos externos al estudio, estos valores se distinguen al no tener ninguna correlación estadística entre sí. La identificación de estos datos erróneos se realizó ordenando los datos de resistividad eléctrica por niveles, posteriormente se graficó la resistividad (ρ) de cada nivel y su ubicación (x), con el propósito de observar la tendencia de los valores de resistividad (Ilustración 14). Se empleo el filtro de media móvil de tres puntos con los valores vecinos al dato afectado por ruido.

Luego de haber modificado los datos de resistividad eléctrica asociados a ruido, se comprobó que los datos mantuvieran el formato adecuado como se muestra en la ilustración 14, de este modo importarlos en el software Res2DInv®, al tiempo que se anexo la información correspondiente con la topografía de cada perfil, la cual fue obtenida del Modelo de Elevación Digital (MDE) de la zona de estudio, obtenido de Inegi.

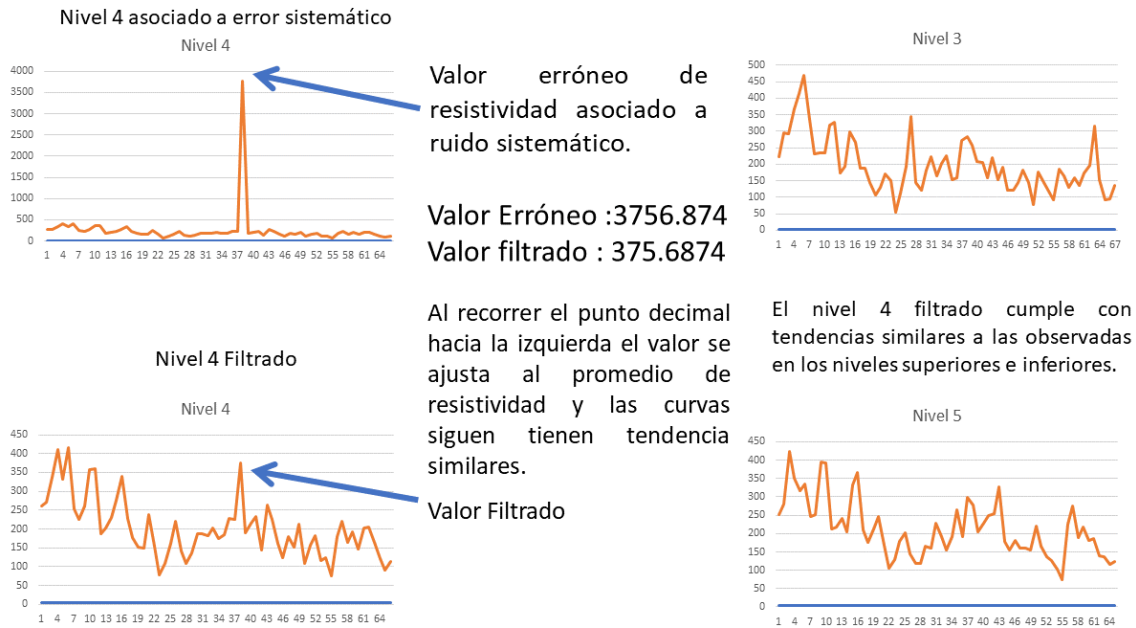


Ilustración 14 Error Sistemático y filtrado.

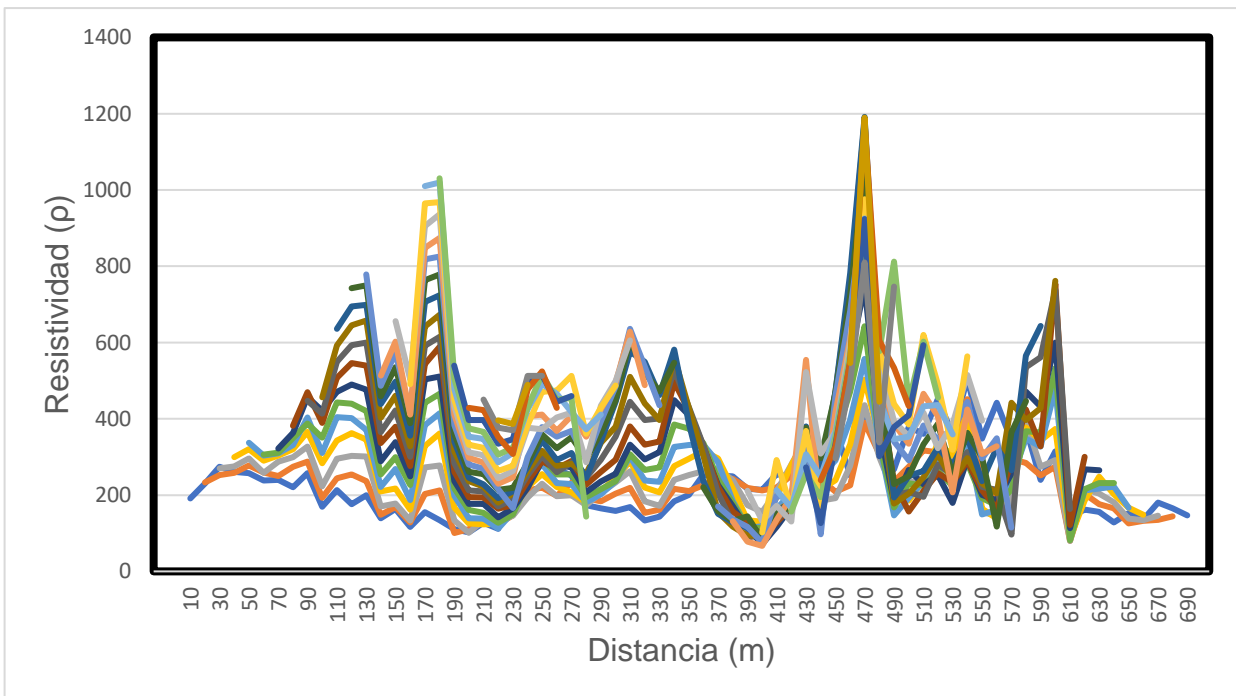


Ilustración 13 Grafica de resistividad aparente (ρ) por niveles.

4.3 Inversión de Datos

La inversión de los datos de resistividad eléctrica se realizó con el software Res2DInv® de la Compañía Geotomo Software Inc., el cual admite los datos en formato .DAT o .TXT mismos que deben tener un orden adecuado de los diferentes parámetros como se muestra en la Ilustración 15.

```

*L 1 Sc: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Perfil 1 W-Sc Nombre del Archivo.
10.....Distancia entre electrodos.
7.....Tipo de Arreglo ( Wenner=1, Polo-Polo=2,
Dipolo-Dipolo=3, Polo-Dipolo=6, Schlumberger=7,
Equatorial Dipolo-Dipolo=8).
414.....Numero total de datos.
0.....Se usa "0" si el primer electrodo esta en la ubicacion x (0)
0.....Se usa "0" si solo son datos de resistividad electrica.

(x) (a) (n) (ρ) (x) Ubicacion de Electrodos (a) Separacion entre Electrodos
(n) Nivel (ρ) Resistividad Electrica

10 10 1 59.43
20 10 1 61.99
30 10 1 52.94
40 10 1 61.82
50 10 1 70.22
60 10 1 70.09
70 10 1 73.02
80 10 1 58.97
380 10 3 108.28
390 10 3 194.16
400 10 3 166.34
410 10 3 188.6
2.....Se usa "2" si se cuenta con la topografia
o en caso de contar con ella se coloca "0"
5.....Aqui se debe colonar el numero de puntos
con topografia
0 912.6412948 Acontinuación se coloca la posicion x del
120 911.9450321 electrodo y la componente z que lo define.
240 914.2861668
360 924.2070701
480 933.5553812
0 Al final se deben colocar cuatro ceros
0 para finalizar el formato.
0
0
0

```

Ilustración 15 Formato de archivo para Res2DInv®.

Si los datos disponen del orden adecuado el software realizará la inversión de datos aplicando el método de mínimos cuadrados amortiguados, utilizando “n” iteraciones. A continuación, el programa nos muestra el modelo de inversión.

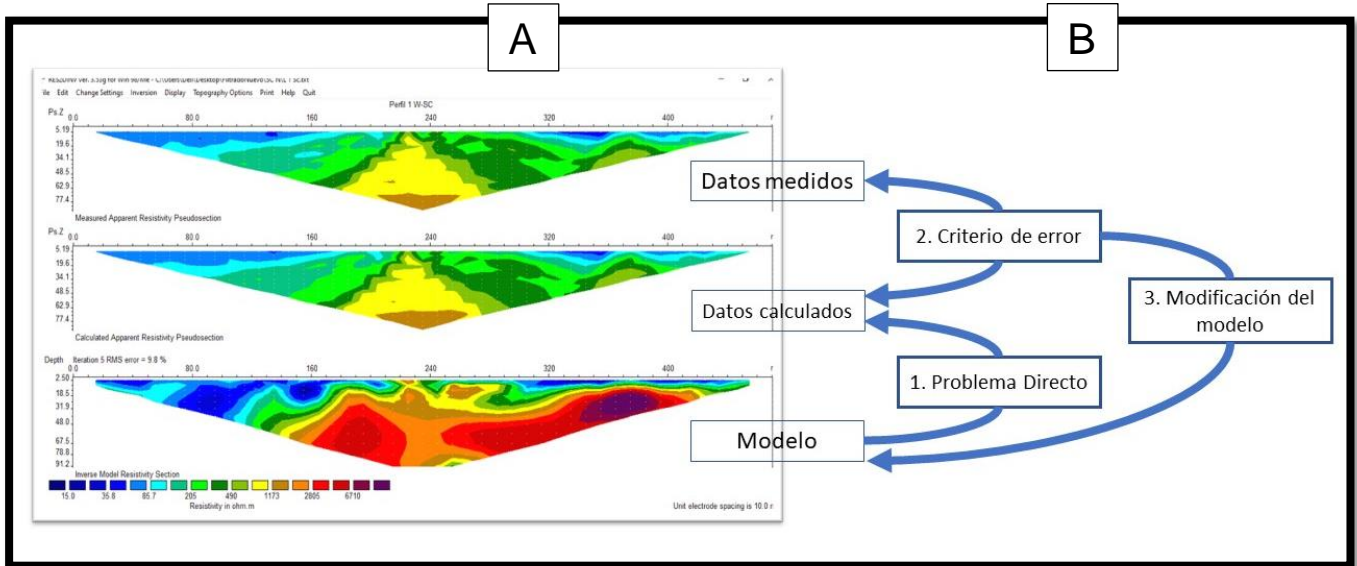


Ilustración 16 A) Pseudosección de resistividad aparente observada y calculada, junto al modelo obtenido por el programa de inversión. B) Etapas seguidas en el proceso de inversión (Arlandi Rodríguez, 2004).

Arlandi Rodríguez señala que la generación de la TRE parte del procedimiento de inversión, a partir de los datos de resistividad aparente medidos, representados en forma de pseudoperfil. A continuación, se genera un modelo hipotético de resistividades verdaderas del subsuelo, resolviendo lo que se define como “Problema Inverso”, se llega al modelo de resistividades aparentes que se derivaría del mismo. Estas resistividades aparentes se comparan con las realmente medidas y se calcula el error cometido. A través de ese error se modifica el modelo hipotético real de resistividades verdaderas, y se repite el proceso anterior. De este modo, tras una serie de iteraciones se consigue un modelo de resistividades verdaderas del subsuelo que da explicaciones a las resistividades aparentes medidas. De esta forma a partir de los resultados de las mediciones de resistividad eléctrica, nos permite determinar el modelo geoelectrico.

El software RES2DINV® tiene tres métodos diferentes que pueden ser usados para incluir la topografía al modelo de inversión (Loke, 2000). En los métodos se usa malla de elementos-finitos distorsionada, donde los nodos superficiales son desplazados hacia arriba o hacia debajo, de forma que coincidan con la topografía real. De esta forma la topografía forma parte de la malla y automáticamente se integra al modelo de inversión, la diferencia entre estos métodos es la forma en que se desplazan los nodos en el subsuelo.

Al cambiar los nodos del subsuelo en la misma medida que el nodo de superficie, a lo largo de la misma vertical, obtenemos un modelo de bloques con una malla distorsionada uniformemente (Ilustración 17). En la segunda aproximación, el desplazamiento de los nodos del subsuelo se reduce de forma exponencial con la profundidad (Ilustración 17 B), de forma que a mayor profundidad los nodos no se desplazan. Esperando que el efecto de la topografía se reduzca o amortigüe con la profundidad, esto produce un mejor modelo que el método de elementos-finitos, en el sentido de que no se producen todos los pliegues de la topografía de la superficie en todas las capas. Para un conjunto de datos donde la topografía tiene una curvatura moderada, este es un método muy útil.

Una desventaja de este método es que a veces produce un modelo con capas gruesas debajo de las secciones donde la topografía se curva hacia arriba. En la Ilustración 17 D, el modelo es un poco grueso cerca de la mitad de la línea donde la topografía curva hacia arriba y demasiado delgada hacia el extremo derecho de la línea donde la topografía curva hacia abajo. El modelo resultante depende en parte del grado de amortiguación elegida por el usuario. Los valores de 0.5 a 1.0 se usan generalmente como factor de amortiguamiento de la topografía en el programa RES2DINV®.

El método inverso de transformación de Schwartz-Christoffel (Spiegel,1980) es usado para calcular la cantidad que se van a desplazar los nodos del subsuelo. Este método toma en cuenta la curvatura de la topografía en superficie, de esta forma evitar los errores de los métodos anteriores para brindar un modelo más natural (Ilustración 17 E).

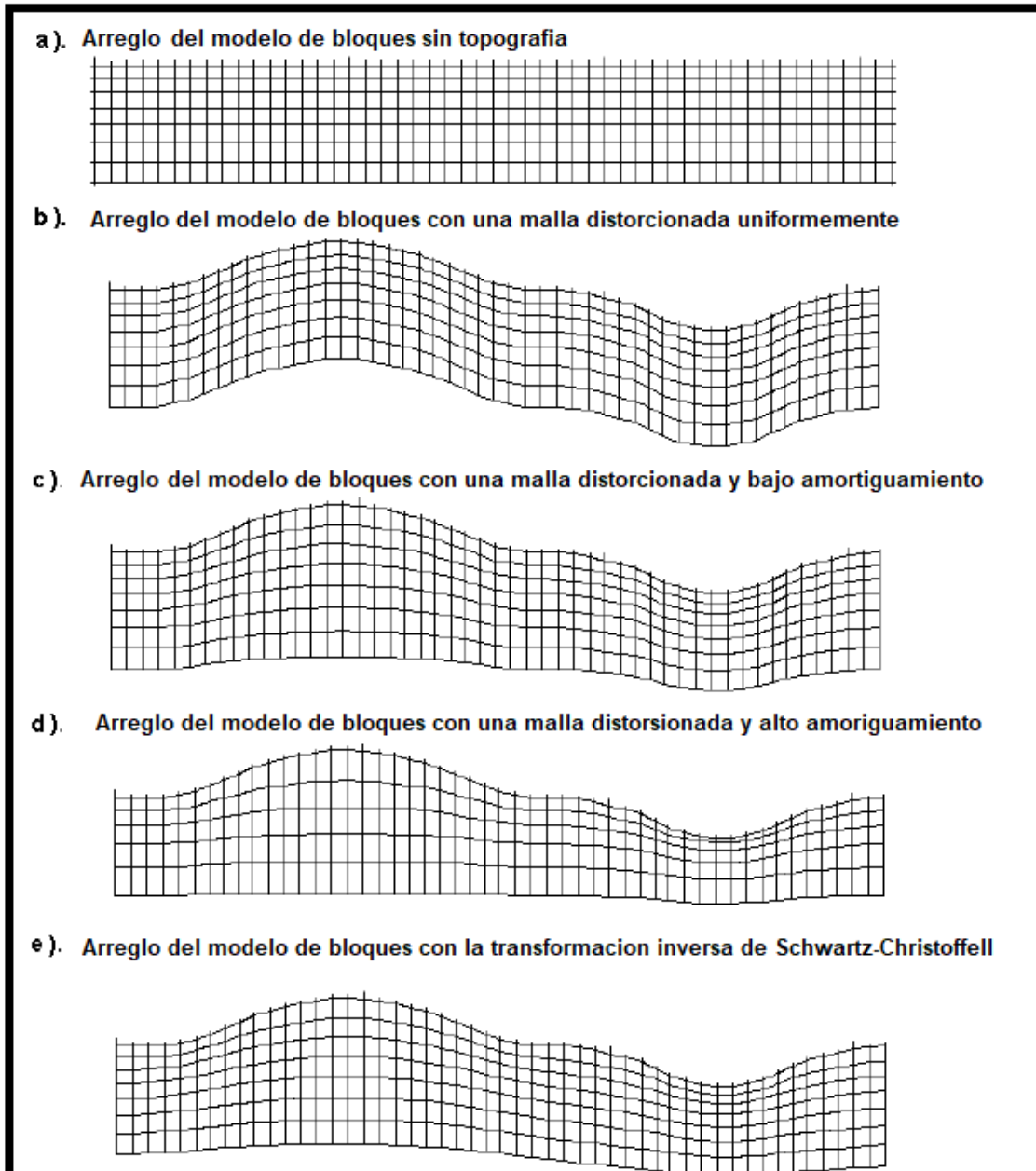


Ilustración 17 Diferentes métodos para incluir la topografía en el modelo de inversión 2D.

El software permite visualizar y eliminar los puntos o datos erróneos, lo cual no es necesario debido a que anteriormente se realizó el análisis y filtrado de los datos. Cuando el programa lee un archivo que contiene datos topográficos aplica automáticamente el método de elementos finitos que incorpora topografía en la malla de modelación. El programa permite exportar los datos invertidos, en este

caso para el software Surfer 13™ debido a que nos brinda diversas alternativas para la presentación de nuestros modelos geoeléctricos.

