



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

**FACULTAD DE INGENIERÍA
COLEGIO DE INGENIERÍA GEOFÍSICA**

**CARACTERIZACIÓN POR TOMOGRAFÍA ELECTRICA
DE RESISTIVIDAD DE LA CANTERA
“RANCHO SAN PEDRO” EN IXTACUIXTLA TLAXCALA.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEOFÍSICO**

**P R E S E N T A
NOÉ LOZADA FUENTES**

**DIRECTOR DE TESIS
MC. JOSÉ SERRANO ORTIZ**

PUEBLA, PUE.

OCTUBRE, 2017



BUAP

Oficio D-SA 2784/2017

C. NOE LOZADA FUENTES
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
GEOFISICA
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, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

“CARACTERIZACION POR TOMOGRAFIA ELECTRICA DE RESISTIVIDAD, DE LA CANTERA RANCHO SAN PEDRO EN IXTACUIXTLA TLAXCALA”

Por lo anterior hacemos de su conocimiento que se asigna como asesor al M.C. José Ortiz Serrano.

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 14 de agosto de 2017

M. en V. José Ángel Juárez Torres
Secretaría Académica



M'FDLH/M'JAJT/BARV
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo

80 AÑOS
DE UNIVERSIDAD

Facultad
de Ingeniería


Bld. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. 108 C, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

M. en I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director de la Facultad de Ingeniería
Presente.

El que suscribe: M.C. José Serrano Ortiz, asesor del tema denominado: “**CARACTERIZACION POR TOMOGRAFIA ELECTRICA DE RESISTIVIDAD, DE LA CANTERA RANCHO SAN PEDRO EN IXTACUIXTLA TLAXCALA**”, presentado por el **C. NOÉ LOZADA FUENTES**, pasante de la carrera de Ingeniería Geofísica con número de matrícula 200520392, me permito informar a Usted que dentro del marco de examen profesional, y después de haber realizado una cuidadosa revisión del contenido temático, la metodología y la redacción de la tesis correspondiente, no existe inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

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 11 de agosto de 2017


M.C. José Serrano Ortiz
Asesor

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

Agradecimientos

Quiero agradecer en primera instancia a mi Alma Mater: BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA quien me abrió las puertas a un mundo de conocimiento. Al MC José Serrano Ortiz, asesor de esta tesis, por su paciencia, apoyo y colaboración para llevar a cabo este trabajo. A ustedes maestros sinodales MC Julio Cesar Gonzales Hernández y al Ing. Manuel Uribe Arriaga, porque con sus comentarios y recomendaciones mejoraron este trabajo y en especial a todos los Maestros del Colegio de Ingeniería Geofísica que con sus enseñanzas me han mostrado lo fascinante que es nuestro mundo.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a esas personas que han formado parte de mi vida personal y sin su apoyo no habría logrado esta meta. A mis padres José A. Lozada Domínguez y Emma Fuentes Galicia, a mis hermanos Rubén y Karina por su amistad y cariño.

A mis hijas Itzayana y Shunely el motor más potente que tengo en esta vida y a tí Liz porque con tu ayuda y consejos esto fue posibles. No puedo dejar de mencionar a la familia García, Sra. Blanca, Isai, Nephtali, D.E.P. Domí y Haram por permitirme ser parte de su familia.

ÍNDICE

Agradecimientos	IV
Dedicatoria	V
Introducción	1
Antecedentes	2
Justificación	3
Objetivo	4
Objetivos particulares	4
Capítulo 1 Generalidades de la zona de estudio	5
1.1 Ubicación	5
1.2 Geología del municipio.....	7
Capítulo 2 Conceptos Teóricos	10
2.1 Fundamentos Teóricos	10
2.2 Prospección Eléctrica de Corriente Continua.....	11
2.3 Medida de la Resistividad Eléctrica	12
2.4 Tomografía Eléctrica Resistiva (TER).....	15
2.5 Tipos de Arreglos	16
2.5.1 Wenner o Wenner Alpha	17
2.5.2 Dipolo-Dipolo.....	17
2.5.3 Wenner-Schlumberger	18
2.6 Profundidad de la tomografía	19
Capítulo 3 Metodología y procesamiento	21
3.1 Metodología	21
3.2 Instrumentación.....	21
3.3 Descripción del equipo.....	22
3.4 Toma de datos y descripción	23
3.4.1 Tomografías	24

3.5 Trabajo de escritorio	26
Capítulo 4 Interpretación de datos geoelectricos	29
4.1 Interpretación de tomografías	29
4.1.1 Tomografía 1	29
4.1.2 Tomografía 2	32
4.1.3 Tomografía 3	34
4.1.4 Tomografía 4	36
4.2 Unidades geológicas	38
4.3 Interpretación	40
4.4 Cálculo de volumen y tonelaje	46
4.4.1 Unidad 1	48
4.4.2 Unidad 2	49
4.4.3 Unidad 3	50
Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones	52
5.1 Conclusiones.....	52
5.2 Recomendaciones	53
Anexo 1 Cubo para cálculo de volumen.....	54
Anexo 2 Memoria fotográfica	55
Bibliografía.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1 Generalidades de la zona de estudio