4.4 VISUALIZACIÓN DE LOS MODELOS GEOELÉCTRICOS 2D

La representación gráfica se realizó con Surfer 13™ y Voxler 4™, ambos de la compañía Golden Software Inc®. El programa Surfer 13™ permite realizar una interpolación de los resultados obtenidos de la inversión de los datos geoeléctricos, se empleó el método Krigging, debido a que es un método de inferencia espacial, el cual nos permite estimar los valores de una variable en lugares no muestreados utilizando la información proporcionada por la muestra (Porrás, 2017). Otra característica importante de dicho programa es que nos permite visualizar y resaltar los elementos de nuestro modelo geoeléctrico en 2D. Con el propósito de obtener visualizaciones 3D se empleó el programa Voxler 4, los resultados obtenidos nos brindan la oportunidad de intuir la distribución del subsuelo a partir de la correlación de los perfiles geoeléctricos.

Capítulo V Resultados

5 Análisis de Resultados obtenidos

Se realizaron doce perfiles de tomografía distribuidos de forma estratégica en la zona de estudio con el fin de obtener los modelos geoelectricos que nos ayuden a identificar las anomalías resistivas asociadas a rocas ígneas mineralizadas. La sierra de santa maría Nogalar presenta una topografía variada característica de las zonas montañosas, debido a lo cual las líneas de tomografía presentan diferentes pendientes.

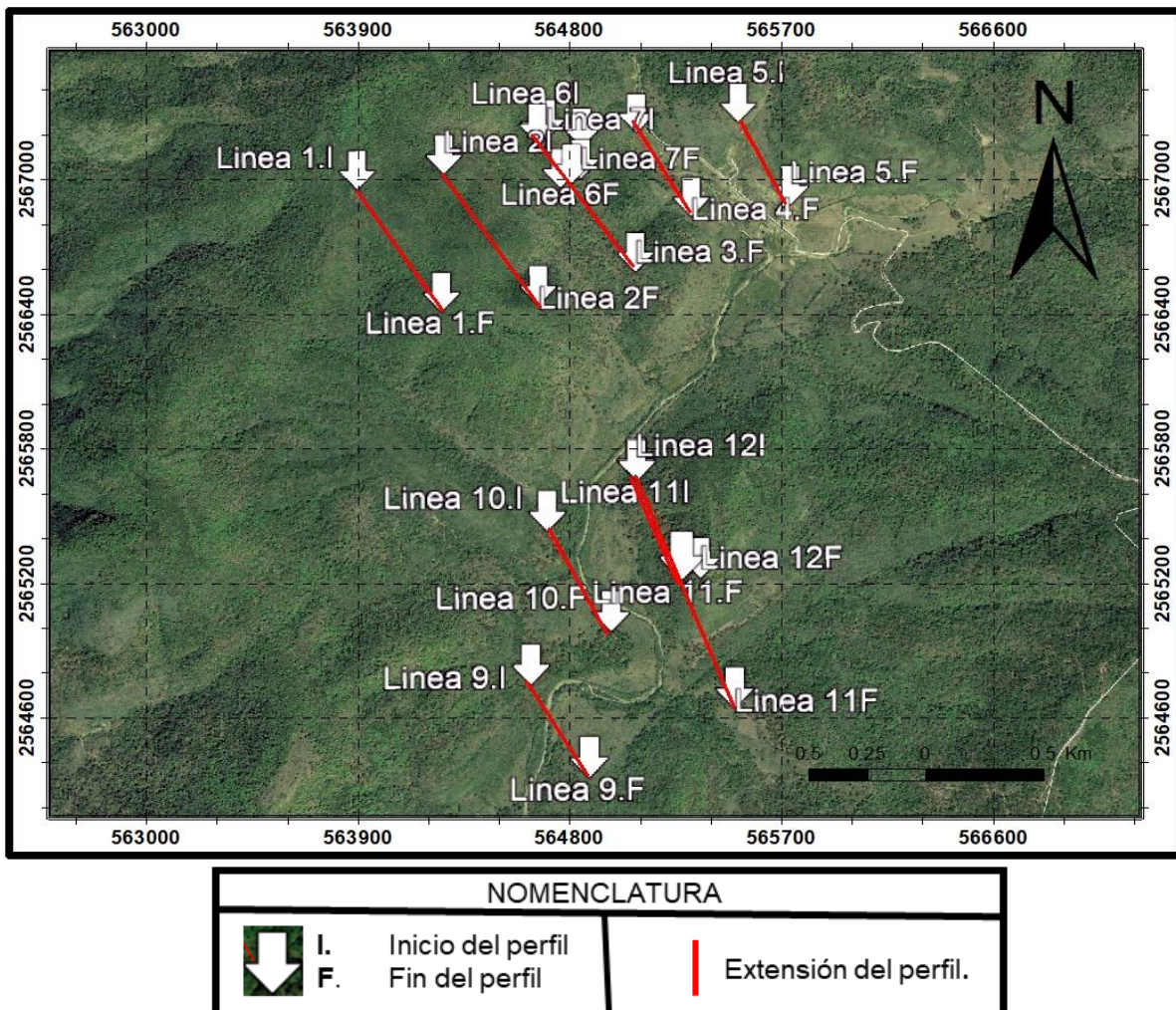
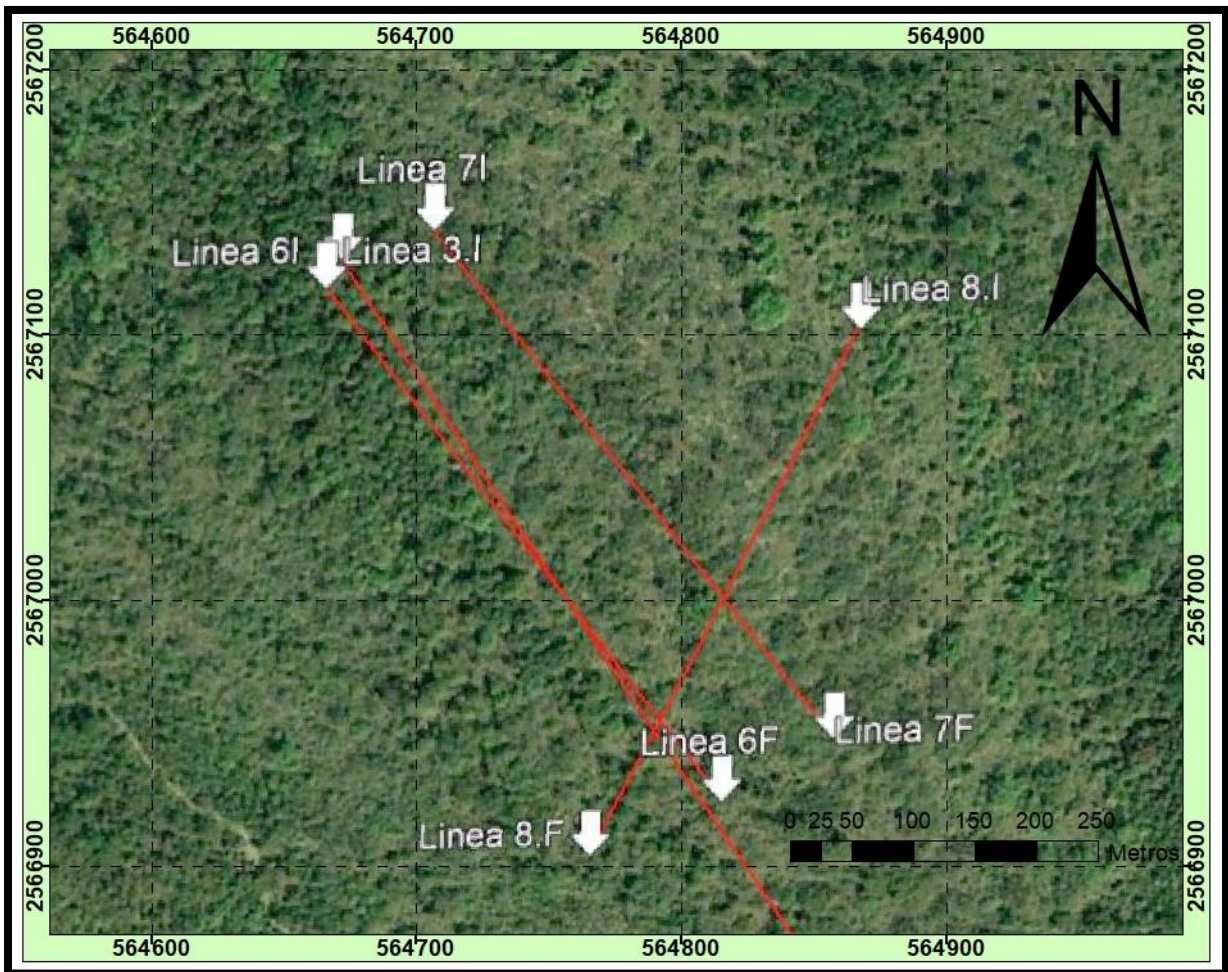


Ilustración 18 Mapa de ubicación de los perfiles de TRE.

El área de estudio es amplia como se puede observar en la ilustración 18, los perfiles 6, 7 y 8 tienen una longitud de 240 metros, por esta razón no se alcanzan a visualizar en el mapa anterior, estos se ubican entre la línea 3 y 4, mismos que se realizaron de tal forma para indagar el subsuelo someramente y con mayor detalle, al aplicar un espaciamiento entre electrodos menor.



NOMENCLATURA	
I.	Inicio del perfil
F.	Fin del perfil
	Extensión del perfil.

Ilustración 19 Mapa de ubicación de los perfiles 6,7 y 8.

5.1 Análisis de los valores de Resistividad

Las resistividades del área de estudio van de $10 \text{ Ohm} \cdot m$ hasta valores mayores a $1500 \text{ Ohm} \cdot m$. Los cuales varían debido al tipo de roca, compactación de los materiales, la alteración de la roca caja por fluidos hidrotermales o la roca encajante.

De acuerdo con los valores de resistividad que presentan los perfiles de TRE se han asignado seis unidades geoelectricas. Cada unidad corresponde a un intervalo de resistividad eléctrica. Al realizar la clasificación de las unidades geoelectricas es importante tener en cuenta la geología de la zona de estudio, así como los factores que afectan la resistividad. La litología de la zona se compone principalmente de rocas calizas y rocas ígneas, por lo tanto, las anomalías de mayor resistividad se atribuirán a litologías ígneas, en tanto que los valores asociados a roca caliza pueden variar entre 200 y $900 \text{ Ohm} \cdot m$, a causa de los diferentes factores que pueden estar afectando la roca. La intrusión del cuerpo ígneo alteró la roca encajonante creando entre estas dos una zona de alteración o transición, misma que tendrá valores intermedios de resistividad (1200 a $1600 \text{ } \Omega \cdot m$), asociados a calizas con metamorfismo incipiente hasta skarn.

A continuación, se presenta una tabla de asociación de unidades geoelectricas.

Tabla 3 Tabla de Unidades resistivas.

Unidad	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Litología
I	0 a $180 \text{ } \Omega \cdot m$	Lutitas
II	200 a $500 \text{ } \Omega \cdot m$	Caliza Fracturada
III	600 a $900 \text{ } \Omega \cdot m$	Caliza Compacta
IV	1000 a $1300 \text{ } \Omega \cdot m$	Zona de Alteración A
V	1400 a $1800 \text{ } \Omega \cdot m$	Zona de Alteración B
VI	$>1900 \text{ } \Omega \cdot m$	Diorita con Galena y Hornblenda

Unidad I

Los valores de resistividad para esta unidad son de 0 a 180 $Ohm \cdot m$, esta unidad se asocia a la zona superficial de los perfiles, debido a lo cual es afectada por los procesos geológicos externos, los cuales alteran las rocas. Esta unidad se asocia con lutitas o material suelto.

Unidad II

Los valores de resistividad para esta unidad van de 200 a 500 $Ohm \cdot m$, este rango de resistividades podría estar representando un cambio en la litología o una compactación de los materiales externos, algunas rocas como las calizas tiene rangos de resistividad muy amplios dependiendo de la alteración que esta ha sufrido, de esta manera podríamos asociar estos valores con roca caliza fracturada.

Unidad III

En esta unidad los valores de la resistividad van de 600 a 900 $Ohm \cdot m$, por lo general al aumentar la profundidad de estudio la resistividad aumenta, esto nos indica una mayor compactación de los materiales del subsuelo. Las rocas calizas sin alteración se ajustan a estos rangos de resistividad, la geología de la zona de estudio presenta una amplia distribución de este tipo de roca.

Unidad IV y V

La resistividad de las rocas tiende a aumentar a mayor profundidad, sin embargo, para el presente caso de estudio se debe tener en cuenta que los depósitos hidrotermales originan halos o aureolas de contacto entre la roca encajonante y el cuerpo intrusivo. La Unidad IV se asocia a valores de resistividad de 1000 a 1300 $Ohm \cdot m$, esta zona presenta una menor alteración. La Unidad V está relacionada a una mayor alteración de la roca encajonante con valores de 1400 a 1800 $Ohm \cdot m$. La aureola de contacto es una zona intermedia entre la roca encajonante y el cuerpo intrusivo, esta se ha subdividido en baja y alta alteración. En esta zona se asocia la presencia de calizas afectadas por los procesos hidrotermales dando lugar a skarn.

Unidad VI

Las rocas ígneas suelen presentar resistividades con rangos elevados, por este motivo se espera identificar contrastes resistivos en las secciones geoeléctricas. Los valores de resistividad asociados a la Unidad VI son mayores a $1900 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$, por esta razón se espera que los materiales que presentan estos valores sean rocas ígneas. Las zonas en las cuales se observan estos rangos son a profundidad aproximadamente, a partir de 45 metros.

5.2 Perfiles e Interpretación

Perfil 1 Wenner-Schlumberger (W-S)

El perfil 1 Wenner-Schlumberger (W-S) ilustración 20, muestra una disposición uniforme del subsuelo, delimitando tres zonas, la unidad II y III, se asocia a rocas calizas, en la parte superior, se presentan fracturadas, en tanto que las inferiores presentan una mayor resistividad asociada a la compactación de estas rocas. En la zona inferior los valores de resistividad mayores a $900 \Omega \cdot m$ relacionados con una baja alteración de la roca caja o mayor compactación de los materiales.

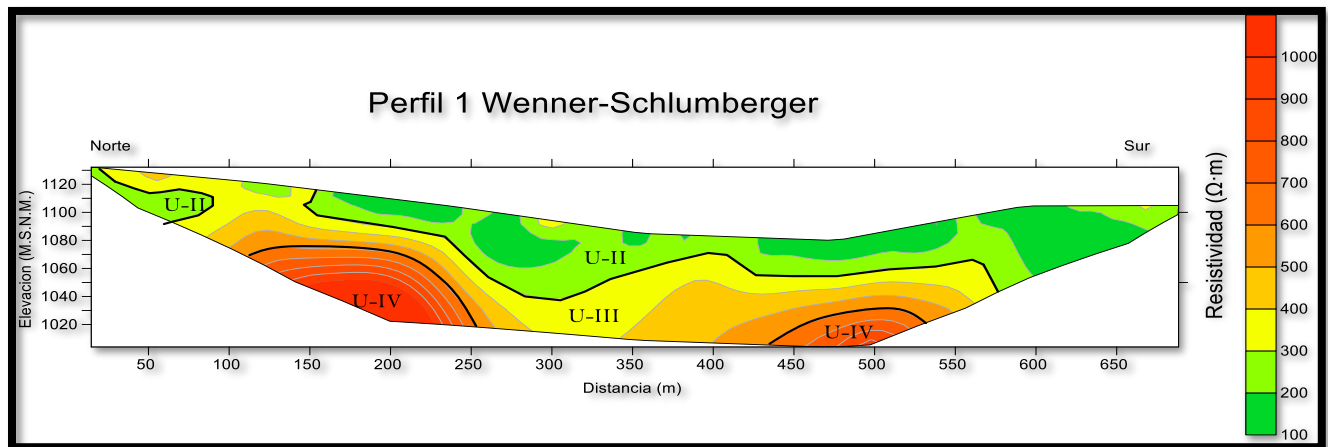


Ilustración 20 Perfil 1 Wenner-Schlumberger.

Perfil 1 Dipolo-Dipolo (D-D)

El perfil Dipolo-Dipolo (D-D) ilustración 21, muestra una disposición irregular de los componentes del subsuelo, podemos identificar una fuente puntual a los 260 metros del inicio del perfil, aproximadamente a 20 metros de profundidad se observa posible saturación de agua en esta pequeña zona. El arreglo D-D penetra a una mayor profundidad (20 metros), con lo cual podemos observar el comportamiento de la unidad IV, la cual parece continuar a profundidad.

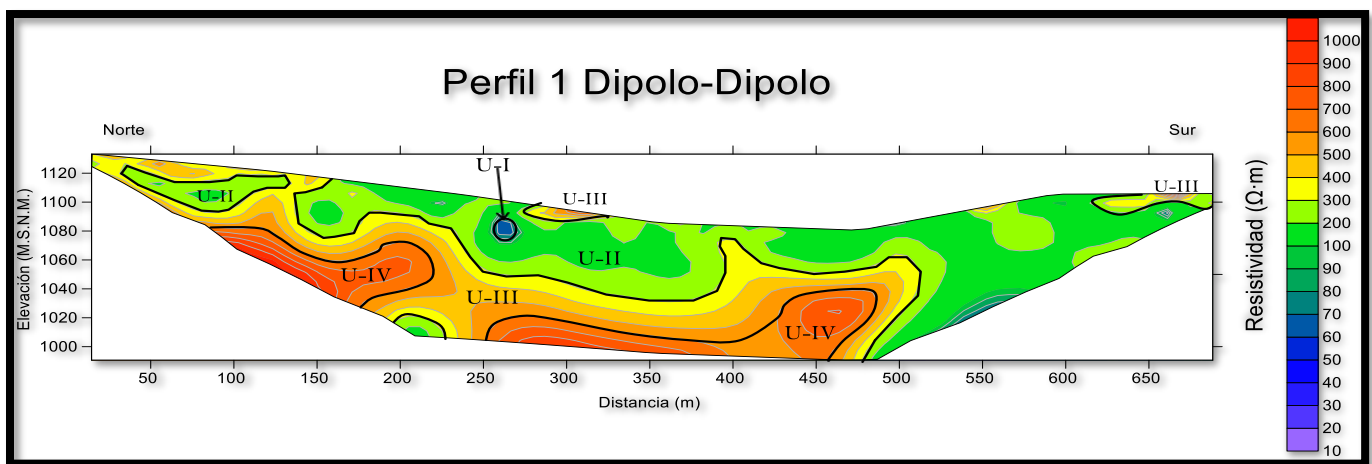


Ilustración 21 Perfil 1 Dipolo-Dipolo.

Los arreglos presentan similitud en la detección de las unidades geoelectricas, cabe resaltar que el arreglo D-D es sensible en la identificación de pequeñas estructuras y una mayor profundidad de investigación. El arreglo W-S muestra de manera clara los cambios litológicos en el subsuelo.

Perfil 2 Wenner-Schlumberger

El perfil W-S muestra dos estructuras interesantes, con valores de 500 $\Omega\cdot m$ los cuales van aumentando en la zona central de dichas estructuras superando los 2000 $\Omega\cdot m$, estos valores de resistividad se relacionan con skarn o rocas calizas con alteración hidrotermal. Las zonas con valores de inferiores a 400 $\Omega\cdot m$ se asocian con rocas calizas fracturadas, en la zona central del perfil entre los 350 y 450 metros se pueden observar un pequeño cuerpo de baja resistividad el cual podría ser causado por saturación de agua.

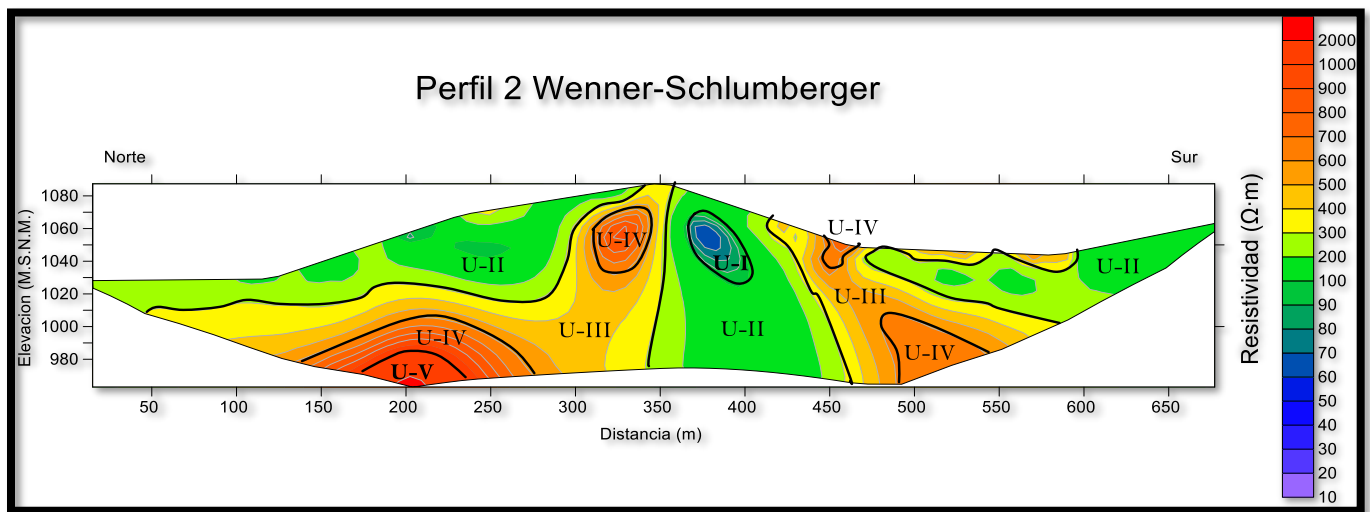


Ilustración 22 Perfil 2 Wenner Schlumberger.

Perfil 2 Dipolo-Dipolo

El perfil D-D muestra zonas con altos resistivos, de igual forma se pueden observar bajas resistividades que llaman la atención debido a que se encuentran en la zona inferior donde se esperan valores altos de resistividad. En la zona central de perfil se aprecia un alto resistivo entre los 240 y 350 metros, mismo que parece estar aislado contrario a lo esperado debido a que las altas resistividades se asocian con soluciones hidrotermales que ascienden. La estructura ubicada en la zona sur del perfil es altamente resistiva por lo que se asocia con skarn con valores de 2200 $\Omega\cdot m$. Los espacios asociados con la unidad I se puede tratar de zonas con saturación de agua, las cuales son muy pequeñas.

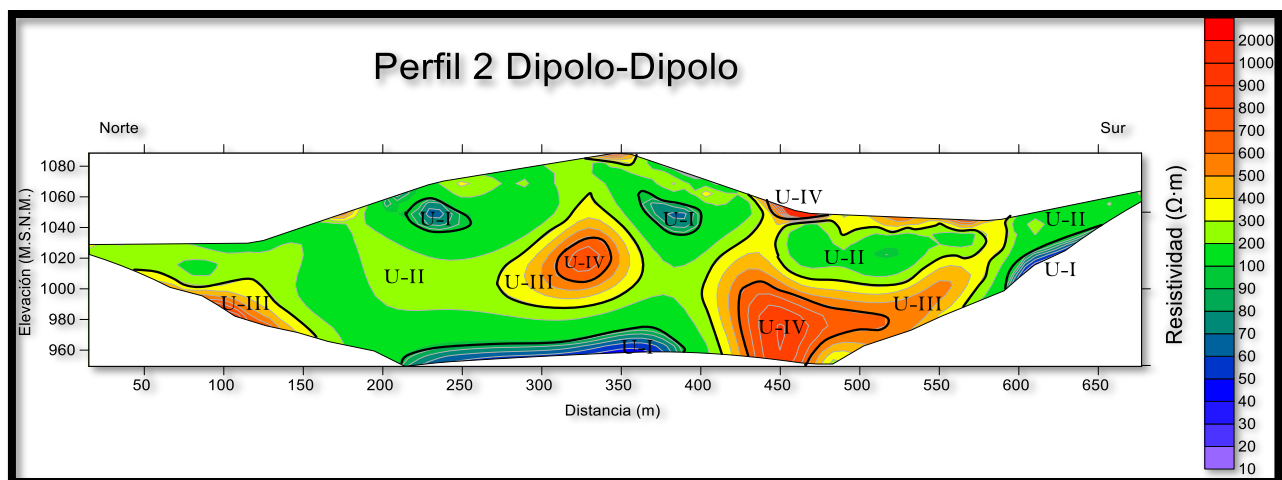


Ilustración 23 Perfil 2 Dipolo-Dipolo.

El perfil 2 presenta diferencia entre los arreglos empleados, la cual es notoria en configuración D-D donde se muestran bajos resistivos en la zona más profunda, esto puede ser provocado por una posible saturación de agua acompañado de fracturamiento de la roca caliza. Asimismo, el arreglo D-D, parece ser eficiente en la identificación de estructuras pequeñas o puntuales como las que se pueden observar en la ilustración 23.

Perfil 3 Wenner-Schlumberger

La sección correspondiente al perfil 3 presenta valores altos de resistividad que superan los 2000 $\Omega\cdot m$, los cuales se ajustan con diorita. Por tal motivo este perfil presenta gran importancia en el presente estudio.

El perfil W-S presenta una zona de contacto entre el cuerpo intrusivo y la roca caja. La zona superficial que comprende entre los 20 y 40 metros de profundidad se caracteriza por valores de entre 10 y 400 $\Omega\cdot m$. los cuales se relacionan con la unidad II y III (roca caliza). Enseguida podemos identificar una zona de transición o halo de alteración donde podemos esperar rocas de tipo skarn originadas por soluciones hidrotermales. La resistividad en estas zonas es mayor con valores de 900 a 1800 $\Omega\cdot m$. podemos identificar una anomalía con valores altos de resistividad entre los 160 y 260 metros a una profundidad de 45 metros, esta zona se relaciona con diorita.

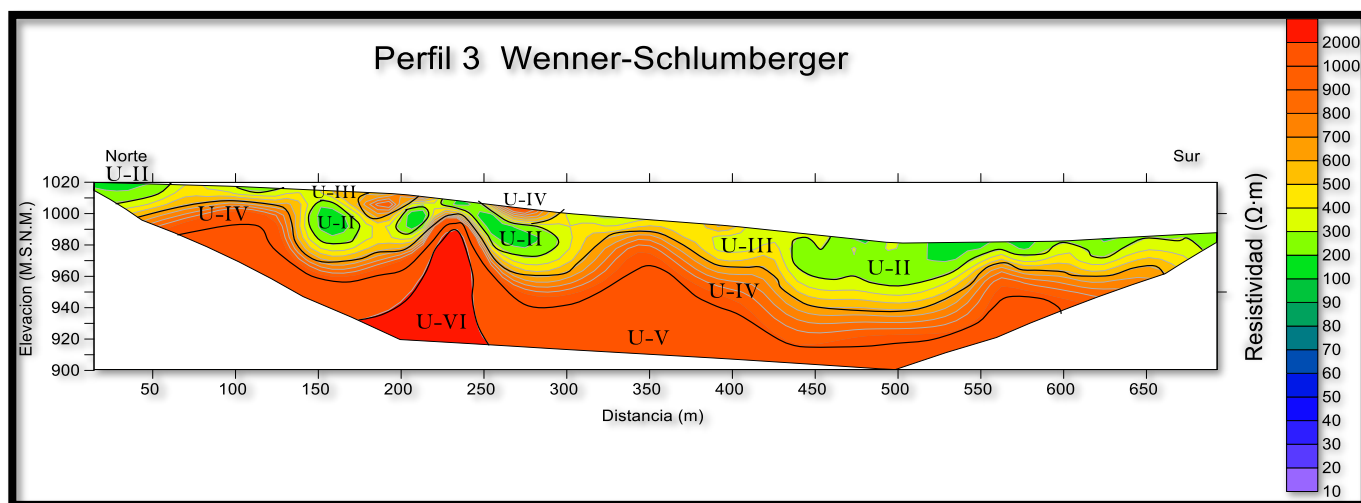


Ilustración 24 Perfil 3 Wenner-Schlumberger.

Perfil 3 Dipolo-Dipolo

El perfil D-D nos muestra una anomalía resistiva con valores de 2000 a 4000 $\Omega \cdot m$, la cual presenta una forma característica de los cuerpos intrusivos; se puede observar el halo de alteración que rodea a la zona central de la anomalía, esta zona se extiende de los 125 metros hasta los 400 metros a una profundidad de 40 a 60 metros. En la zona sur del perfil se observa una anomalía de menor intensidad, lo interesante es que entre estas dos zonas resistivas hay una faja de baja resistividad, la cual podría tratarse de una fracturamiento, debido a que es muy clara en el perfil. La zona superficial se pueden observar intercalaciones de lutita y caliza, las cuales en ciertas zonas son más compactas o con cierto grado de metamorfismo.

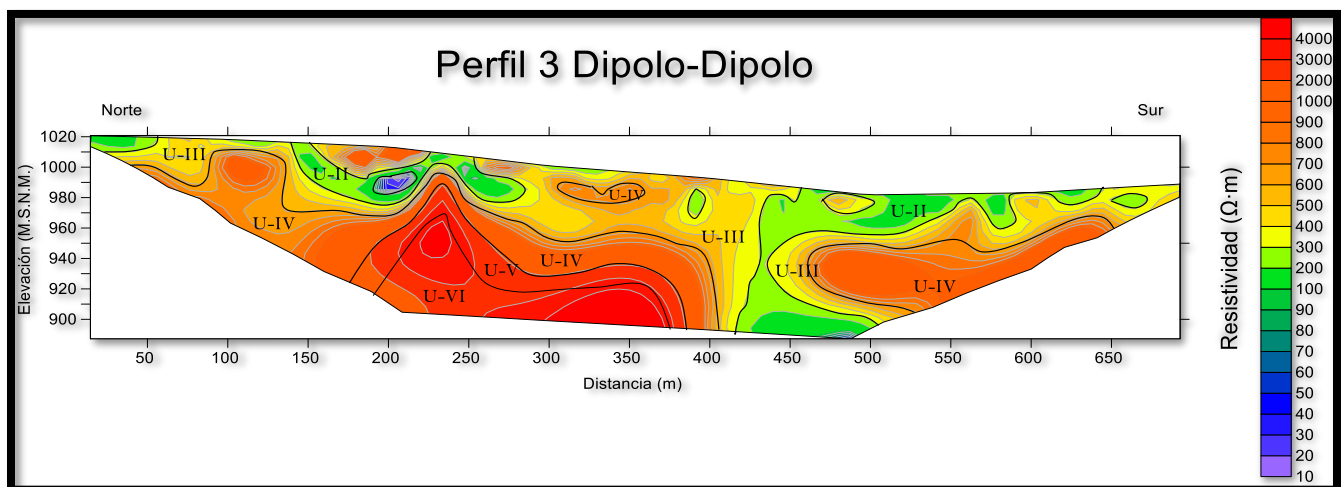


Ilustración 25 Perfil 3 Dipolo-Dipolo.

En ambos perfiles se puede observar valores altos de resistividad asociados a diorita, por lo cual es análisis de esta zona es importante. La anomalía está presente en ambos perfiles, el arreglo W-S tiene una distribución uniforme mientras que el perfil D-D es irregular, por esta razón debemos identificar de manera eficaz la distribución de la anomalía resistiva.

Perfil 4 Wenner-Schlumberger

El perfil W-S presenta una distribución uniforme de los materiales del subsuelo con cambios graduales, las zonas asociadas a las unidades IV, V y VI abarcan gran parte del perfil

En la zona central del arreglo W-S se puede observar una estructura que se asemeja a un cuerpo intrusivo, el cual tiene mayor dimensión a profundidad y va disminuyendo conforme se acerca a la superficie y aflora en la zona central del tendido. En la zona central se encuentra los valores altos de resistividad asociados a las unidades IV, V y VI que se asocian a roca ígnea diorita. En las partes laterales del perfil se observan valores bajos en la zona superficial correspondientes a lutitas. La distribución de los materiales está claramente limitada por los valores de resistividad.

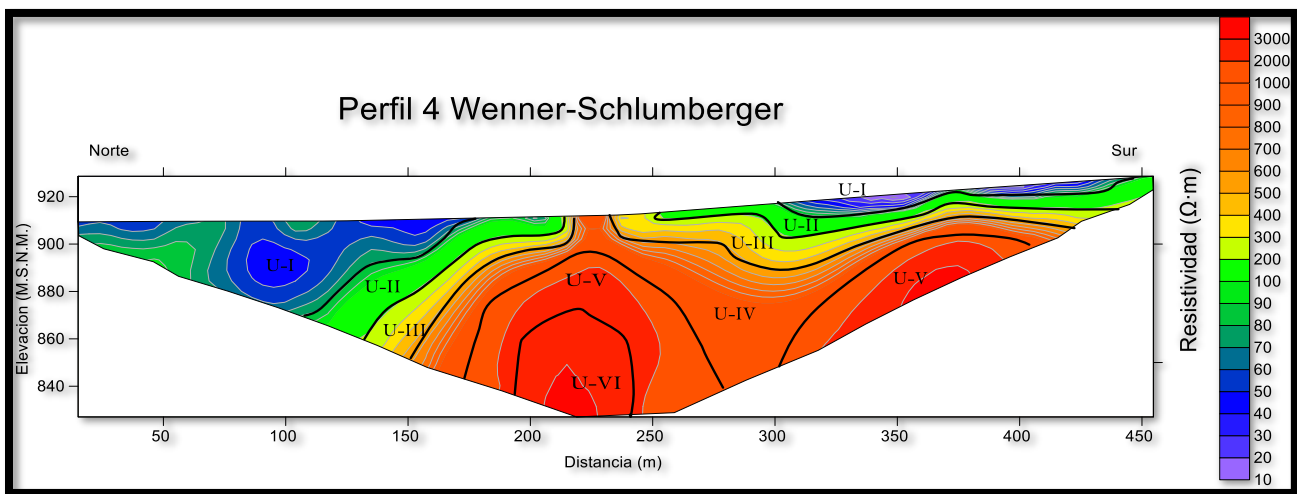


Ilustración 26 Perfil 4 Wenner-Schlumberger.

Perfil 4 Dipolo-Dipolo

El perfil D-D presenta una mayor distribución de valores intermedios de resistividad de entre 200 y 1000 $\Omega\cdot m$. Existe una anomalía resistiva entre los 250 y 400 metros de longitud lateral, a una profundidad aproximada de 50-60 metros. La cual afectó a las rocas de alrededor y va disminuyendo conforme se acerca a superficie. Los valores más altos registrados en este perfil se acercan a los 2000 $\Omega\cdot m$ los cuales aún se ajustan a la diorita. En la zona superficial presenta valores bajos asociados a la unidad I.