<u>Figura 1.1</u> Coordenadas UTM de la superficie donde se llevó acabo las Tomografías Eléctrica de Resistividad, (TER).....	6
<u>Figura 1.2</u> Mapa Geológico de Ixtacuixtla Tlaxcala (PIGM de los Estados Unidos Mexicanos Ixtacuixtla Tlaxcala, 2009).....	8
<u>Figura 1.3</u> Izquierda, Cantera de San Pedro siendo explotada. Derecha, muestra de mano de la roca explotada.	9

Capítulo 2 Conceptos Teóricos

<u>Figura 2.1</u> Principio básico del método de resistividad	10
<u>Figura 2.2</u> Gráfico de los rangos de variación de las resistividades más comunes de algunas rocas y minerales.	12
<u>Figura 2.3</u> Descripción del casquete semiesférico.	12
<u>Figura 2.4</u> Casquete semiesférico para diferencia de potencial en M y N	14
<u>Figura 2.5</u> Disposición de electrodos y factor geométrico para el arreglo Wenner Alpha	17
<u>Figura 2.6</u> Disposición de los electrodos y factor geométrico en arreglo Dipolo-Dipolo.....	18
<u>Figura 2.7</u> Disposición de los electrodos y factor geométrico en arreglo Wenner-Schlumberger.....	18
<u>Figura 2.8</u> Gráfica comparativa de profundidades de los tres tipos principales de tomografías a un nivel 8.	20

Capítulo 3 Metodología y procesamiento

<u>Figura 3.1</u> Toma frontal del resistivímetro empleado para la adquisición de los datos	23
<u>Figura 3.2</u> Distribución de los perfiles en la superficie a analizar.....	24
<u>Figura 3.3</u> Apartado donde se eliminan los puntos con resistividades anómalas.	26
<u>Figura 3.4</u> Inversión de los datos de resistividad de la Tomografía 1	27

Capítulo 4 Interpretación de datos geoelectricos

<u>Figura 4.1</u> Zonas resistivas en la tomografía 1.....	31
<u>Figura 4.2</u> Zonas resistivas en la tomografía 2	33
<u>Figura 4.3</u> Zonas resistivas en la tomografía 3	35
<u>Figura 4.4</u> Zonas resistivas en la tomografía 4	37
<u>Figura 4.5</u> Primer perfil geológico	42
<u>Figura 4.6</u> Segundo perfil geológico	43
<u>Figura 4.7</u> Tercer perfil geológico	44
<u>Figura 4.8</u> Cuarto perfil geológico	45
<u>Figura 4.9</u> Se muestra las 4 tomografías en 3D con imagen de fondo del sitio donde se llevó a cabo la toma de datos.	46
<u>Figura 4.10</u> Muestra distribución de la unidad 1 en el sitio de estudio	49
<u>Figura 4.11</u> Muestra distribución de la unidad 2 en el sitio de estudio	50
<u>Figura 4.12</u> Muestra distribución de la unidad 3 en el sitio de estudio	51

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 1 Generalidades de la zona de estudio

<u>Tabla 1.1</u> Coordenadas UTM de la superficie donde se llevó a cabo las Tomografías Eléctrica de Resistividad, (TER).	5
<u>Tabla 1.2</u> Tabla con coordenadas geográficas grados, minutos y segundos para los puntos del polígono donde se llevó a cabo las Tomografías.	5

Capítulo 2 Conceptos Teóricos

<u>Tabla 2.1</u> Comparación de ventajas y desventajas del método de Tomografía Eléctrica Resistiva.	16
<u>Tabla 2.2</u> Factor de profundidad media Z_e , de acuerdo al número de niveles.	20

Capítulo 3 Metodología y procesamiento

<u>Tabla 3.1</u> Materiales empleados para la toma de datos en el área de estudio... ..	22
<u>Tabla 3.2</u> Datos técnicos de la geometría empleada en las 4 tomografías.....	25

Capítulo 4 Interpretación de datos geoelectricos

<u>Tabla 4.1</u> Unidades litológicas, rango de resistividades y descripción.	38
<u>Tabla 4.2</u> Coordenada X, Y, Z para el cálculo del volumen en Voxler	47
<u>Tabla 4.3</u> Unidades con valores de volumen, densidad y tonelaje.....	48

Introducción

En este trabajo se determina la presencia y espesor de un banco de material de roca dacita porfídica, destinada para la construcción, en la cantera del Rancho San Pedro ubicada en el municipio de Ixtacuixtla, Tlaxcala.

Para realizar este estudio se recurrió a técnicas de prospección geofísica, las cuales permitieron caracterizar las propiedades físicas que discrepan entre la roca de interés y el material que la circunda, obteniendo un análisis de las estructuras ocultas en el interior de la tierra.