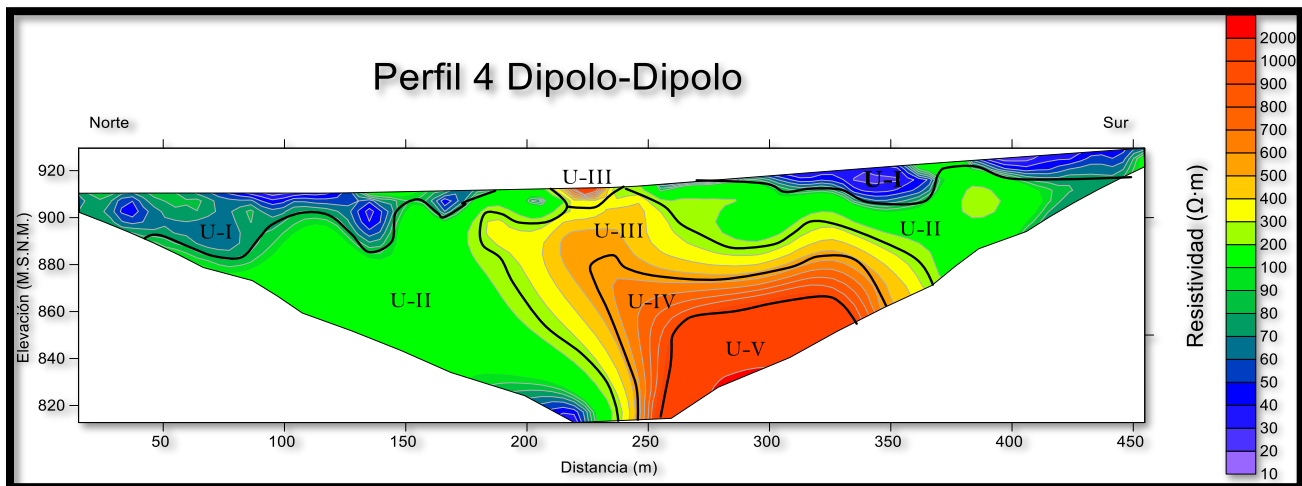


Ilustración 27 Perfil 4 Dipolo-Dipolo.

El perfil 4 W-S ilustración 26 muestra la existencia de un cuerpo intrusivo el cual está afectando la roca caja (caliza) abarcando gran parte del perfil, mientras que el arreglo D-D ilustración 27, se observa que esta estructura tiene una distribución menor, esto puede ser provocado por una posible pérdida de la corriente en el arreglo D-D.

Perfil 5 Wenner-Schlumberger

Los resultados obtenidos de los arreglos W-S y D-D son idénticos, la distribución de los materiales del subsuelo es similar en ambos casos, el arreglo D-D presenta valores de resistividad más altos que van de 10 a 3250 $\Omega \cdot m$, a la vez que el arreglo W-S varía entre los 5 y 1000 $\Omega \cdot m$.

El perfil W-S presenta una distribución homogénea y en forma de capas, la zona superficial presenta valores bajos de resistividad los cuales van aumentando conforme se avanza a profundidad, los valores varían entre 5 y 1000 $\Omega \cdot m$. Cada capa tiene un espesor aproximado de 20 metros. Los valores más altos se presentan en los últimos niveles estos van de los 700 a los 1000 $\Omega \cdot m$ que se asocian con roca caliza alterada por fluidos hidrotermales (skarn).

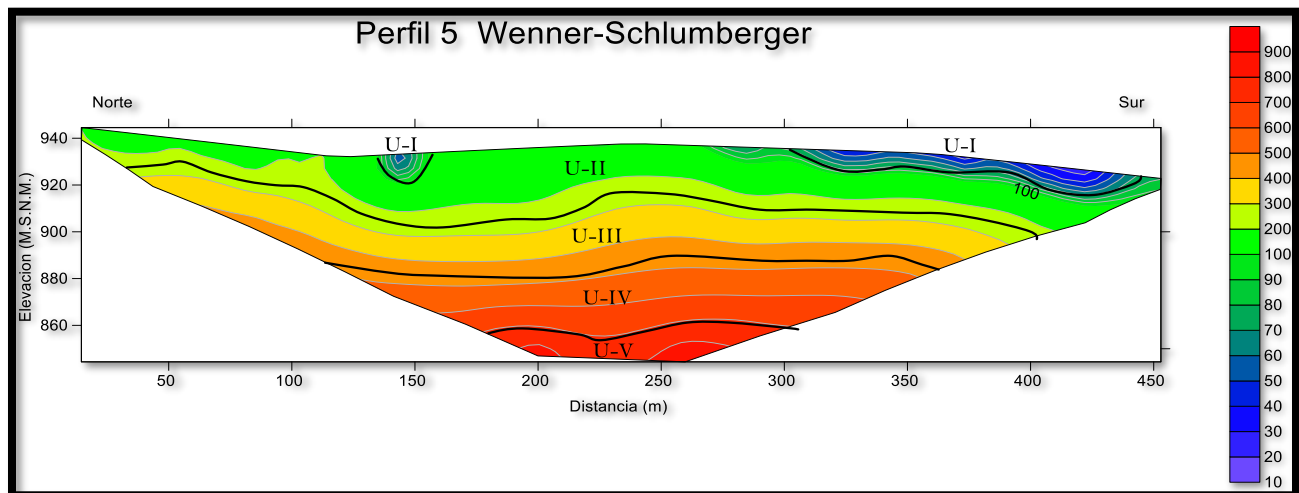


Ilustración 28 Perfil 5 Wenner-Schlumberger.

Perfil 5 Dipolo-Dipolo

La sección D-D tiene una gran similitud con el arreglo W-S, sin embargo, el arreglo D-D presenta valores más altos de resistividad, esto se atribuye a que este arreglo alcanza una profundidad de investigación mayor. Al aumentar la profundidad es común que de igual forma aumente la resistividad debido a una mayor presión y compactación de los materiales. La resistividad en esta zona supera los 2000 $\Omega\cdot m$ dichos valores se asocian con la diorita.

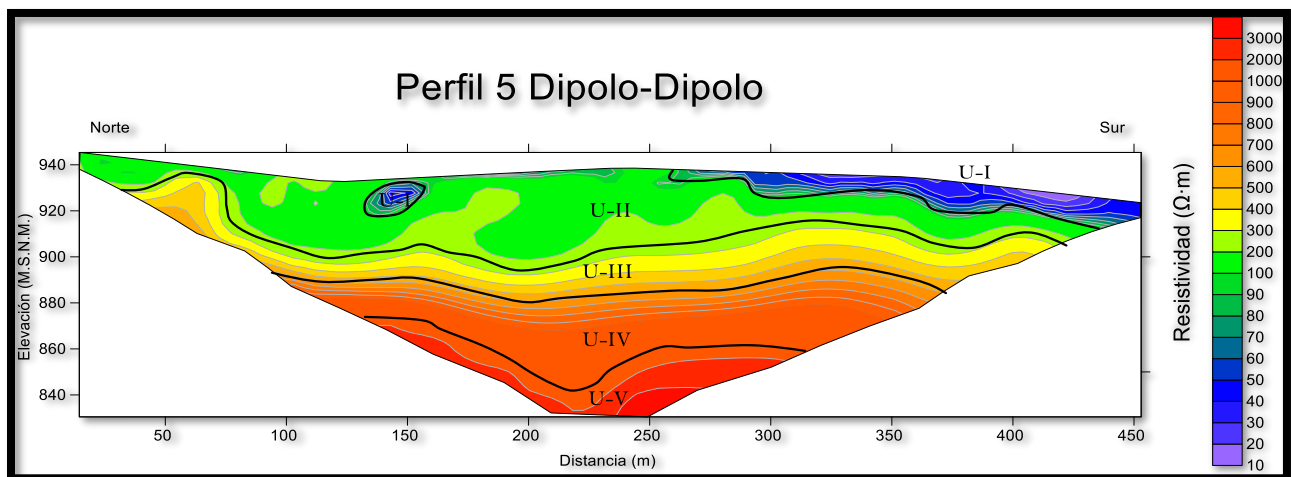


Ilustración 29 Perfil 5 Dipolo-Dipolo.

El modelo geoelectrico obtenido con ambos arreglos es muy similar uno con otro, esto podría ser causado por las características del terreno el cual presenta bajos resistivos cerca de la superficie, conforme va aumentando la profundidad también aumenta la resistividad, estos cambios son de forma gradual. El perfil 5 se ubica en la orilla Este por lo que debemos tener en cuenta que los valores superiores a $>1500 \Omega\cdot m$, se asocian a caliza compacta.

Perfil 6 Wenner-Schlumberger

En el perfil W-S se pueden observar zonas de bajas resistividades relacionadas a calizas fracturadas o con cierto grado de saturación de agua, con resistividades de 90 a 250 $\Omega\cdot m$. A la vez que las zonas asociadas a la unidad III con resistividades de 300 a 600 $\Omega\cdot m$ se asocian a calizas compactas o en buen estado. Se pueden observar cambios graduales en las resistividades que fueron afectando a la roca encajonante, donde las resistividades rebasan los 1000 $\Omega\cdot m$ son las zonas de transición o alteración que dieron lugar a skarn. Los valores superiores a 1500 $\Omega\cdot m$ corresponden con diorita se puede observar en la zona central del perfil a 15 metros de profundidad y en la zona norte a mayor profundidad entre los 40 y 45 metros.

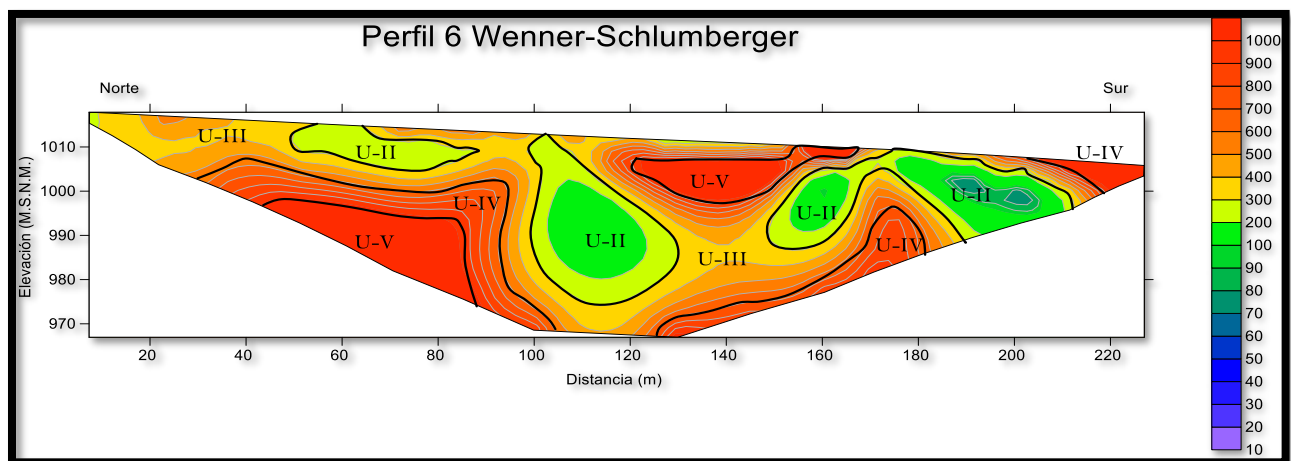


Ilustración 30 Perfil 6 Wenner-Schlumberger.

Perfil 6 Dipolo-Dipolo

El arreglo D-D presenta una distribución definida en tres capas, la zona superficial con resistividades de 500 a 900 $\Omega\cdot m$ asociadas a calizas con alteración hidrotermal. La segunda zona se observan valores bajos de resistividad menores a 200 $\Omega\cdot m$., relacionados con calizas fracturadas o con cierta saturación de agua que provoque las bajas resistividades, dicha capa consta de un espesor de 15 a 25 metros, a lo largo del perfil. La parte norte de la sección se caracteriza por los valores altos de resistividad a mayor profundidad, los valores registrados en esta zona se asocian con diorita debido a que son mayores a 1800 $\Omega\cdot m$.

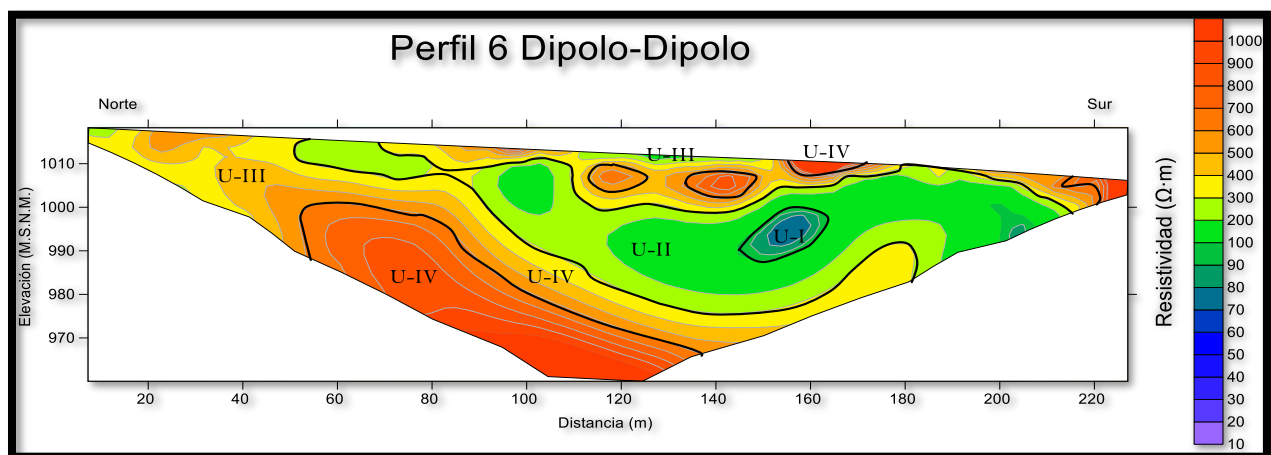


Ilustración 31 Perfil 6 Dipolo-Dipolo.

El arreglo D-D presenta una mayor distribución de la unidad II asociada a Caliza fracturada o con saturación de agua. Estos resultados pueden ser producto de un mayor número de mediciones en la zona y una mayor resolución en los niveles superiores.

Perfil 7 Wenner-Schlumberger

El perfil W-S posee resistividades de entre 220 y 2400 $\Omega\cdot m$., los valores más bajos en su conjunto se asocian a la unidad III, por tanto, la roca caliza se vincula a estas zonas, la posible existencia de agua o fracturas para las resistividades bajas, a la vez que los valores altos dependen de una mayor compactación y presión sobre la roca. La unidad IV y V cubren la mayor parte del perfil con resistividades superiores a los 1000 $\Omega\cdot m$ y menores a 1800 $\Omega\cdot m$., estas áreas corresponden a las zonas de transición o de alteración hidrotermal. Se puede observar en la zona inferior los valores altos de resistividad los cuales nos dan indicio de diorita a profundidad de 40 a 45 metros.

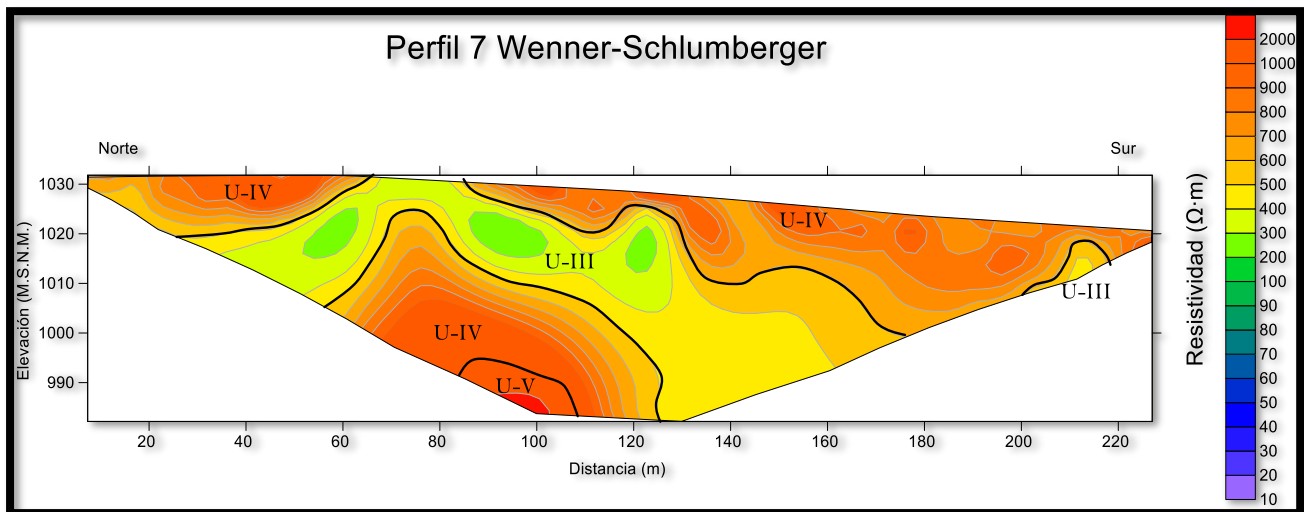


Ilustración 32 Perfil 7 Wenner-Schlumberger.

Perfil 7 Dipolo-Dipolo

El perfil D-D presenta una distribución similar al arreglo W-S, los valores obtenidos en este arreglo son menores. En la parte somera del perfil se asocia a skarn en la parte norte y sur, en la zona central se distinguen valores inferiores asociados a roca caliza compacta y un par de fuentes puntuales de baja resistividad relacionadas con la posible existencia de agua o fracturamiento de la roca. Los cambios graduales en el perfil permiten limitar de manera correcta la distribución de los materiales del subsuelo.

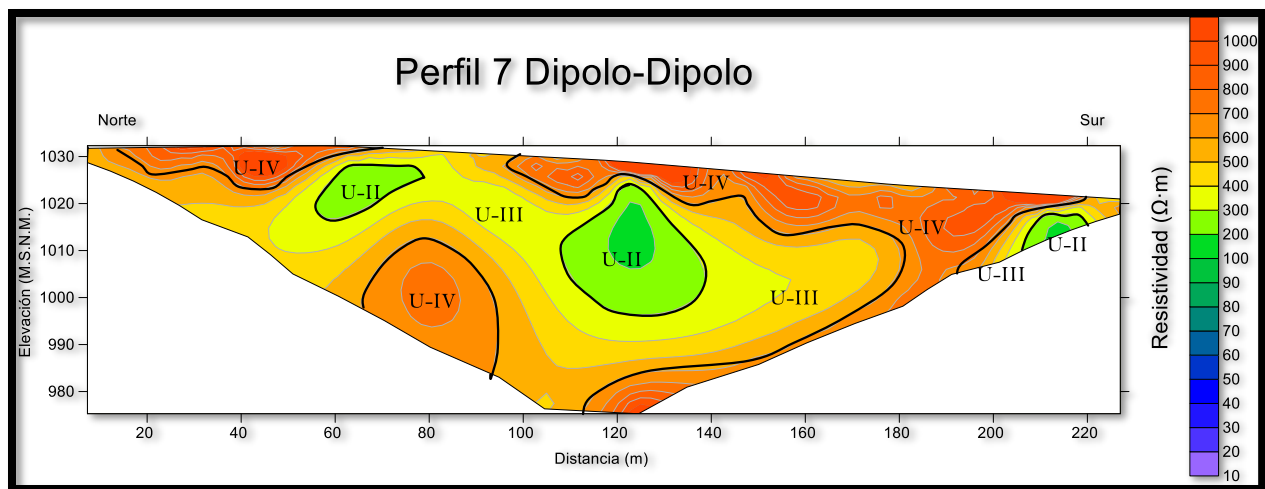


Ilustración 33 Perfil 7 Dipolo-Dipolo.

Perfil 8 Wenner-Schlumberger

El perfil 8 presenta diferentes elevaciones a lo largo del tendido, por esta razón el flujo de corriente se ve afectado por la topografía. En ambos arreglos se pueden observar valores altos de resistividad cerca de la superficie. El perfil 8 se intercepta con los perfiles 3, 6 y 7 por lo que el análisis de estos perfiles es complementario.

En el arreglo W-S se pueden observar valores de 1000 a 1300 $\Omega\cdot m$ en la zona superficial del perfil que corresponden con la unidad IV, estas zonas están asociadas a una estructura ígnea localizada a mayor profundidad, misma que fue alterando la roca caliza dando lugar a skarn que aflora en superficie. La zona central del perfil a 45 metros de profundidad existe resistividades superiores a 2000 $\Omega\cdot m$ que se asocian a la presencia de diorita. Las zonas con resistividades bajas se relacionan con la unidad II que pueden ser calizas fracturadas o con saturación de agua con valores de resistividad 200 a 450 $\Omega\cdot m$.

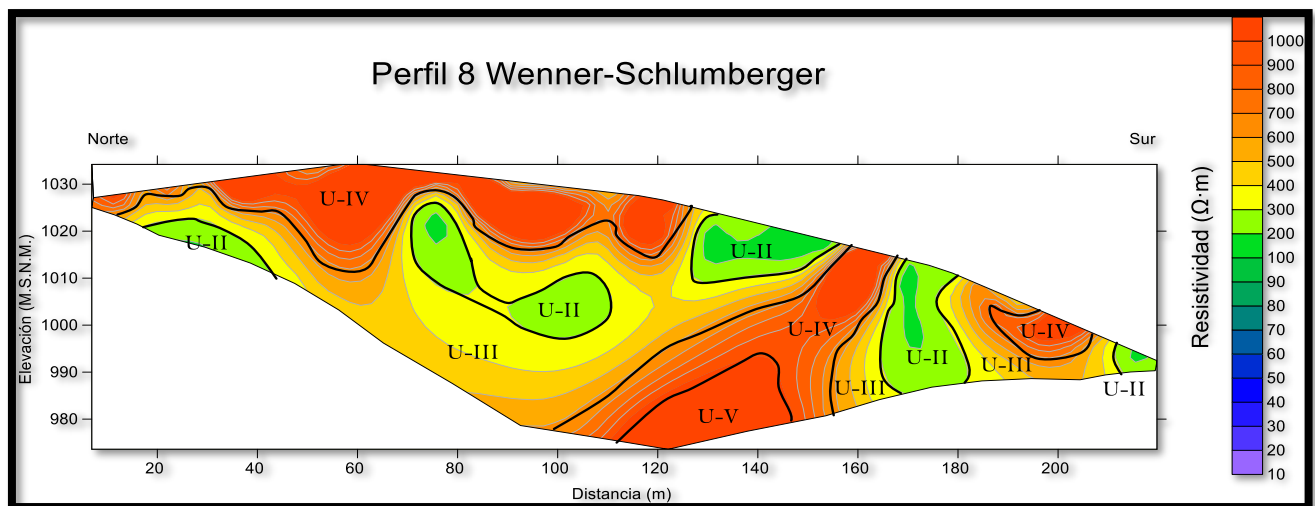


Ilustración 34 Perfil 8 Wenner-Schlumberger.

Perfil 8 Dipolo-Dipolo

En el perfil D-D se puede observar una anomalía resistiva a profundidad que esta enlazada con las zonas someras resistivas, las áreas asociadas a la unidad IV presentan valores de 1000 a 1400 $\Omega \cdot m$., asociados a skarn o diorita en el presente perfil. La unidad III se relaciona a la zona de transición entre el cuerpo ígneo y la roca caja, los valores de resistividad de esta zona es de 600 a 900 $\Omega \cdot m$. En la zona sur del perfil se observan valores bajos de resistividad los cuales se asocian a roca caliza fracturada o con cierto grado de saturación de agua.

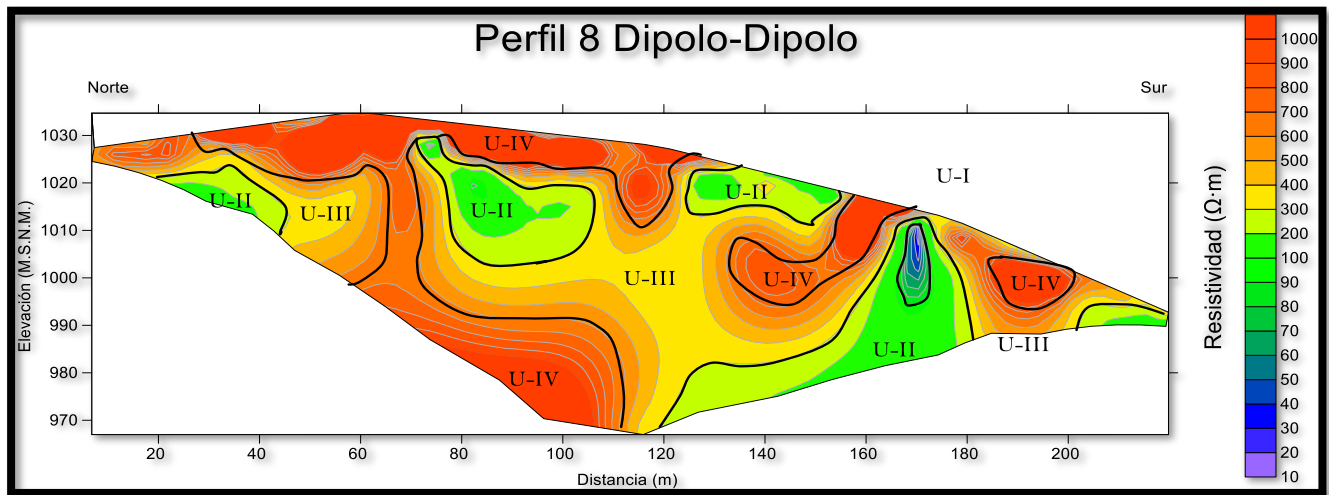


Ilustración 35 Perfil 8 Dipolo-Dipolo.

Perfil 9 Wenner-Schlumberger

El perfil W-S presenta una distribución en capas u horizontes perfectamente definidos con cambios graduales entre los materiales presentes. La capa superficial ubicada al centro y sur del perfil se visualiza resistividades de 80 a 250 $\Omega\cdot\text{m}$ correspondientes a la unidad II o caliza fracturada, con espesores que varían de 7 hasta los 45 metros. El segundo horizonte pertenece a la unidad III con resistividades de 300 a 700 $\Omega\cdot\text{m}$ asociadas a calizas sin alteración, esta capa se extiende a lo largo del perfil, no obstante, ocupa una gran área en la zona centro-sur del perfil. Los valores altos de resistividad se observan en la zona norte del perfil, los valores superiores a 1800 $\Omega\cdot\text{m}$ se asocian a diorita en tanto que los valores entre 1000 y 1700 $\Omega\cdot\text{m}$ se asocian a la unidad IV o zona de alteración de la roca caja.

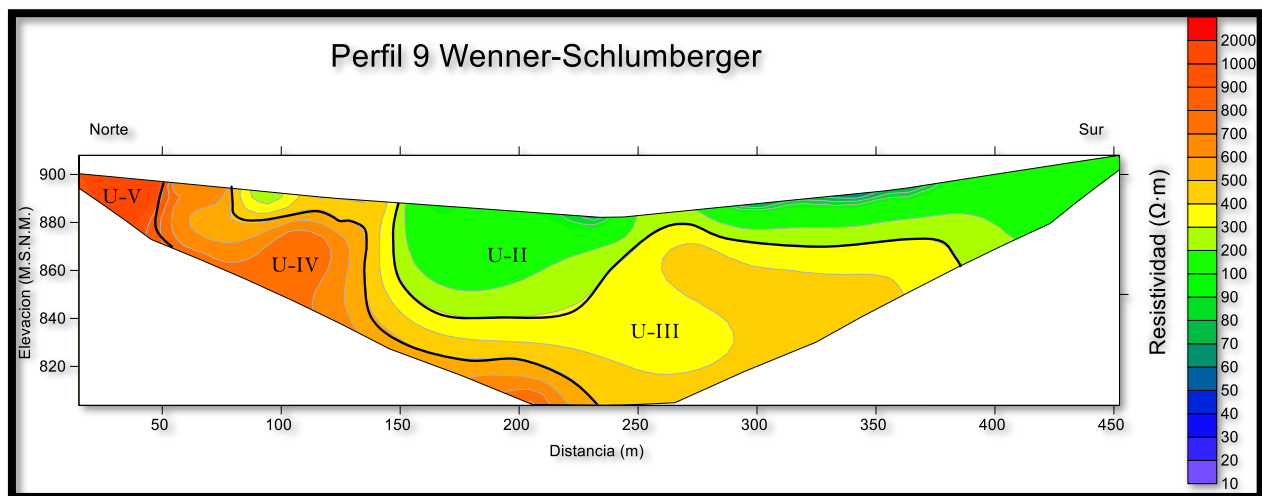


Ilustración 36 Perfil 9 Wenner-Schlumberger.

Perfil 9 Dipolo-Dipolo

El perfil D-D posee una distribución irregular de los materiales del subsuelo, entre tanto que el rango de resistividades es mayor y limita de forma precisa estructuras o cuerpos pequeños en el subsuelo. El arreglo D-D presenta una diferencia entre los 80 y 130 metros a una profundidad de 5 a 30 metros con resistividades bajas asociadas a roca caliza sin alteración, la cual separa la parte norte y centro del perfil donde se observan valores altos de resistividad relacionados con diorita y skarn o caliza alterada por la roca ígnea.

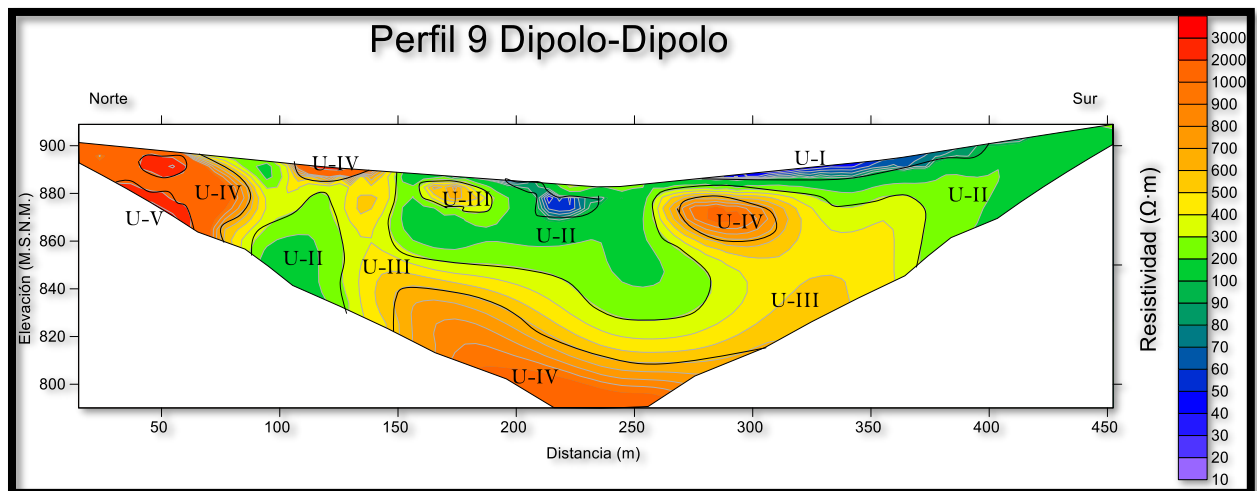


Ilustración 37 Perfil 9 Dipolo-Dipolo.

Perfil 10 Wenner-Schlumberger

En arreglo W-S se visualiza una estructura ígnea que ha afectado a la roca caja y aflora en superficie en la zona central del perfil. Las zonas laterales conforman capas con cambios graduales y definidos, la capa somera se observan lutitas y calizas fracturadas, con resistividades de 10 a 220 $\Omega\cdot m$ para lutitas y de 240 a 550 $\Omega\cdot m$ respectivamente para la roca caliza. Las capas posteriores con valores más altos se asocian a las zonas de transición o de alteración provocada por el cuerpo intrusivo con resistividades mayores a 1100 $\Omega\cdot m$. La anomalía resistiva asociada al cuerpo intrusivo se encuentra en la zona central del perfil a 45 metros de profundidad, en esta área se registraron valores de 1900 a 3000 $\Omega\cdot m$., dichos valores se ajustan a rocas ígneas para este caso de estudio para la roca diorita.

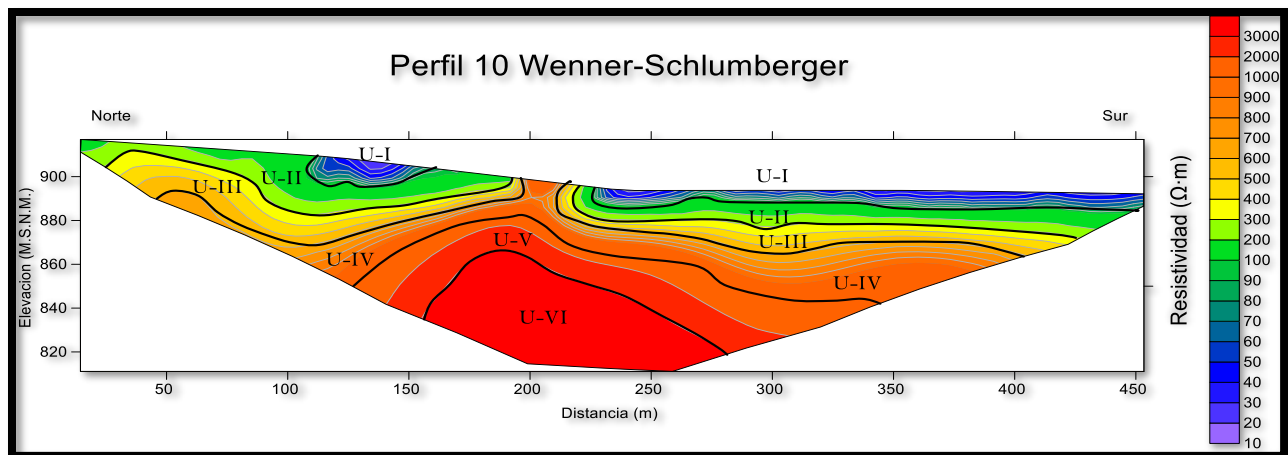


Ilustración 38 Perfil 10 Wenner-Schlumberger.

Perfil 10 Dipolo-Dipolo

El perfil D-D presenta una distribución similar al W-S, no obstante, con este arreglo se obtuvo valores menores y la distribución de los materiales en el subsuelo es de forma irregular. La anomalía resistiva de este perfil está desplazada hacia la zona norte a 50 metros de profundidad, la zona resistiva parece ser menor comparada con la arrojada por el perfil W-S. Debido a esto es importante definir el alcance que tuvo el cuerpo intrusivo. La unidad III asociada a roca caliza sana o sin alteración cubre una gran porción del perfil con resistividades de 500 a 800 $\Omega\cdot m$. misma que rodea la estructura intrusiva.

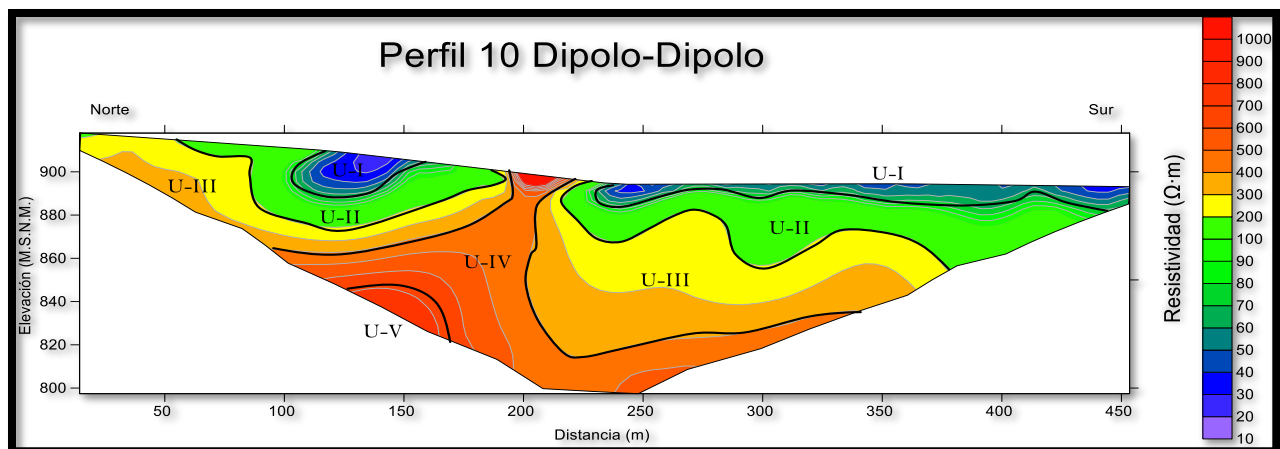


Ilustración 39 Perfil 10 Dipolo-Dipolo.

Perfil 11 Wenner-Schlumberger

El perfil W-S presenta zonas de baja resistividad en la zona superficial que se relacionan a lutitas y calizas fracturadas. En seguida observamos valores intermedios para caliza sin alteración, en este punto las resistividades se elevan debido a la presencia del cuerpo intrusivo, que provocó la alteración de la roca caja la resistividad varía entre 1000 y 1800 $\Omega\cdot m$. La anomalía resistiva se asocia a la estructura ígnea con resistividades de 1900 a 3200 $\Omega\cdot m$. estos valores se han ido asociando a diorita, el cuerpo intrusivo cubre gran parte del perfil. En la zona central del tendido a 225 metros se puede observar que hay afloramientos de skarn o calizas alteradas por fluidos hidrotermales del cuerpo ígneo.

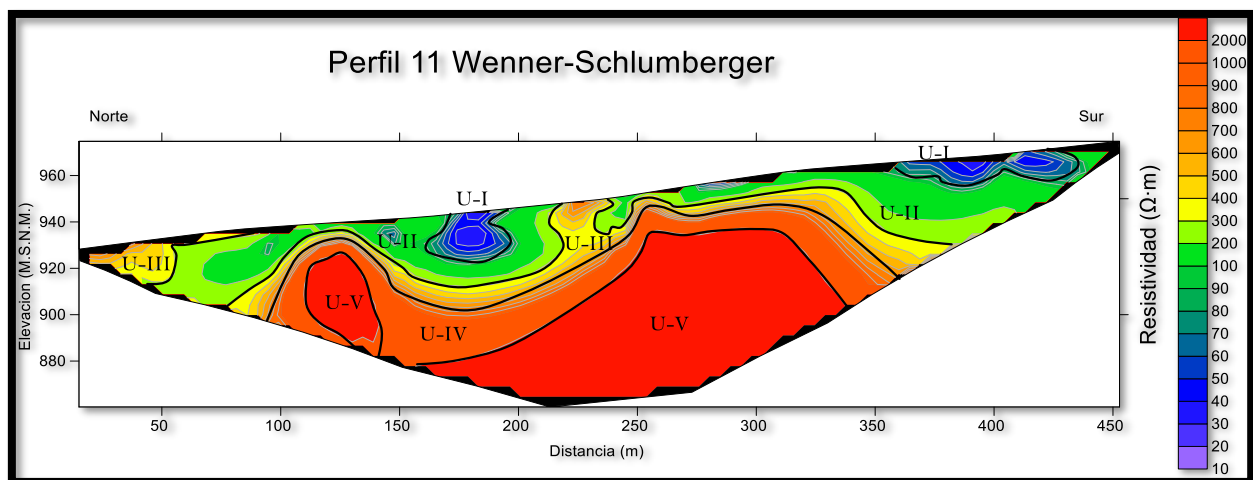


Ilustración 40 Perfil 11 Wenner-Schlumberger.

Perfil 11 Dipolo-Dipolo

En el arreglo D-D se pueden observar dos anomalías resistivas, la primera se extiende desde los 100 metros hasta el centro del perfil a 260 metros, dicha anomalía se queda a pocos metros de aflorar en superficie, en tanto que la segunda anomalía se localiza en la zona sur del perfil entre los 310 y 450 metros, dicha estructura posee dimensiones menores, no llega a aflorar en superficie faltando solo pocos metros. De acuerdo con la resistividad estas anomalías se asocian a diorita con valores superiores a 2000 $\Omega\cdot m$., seguidos de la roca alterada asociadas a skarn con resistividades de 1400 a 1800 $\Omega\cdot m$. Entre las zonas resistivas existe un área de baja resistividad asociada a rocas calizas sin alteración con valores de 200 a 500 $\Omega\cdot m$, lo interesante de este punto es que en el arreglo W-S estas zonas están conectadas con valores altos, en tanto que en el arreglo D-D están divididas. Esto podría ser atribuido a su alta sensibilidad a estructuras verticales, del mismo modo es la configuración con el mayor número de mediciones.

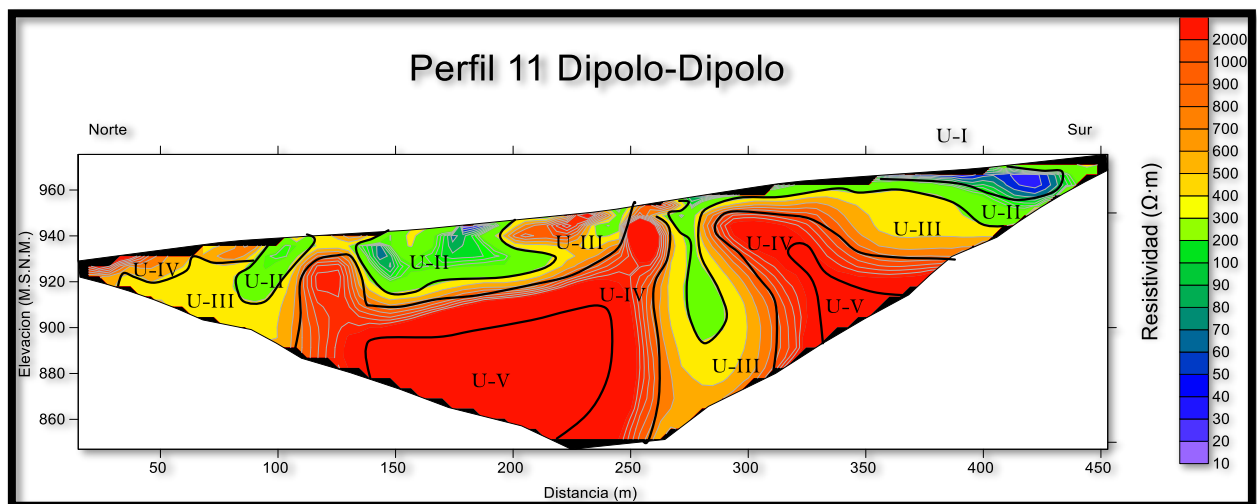


Ilustración 41 Perfil 11 Dipolo-Dipolo.

Perfil 12 Wenner-Schlumberger

En el arreglo W-S se pueden observar tres unidades principales, la unidad II se extiende en la zona superficial del perfil, en seguida lo podemos observar a partir de los 240 metros de extensión lateral y a una profundidad de 5 metros, estas áreas se asocian a lutitas y calizas fracturadas. La unidad III se asocia a rocas calizas compactadas o sin alteración con resistividades de 300 a 750 $\Omega \cdot m$. Por último, la unidad IV se asocia roca caliza con posible alteración hidrotermal, los valores observados en esta unidad son de 800 a 1200 $\Omega \cdot m$, los valores más altos se asocian a las zonas profundas o cercanas a un cuerpo ígneo.

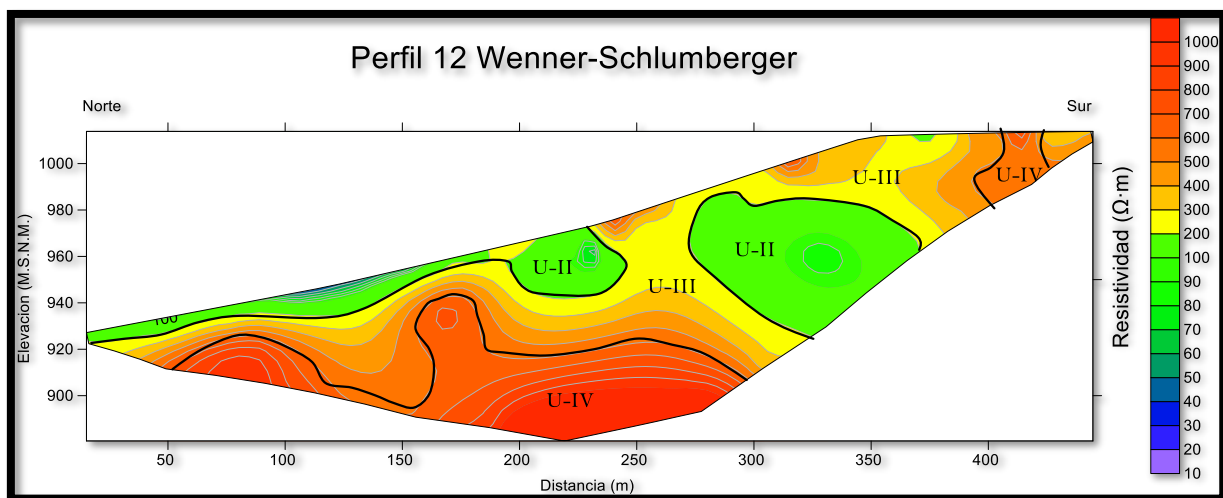


Ilustración 42 Perfil 12 Wenner-Schlumberger.

Perfil 12 Dipolo-Dipolo

En el arreglo D-D se pueden observar dos anomalías resistivas, la primera se extiende desde los 100 metros hasta el centro del perfil a 260 metros, dicha anomalía se queda a pocos metros de aflorar en superficie, en tanto que la segunda anomalía se localiza en la zona sur del perfil entre los 310 y 450 metros, dicha estructura posee dimensiones menores, no llega a aflorar en superficie faltando solo pocos metros. De acuerdo con la resistividad estas anomalías se asocian a diorita con valores superiores a $2000 \Omega \cdot m$., seguidos de la roca alterada asociadas a skarn con resistividades de 1400 a $1800 \Omega \cdot m$. Entre las zonas resistivas existe un área de baja resistividad asociada a rocas calizas sin alteración con valores de 200 a $500 \Omega \cdot m$, lo interesante de este punto es que en el arreglo W-S estas zonas están conectadas con valores altos, en tanto que en el arreglo D-D están divididas. Esto podría ser a causa del efecto de la topografía provocando dispersión de la corriente eléctrica.

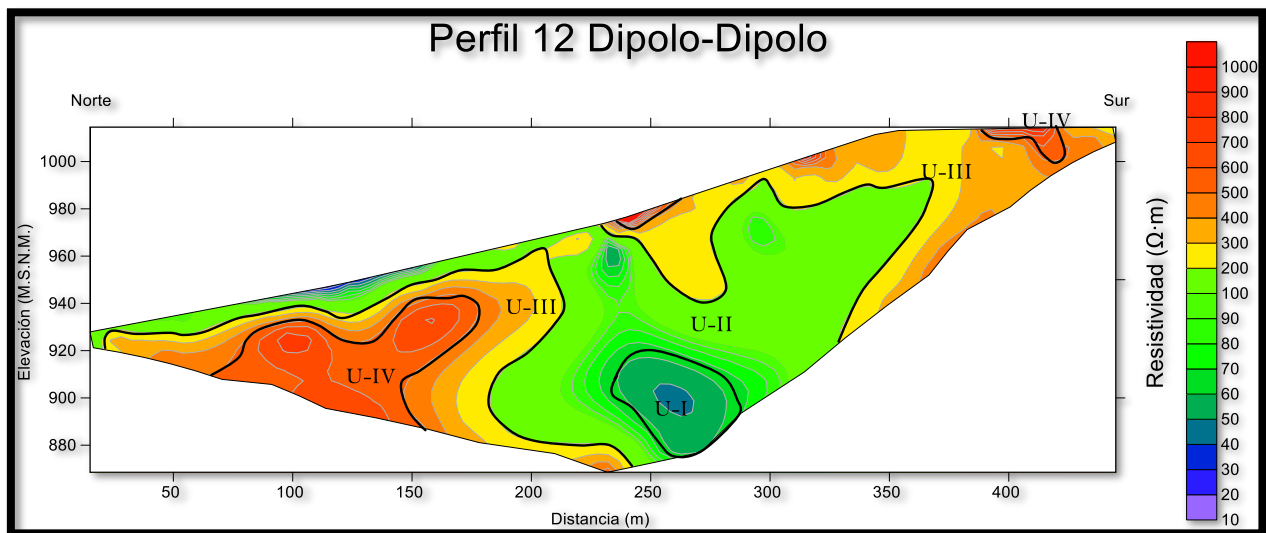


Ilustración 43 Perfil 12 Dipolo-Dipolo.

5.3 Visualizaciones 3D

El programa Voxler 4 permite obtener visualizaciones 3D a partir de los modelos geoelectricos en 2D, en el que software realiza una interpolación de los datos de resistividad. De esta forma podemos realizar una simulación de la posible distribución de las resistividades en el subsuelo. La disposición de los perfiles en la mayoría del área se planeó que fueran paralelos como se muestra en la ilustración 44. Al importar los datos de resistividad eléctrica al programa Voxler se observó que los perfiles que se encuentran en los extremos del área de estudio presentan bajas resistividades, por tal motivo se optó por omitirlas y centrar el análisis en los perfiles centrales donde se han identificado anomalías resistivas altas. Las imágenes 3D del subsuelo que proporciona el programa podemos crear isocapas con el valor de resistividad que es de nuestro interés, esta es una herramienta muy útil debido a que nos muestra todas las zonas que comparten el mismo valor de resistividad, esto nos ayuda a simular la distribución de resistividad aun en las zonas donde no se tomaron datos.

El área de estudio es extensa por lo que se fragmento para llevar a cabo una observación a detalle, la Zona A incluye los perfiles 2,3 y 4, que son paralelos entre ellos. En tanto que la Zona B incluye los perfiles 6, 7, 8 y 3 estos se encuentran muy cercanos entre sí por lo que se optó por incluirlos en la misma área. Por último, la Zona C que es el área más alejada incluye los perfiles 10, 11 y 12.

Las imágenes obtenidas en Voxler nos permiten hacer una correlación entre los perfiles, nos centraremos en las imágenes 3D que se obtienen mediante el software de las zonas con resistividades altas ya que estas se asocian con rocas ígneas, el programa nos brinda una herramienta útil con la cual podemos visualizar capas con los valores de resistividad deseadas, de este modo podemos delimitar las zonas asociadas a diorita y las estructuras intrusivas.

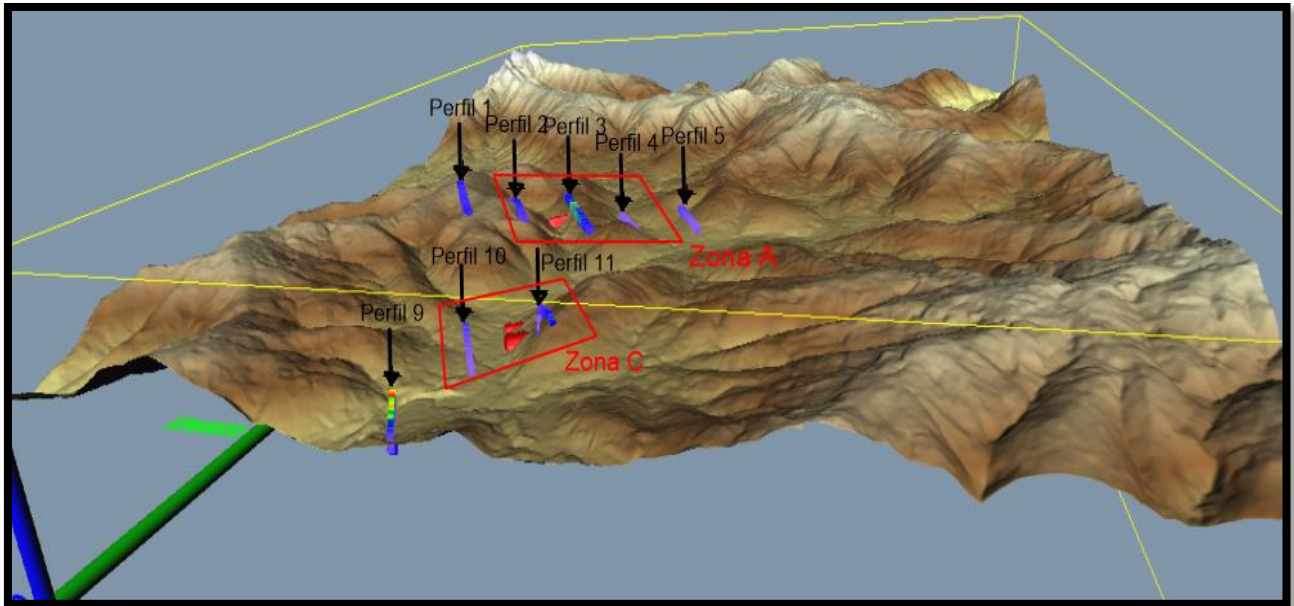


Ilustración 44 Modelo digital de elevación del área de estudio con los perfiles Geoelectricos en Voxler®.

Se realizo un análisis para la zona A, con la información recabada con los arreglos Wenner-Schlumberger y Dipolo-Dipolo. Se obtuvieron las siguientes imágenes 3D.

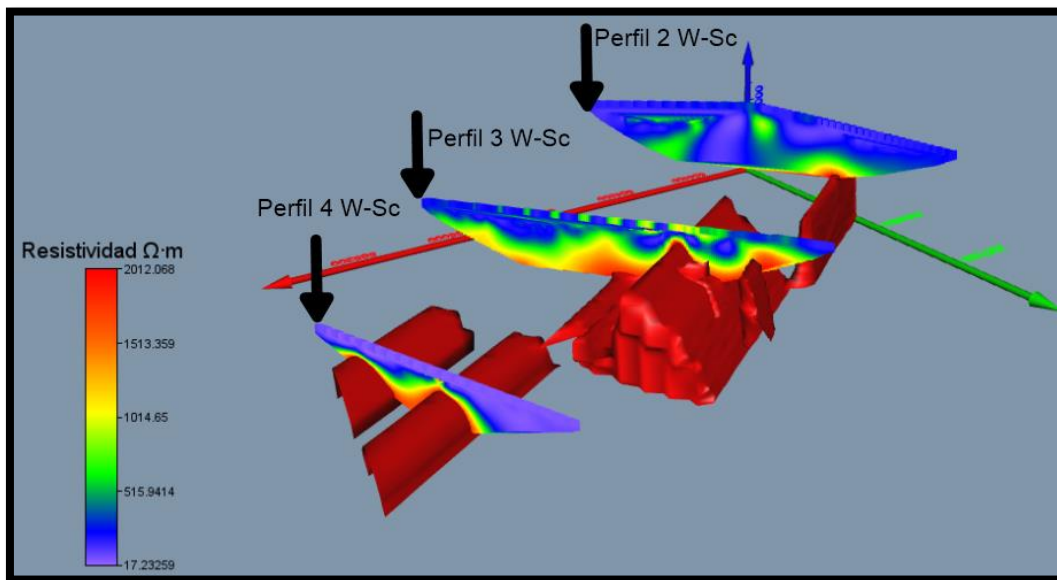


Ilustración 45 Imagen 3D Zona A, arreglo Wenner- Schlumberger.

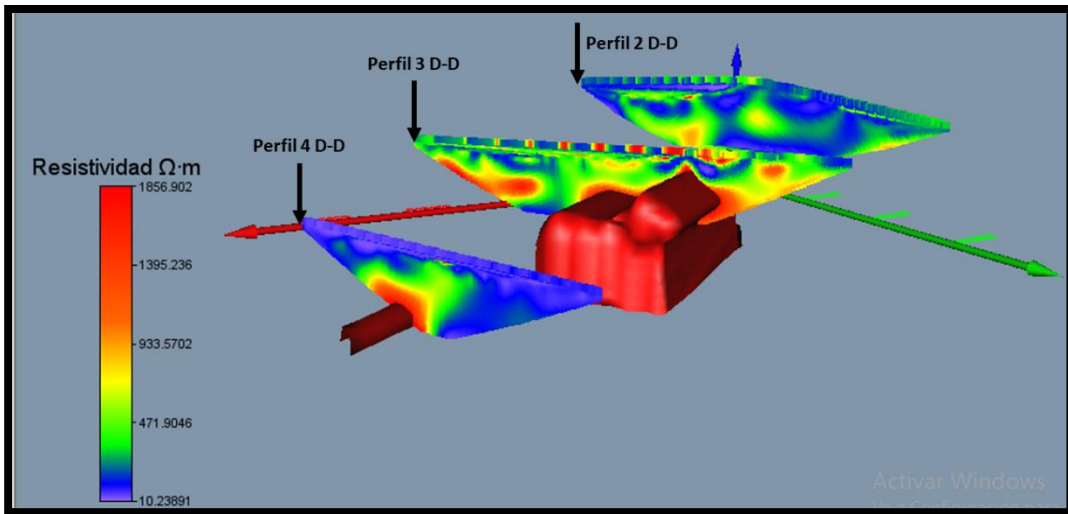


Ilustración 46 Imagen 3D, Zona A, arreglo Dipolo-Dipolo.

Al inicio del capítulo se centró en el análisis de los valores de resistividad por lo que en esta etapa solo nos enfocaremos en las anomalías resistivas observadas en las imágenes 3D, que se relacionan con roca diorítica las cuales son de interés por su contenido mineral, las visualizaciones 3D nos ayudaran a delimitar la distribución de estos materiales. Voxler® nos permite crear isocapas de resistividad con los rangos de resistividad que son de importancia, las anomalías resistivas en el área se asocian con valores superiores a $>1800 \Omega \cdot m$. Por tal motivo en ambos arreglos la isocapa de resistividad nos muestra las áreas que se encuentran dentro de estos rangos.

La anomalía resistiva en el arreglo W-Sc se extiende por debajo del perfil 3 y 4, mismos que presentan los valores de resistividad más altos asociados con diorita, por tal motivo esta área presenta gran interés. El cuerpo asociado con la anomalía presenta un volumen muy similar en ambos arreglos de acuerdo con los datos observados en Voxler®. La anomalía se ubica a 200 metros del inicio del perfil y se extiende a partir de los 10 metros de profundidad hasta 90 o 100 metros que es la máxima profundidad alcanzada con la tomografía.

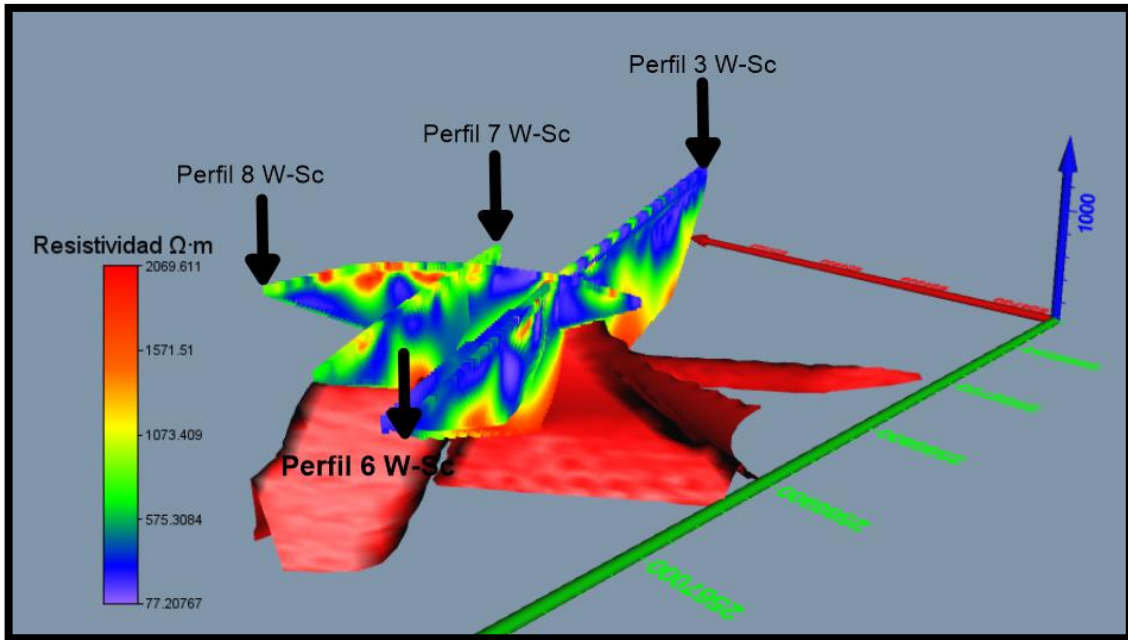


Ilustración 47 Imagen 3D Zona B, arreglo Wenner- Schlumberger.

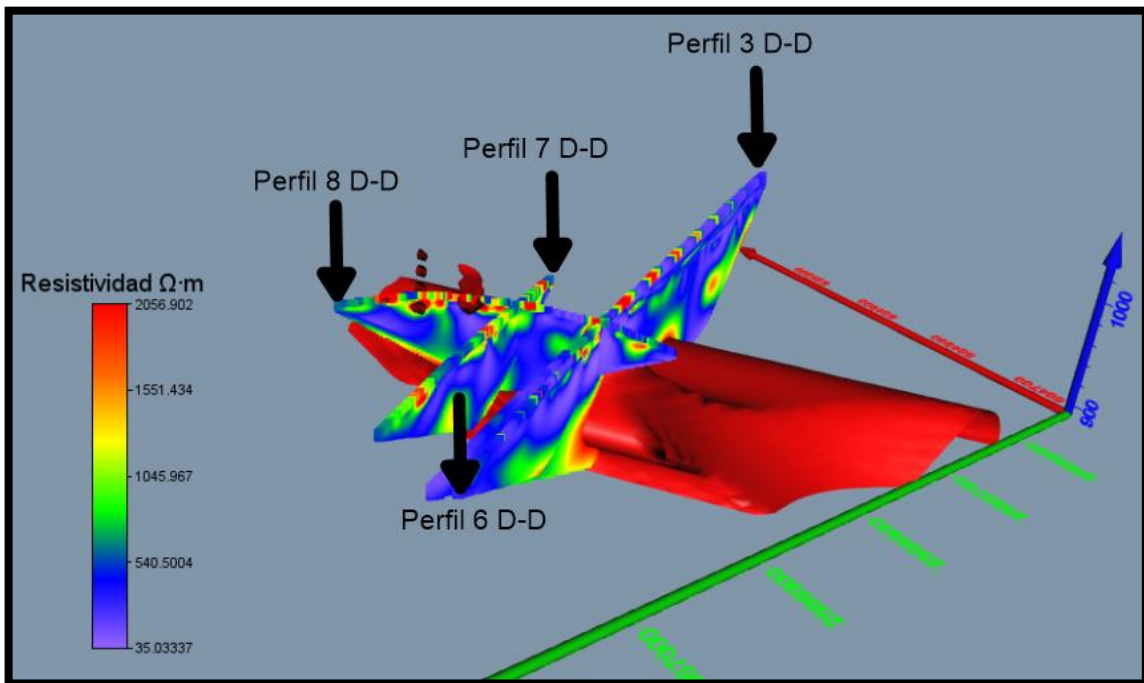


Ilustración 48 Imagen 3D Zona B, arreglo Dipolo-Dipolo.

La zona B incluye los perfiles 3,6,7 y 8, estos se realizaron con una separación entre electrodos de 5 metros y una longitud de 240 metros, excepto el perfil 3 el cual es de 720 metros de longitud y una separación entre electrodos de 10 metros. Se realizaron de esta manera para tener una mayor resolución en la zona superficial, debido a que esta zona representa un gran interés debido a los afloramientos en superficie. Se realizó una correlación entre los perfiles para comprender como se encuentra distribuida la zona anómala asociada con diorita, los perfiles nos ayudan a definir la ubicación de los valores resistivos en la zona.

Los perfiles 10, 11 y 12 cubren la zona C, esta área se encuentra ubicada en la parte sur. Sí realizamos una comparación entre ambos arreglos empleados es muy evidente que la zona anómala del arreglo W-Sc es mayor al arreglo D-D, esto lo podemos atribuir a la alta resolución del método W-Sc al detectar estructuras horizontales y mayor intensidad de la corriente, comparado con el D-D. Al tiempo que no debemos descartar del todo el arreglo D-D, el cual nos muestra una anomalía de menor volumen, que solo cubre el área del perfil 3, misma que no se extiende hacia los perfiles laterales limitando en gran medida su volumen.

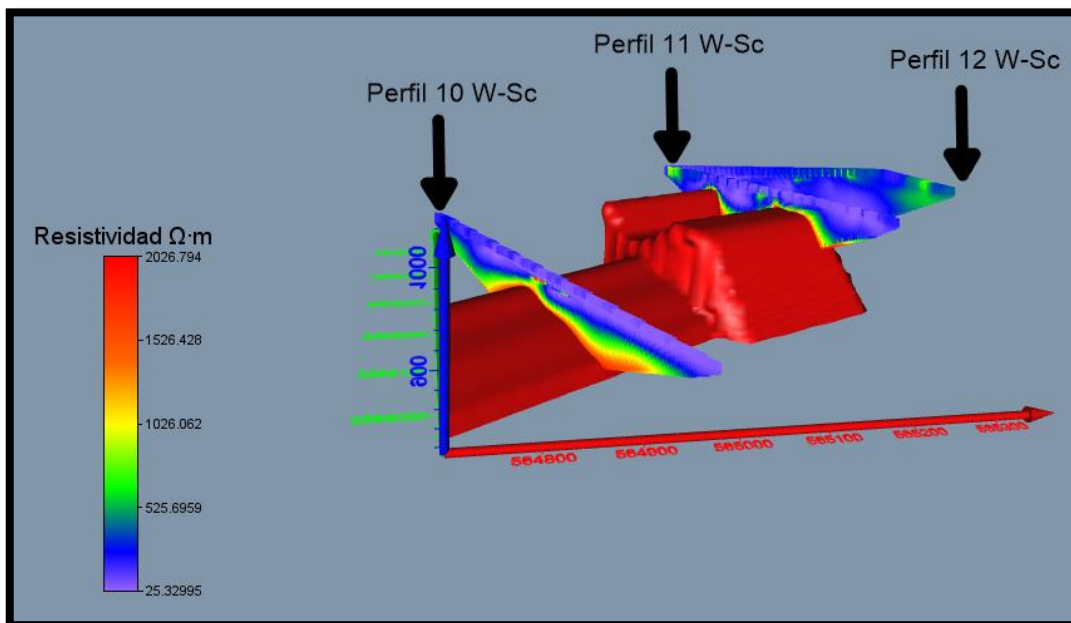


Ilustración 49 Imagen 3D Zona C, arreglo Wenner-Schlumberger.

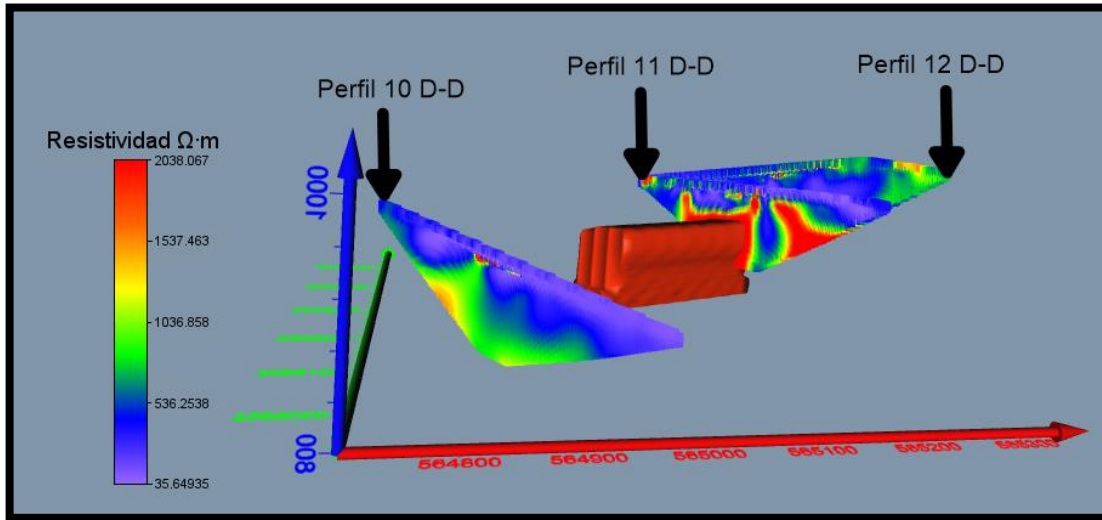


Ilustración 50 Imagen 3D Zona C, arreglo Dipolo-Dipolo.

Las isocapas de resistividad observadas en las imágenes 3D corresponden con las anomalías resistivas observadas en los perfiles de TRE, de modo que los valores de resistividad son mayores a los 1800 $\Omega \cdot m$.

5.4 Conclusiones

La caracterización de la zona de estudio mediante tomografía de resistividad eléctrica es una técnica certera, puesto que hemos podido identificar los contactos entre roca caliza y roca ígnea diorítica, esto fue gracias a los contrastes de resistividad observados. Asimismo, aporta información para determinar la continuidad y profundidad de los contactos, detectar los cuerpos ígneos intrusivos de interés minero, así como el análisis de las morfologías presentes en el subsuelo.

En el área se asocian cinco tipos de materiales mismos que son afectados por diversos factores como saturación, composición, porosidad, temperatura y presión. Los valores de resistividad van de 5 hasta los 3500 $\Omega\cdot m$. Por una parte, las zonas de baja resistividad se asocian con lutitas, estos rangos se observan en la región superficial de los perfiles. Los valores intermedios de resistividad se asocian a rocas calizas, mismas que presentan un amplio margen de resistividad de 200 a 900 $\Omega\cdot m$. Los cuerpos ígneos intrusivos se asocian con las anomalías resistivas con valores superiores a $>1900 \Omega\cdot m$.

Podemos destacar los siguientes perfiles debido a que poseen anomalías resistivas, mismas que son la pieza clave de este estudio. Los perfiles 2, 3, 4, 6 y 7 en la zona central y 10 y 11 en la zona sur. Algunos de estos se encuentran sobre afloramientos de roca diorítica en superficie por lo que el modelo geoeléctrico nos muestra su continuidad a profundidad.

Las visualizaciones 3D son producto de la correlación de los modelos geoeléctricos, estas son una gran herramienta que nos brinda la oportunidad de investigar el comportamiento de las anomalías resistivas entre los perfiles del área.

Los resultados obtenidos de los modelos geoeléctricos nos muestran las ventajas y desventajas de cada configuración eléctrica y así poder emplear la más adecuada al planear un estudio. El arreglo Wenner- Schlumberger es idóneo en la identificación de estructuras tanto horizontales como verticales, una buena señal, los modelos obtenidos con este arreglo presentan contrastes de resistividad

evidentes y cambios graduales en la resistividad. Mientras la configuración Dipolo-Dipolo, alcanza una mayor profundidad, una caracterización del área más detallada, sensible a estructuras pequeñas y a cambios horizontales.

Los cambios en la topografía han demostrado afectar en ambos arreglos como se pueden observar en los perfiles 2, 8 y 12 en los cuales existen diferencias muy marcadas entre los arreglos los cuales se asocian a el efecto de la topografía.

5.5 Recomendaciones

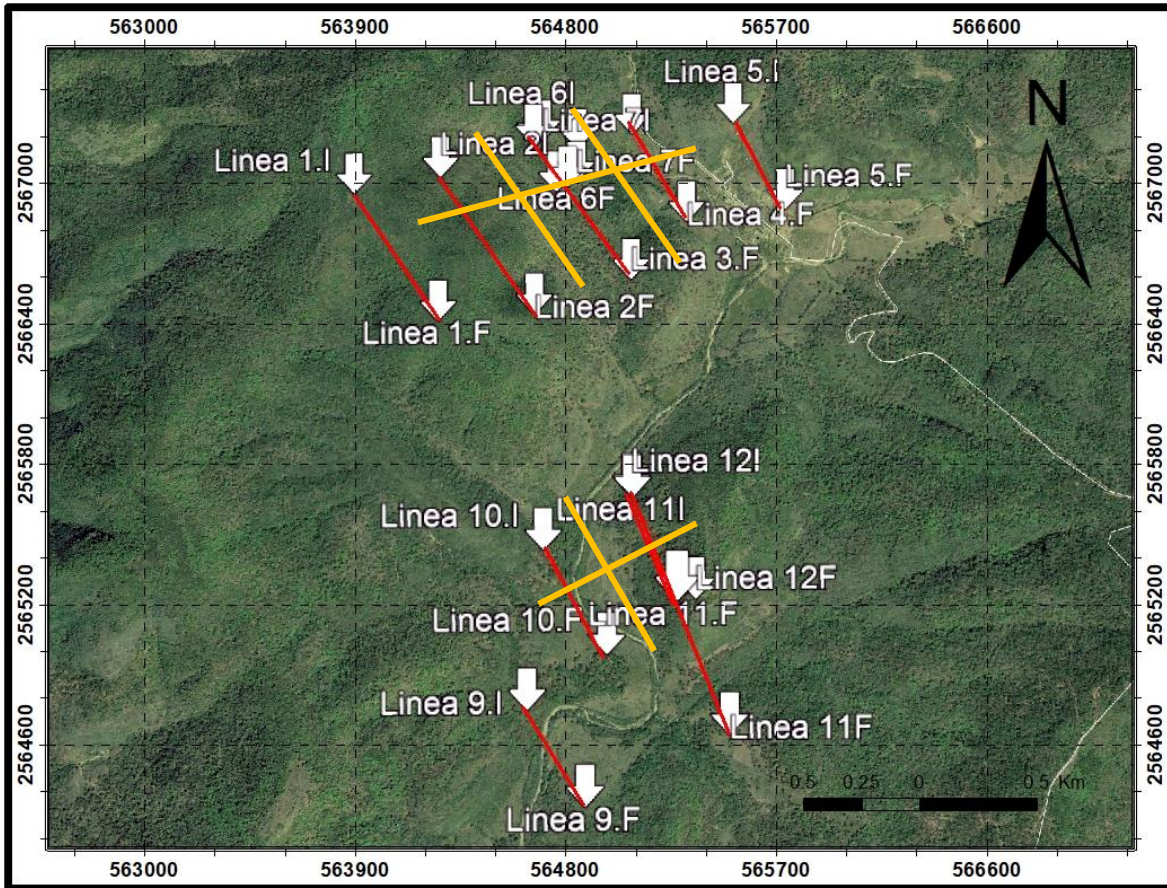
Aumentar el número de tomografías en el área de estudio a fin de tener una mayor certeza de la distribución de las anomalías asociadas a diorita, de forma paralela a los perfiles 2 y 3, de igual forma entre 3 y 4, una más de forma perpendicular a estas de manera que atravesase del perfil 2 hasta 4. En la zona sur dos tomografías más una de forma paralela a los perfiles 10 y 11, y la última de forma perpendicular como se muestra en la siguiente figura. Se recomienda emplear los arreglos W-Sc y D-D, para poder realizar una correlación entre el presente estudio y los próximos proyectos.

Tomar muestras de los materiales presentes en el área y realizar análisis en laboratorio de su contenido mineral.

Se recomienda realizar un estudio geofísico mediante magnetometría terrestre o gravimetría para identificar anomalía asociada a los cuerpos ígneos intrusivos. De este modo optimizar el área de estudio con base en las condiciones del terreno si existen más zonas con presencia de rocas mineralizadas.

Se recomienda hacer barrenación supervisada por un especialista o geólogo, que realice un registro de la litología cortada por el barreno. Se proponen un total de 11 barrenos distribuidos en los perfiles donde se identificaron las anomalías resistivas asociadas a roca diorítica mineralizada de interés. Los barrenos se planearon con

el propósito de identificar a que profundidad se encuentra la roca mineralizada y limitar los cuerpos intrusivos presentes en el área de estudio.







Nomenclatura			
	I. Inicio del perfil		
	F. Fin del perfil		
			Propuesta de Tomografías

Ilustración 51 Propuesta de nuevos perfiles de TRE.

Capítulo VI Referencias y anexos.

6. Referencias

Aguirre Díaz J., Esteves Robles S., (2015). Análisis y Eliminación de Ruido en Tomografía Eléctrica Resistiva, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Álvarez Barrientos E. (2015), Tomografía Eléctrica Resistiva 3D en la Caracterización del Subsuelo Bajo Estructuras Civiles, Tesis de Licenciatura, UNAM.

Arlandi, M. (2004). Geofísica aplicada a la obra civil. Método geoelectrico y sísmica de refracción. Casos prácticos.

Ávila Angulo M.A., Reales Maestre L.M. (Octubre 2015). Detección de estructuras minerales mediante la aplicación de Polarización Inducida y Resistividad. Bogotá, Colombia.

Carrizales Aguilar A., Loaeza J., Zarate R. (2001). Carta Geológico-Minero de Ciudad Victoria. México: RM

Comisión Nacional del Agua. (2007). Prospección Geoelectrica y Registro Geofísico de Pozos. www.cna.gob.mx

Geotem Ingeniería. (2016). Tomografía de Resistividad Eléctrica. 10 de septiembre de 2018, de Geotem Ingeniería Sitio web: <http://www.geotem.com.mx/electrico4.php>

Geotomo Software Malaysia (2012), Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using least-squares method, Geoelectrical Imaging 2D & 3D: www.geotomsoft.com

Hildemaro Briceño, J. (19 de febrero de 2015). Manual Para la Medición de Resistividad del Suelo. 18 de septiembre de 2018, de Universidad de los Andes. Sitio web: https://www.researchgate.net/publication/271074412_MANUAL_PARA_LA_MEDICION_DE_RESISTIVIDAD_DEL_SUELO

- Lakubovskii IU. V., Liajov L.L., (1979). Exploración Eléctrica. Reverte.Moscu.
- Loke M. H., 2000, Electrical Imaging Survey for Environmental and Engineering Studies: A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys.
- Loke M. H., 2012, Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys.
- Lunar R., Oyarzun R., (1991). Yacimientos Minerales. Centro de Estudios Ramon Areces S.A. Alicante.
- Montaño Mejía F.H., Vega Vega P.A. (2007). Aplicación de métodos eléctricos de prospección geofísica. Revista CIER (Numero 53). Pag 61-76.
- Orellana E., (1982). Prospección geoelectrica en corriente continua. Paraninfo, Madrid.
- Porras Velázquez G, (2017). Método kriging de inferencia espacial. Centro Geo. Ciudad de México.
- Peña Domínguez J G., (2015). Aplicación de Sondeos Eléctricos Verticales Para la Estimación de Recursos Minerales de Barita, Tesis de Licenciatura, BUAP.
- SGM,2004, Carta Geológico-minero Ciudad Victoria F14-2. Servicio Geológico Mexicano.
- Telford W., Geldart L., Scheriff R., 1992, Applied Geophysics, 2da Edición, Cambridge University Press
- Teixido I Ullod M.T.(2012). Prospección geofísica de superficie aplicada a la hidrología. Apuntes para curso presencial. Universidad de Granada. España.
- Udias A, Mezcuca J. 1997. Fundamentos de Geofísica. Alianza. Madrid España.

6.1 Anexo. Características de Barrenación

Tabla 4 Características de Barrenación Perfil 3

	Numero de Barreno	X	Y	Profundidad (m)	Angulo	Dirección	Descripción (Secuencia de materiales esperados)
Perfil 3	1	564732.10 E	2567017.71 N	50 m.	70° a 75°	SE-NO	2 a 3 m. de lutitas, seguido de 20 a 25 m de caliza, 10 a 12 m. de caliza alterada, a continuación, roca ígnea diorítica a 40 m. de profundidad.
Perfil 3	2	564793.86 E	2566931.63 N	50 m.	90°	SE- NO	5 m. de lutitas, seguido de 5 a 8 m. de roca caliza con alteración, a continuación de roca diorítica.
Perfil 3	3	564859.38 E	2566833.22 N	50 m.	90°	SE- NO	Se inicia con 10 a 12 m. de roca caliza, posteriormente de 18 a 22 m. caliza alterada, seguido de diorita a 36 o 42 m. de profundidad.

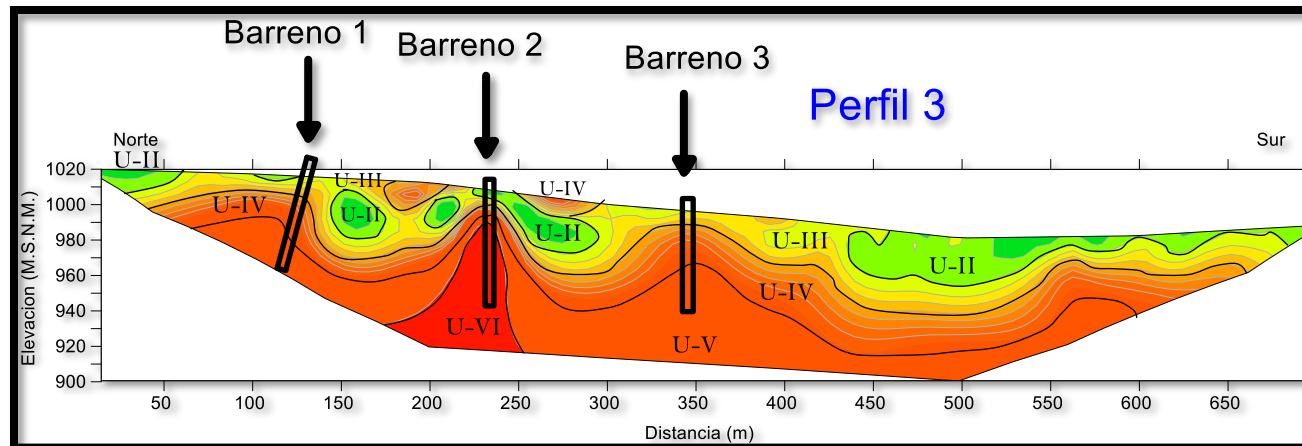


Ilustración 52 Perfil 3 y barrenos propuestos.

Tabla 5 Características de Barrenación Perfil 4.

	Numero de Barreno	X	Y	Profundidad (m)	Angulo	Dirección	Descripción (Secuencia de materiales esperados)
Perfil 4	4	565201.38 E	2566976.27 N	70 m.	70° a 75°	SE-NO	Inicia con 25 a 28 m. de caliza alterada por el cuerpo intrusivo, a continuación, se espera la presencia de roca ígnea diorítica a partir de los 30 m.
Perfil 4	5	565210.28 E	2566962.87 N	50 m.	90° a 85°	SE- NO	Debido al afloramiento de roca caliza metamorfozada se esperan 25 m. de esta, seguida del cuerpo ígneo (diorita).
Perfil 4	6	565216.61 E	2566948.26 N	70 m.	115° a 120°	NO-SE	Inicia con 25 a 28 m. de caliza alterada por el cuerpo intrusivo, a continuación, se espera la presencia de roca ígnea diorítica a partir de los 30 m.
Perfil 4	7	565287.34 E	2566837.46 N	45 m.	90° a 85°	NO-SE	5 m. de lutitas, seguido de 5 a 7 m. de caliza, fracturada, a continuación, caliza alterada, y diorita a partir de 30 a 35 m. de profundidad.

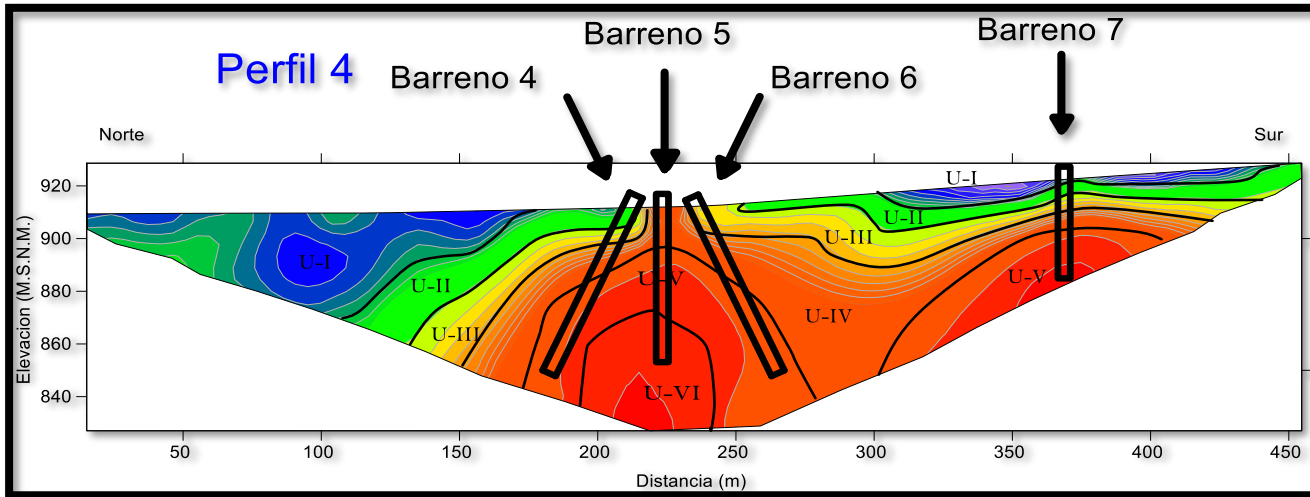


Ilustración 53 Perfil 4 y barrenos propuestos.

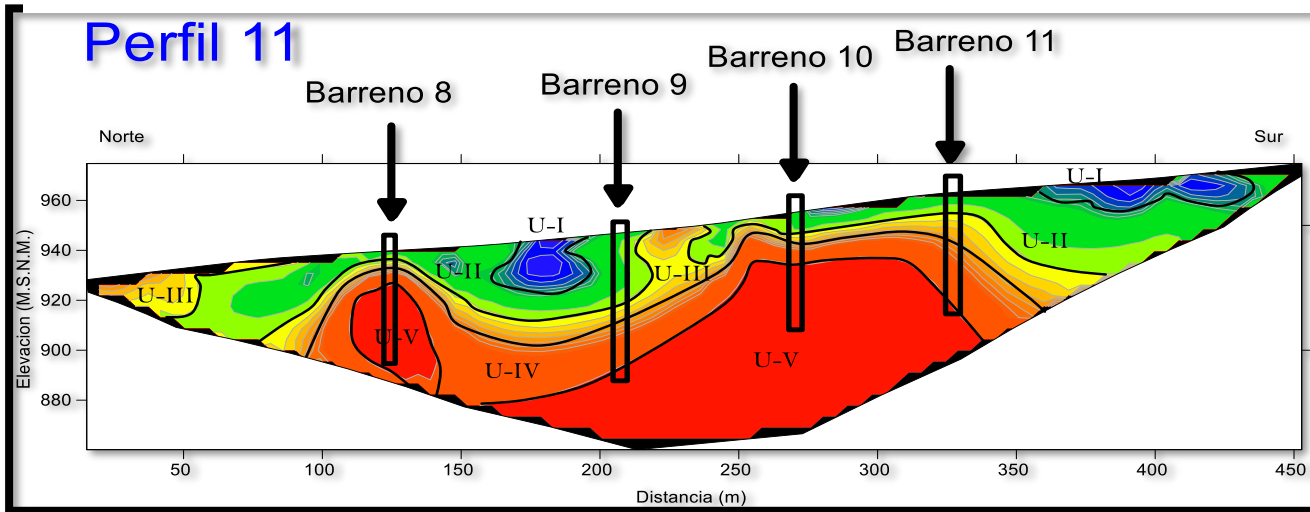


Ilustración 54 Perfil 11 y barrenos propuestos.

Tabla 6 Características de Barrenación Perfil 11.

	Numero de Barreno	X	Y	Profundidad (m)	Angulo	Dirección	Descripción (Secuencia de materiales esperados)
Perfil 11	8	565130.42 E	2565462.38 N	40 m.	90°	SE-NO	Se esperan 5 a 7 m. de roca caliza fracturada, seguido de 10 a 13 m. de caliza metamorfizada. a continuación, diorita a partir de los 22 m.
Perfil 11	9	565163.20 E	2565390.23 N	50 m.	90°	SE- NO	Al inicio 20 m. de roca caliza posiblemente fracturada, después de 15 a 18 m. de caliza alterada. Seguido de la roca ígnea a partir de 40 m de profundidad.
Perfil 11	10	565193.35 E	2565323.71 N	50 m.	90°	SE- NO	5 a 7 metros de caliza seguido de este material, pero con alteración por 8 a 10 m. La roca ígnea se encuentra aproximadamente a 24 m.
Perfil 11	11	565213.73 E	2565273.72 N	50 m.	90°	SE-NO	Se esperan 6 a 8 m. de roca caliza fracturada, seguido de 25 a 28 m. de caliza metamorfizada. a continuación, diorita a partir de los 40 a 45 m. de profundidad.

6.2 Glosario de unidades

Tabla 7 Unidades compuestas.

Símbolo	Magnitud física	Unidades básicas
\vec{B}	Campo de Inducción Magnética	[T]
\vec{D}	Campo de desplazamiento	[C/m ²]
\vec{E}	Campo Eléctrico	[V/m]
\vec{H}	Campo Magnético	[A/m]
\vec{J}	Densidad de Corriente	[A/m ²]

Tabla 8 Unidades básicas.

Símbolo	Unidad básica
<i>A</i>	Ampere
<i>C</i>	Coulomb
<i>m</i>	Metro
<i>T</i>	Tesla
<i>V</i>	Volt
Ω	Ohm