Para el primer capítulo se describe la ubicación y la geología del sitio donde se efectuó el estudio para conocer el banco de material.

En el segundo capítulo se manejan los fundamentos teóricos en lo que se basa la exploración geoelectrica de corriente continua así como una descripción de la tomografía de resistividad eléctrica y profundidad de exploración en sus distintos arreglos.

En el tercer capítulo se refiere al equipo y material requerido para dicho estudio, así mismo contiene el trabajo de adquisición para las cuatro tomografías, complementado con el procesamiento de datos.

En la interpretación de datos geoelectricos, capítulo cuarto, se describen las anomalías de las cuatro tomografías para después generar una correlación entre datos geoelectricos y geológicos. Se muestra en 3D la disposición de los materiales observados mediante el programa Voxler ®.

Para finalizar, en el quinto capítulo se dan recomendaciones y conclusiones en función de los resultados obtenidos e interpretados.

Antecedentes

Los estudios geofísicos son empleados por la industria para cubrir distintas necesidades o solucionar problemas que se pueden generar de manera antropogénica o natural en el subsuelo, este tipo de análisis permite la localización de fallas geológicas, determinación del basamento para cimentaciones, determinación y delimitación de acuíferos, exploración de fuentes materiales y minerales (Aguilar, 2012).

En la exploración de minas y canteras la aplicación de métodos geofísicos permite el conocimiento del subsuelo y la determinación de recursos en su estado natural como sólidos (carbón y minerales metalíferos), líquidos (petróleo, agua) o gaseosos (gas natural) de esta manera se logre optimizar su extracción.

Dentro de los métodos geofísicos que se utilizan para la determinación de bancos de material se encuentra el método eléctrico de prospección geofísica, elegido recurrentemente debido a algunas ventajas ante otros métodos, dentro de ellas están los costos más accesibles, un corto tiempo de adquisición y procesamiento de los datos, siendo una herramienta más efectiva en la valoración de las características geoeléctricas, especialmente en suelos con geología compleja (SGM, 2015).

Uno de los estudios donde se aplica la prospección geoeléctrica fue llevado a cabo en la localidad de Jerez de la frontera en Cádiz, España, donde se realizó una prospección de materiales en una formación aluvial, el objeto de este estudio fue un análisis de distribución y espesor de un nivel de gravas y arenas de aluvial del río Guadalete, esto para seleccionar las futuras zonas de explotación mediante un arreglo Schlumberger (Vásquez, 2005) (Ramos, 2008).

Otro ejemplo de referencia es el estudio de (Márquez, et al. 2009) quienes implementaron el método en el poblado de Atexca, Municipio de Zacatlán en el estado de Puebla por el cual a través de la interpretación de 10 sondeos eléctricos verticales (SEV'S), aunado con una correlación geológica, fue posible determinar en un predio las reservas de arenas feldespáticas, con lo cual se pudo cuantificar un proyecto de explotación de bancos de material.

Adentrándose en el estado de Tlaxcala, donde se realizó dicho trabajo, se tiene información de que la explotación de materiales minerales es menor al 1% con respecto a la producción nacional en el período de Enero a Diciembre de 2008 de acuerdo al reporte (Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, Tlaxcala, 2009), lo cual da muestra de que es mínima la exploración y explotación mineral en dicho estado, además de que no hay antecedentes de estudios geofísicos en la región.

Justificación

El estado de Tlaxcala cuenta con una explotación minera escasa, la cual inició a mediados del siglo XX, donde hay conocimiento de explotación de materiales no metálicos como bancos de material, tierras fuller, diatomita, escorias volcánica Tezontle, entre otros y no se conocen yacimientos explotados de minerales metálicos.

Actualmente las regiones de Panotla, Nanacamilpa, Tetla, Huamantla y Tlaxco destacan por su explotación de tierras fuller, diatomita, tezontle, arcilla, canteras andesíticas y basálticas que se utilizan en la industria de la construcción y cerámica (SGM, Enfoque Minero de Tlaxcala, 2011); muchas de estas canteras son explotadas sin algún estudio geológico o geofísico, es decir, sin tener conocimiento específico del tipo de roca ni espesores del estrato de interés.

Por estas razones es importante realizar un análisis geológico de tipo macroscópico que indique la roca que se explota, aunado a un estudio geofísico que determine los espesores y profundidad del estrato, de esta manera se ubicaran las futuras zonas de explotación dentro de la región.

Objetivo

Realizar un estudio geoelectrico que determine la ubicación de la roca más sana permitiendo identificar los sitios en la que esta roca se encuentra, además se calculará el volumen y tonelaje de cada unidad geológica, para la cantera del Rancho de San Pedro Buenavista, municipio de Ixtacuixtla, en el estado de Tlaxcala.

Objetivos Particulares

- ✓ Realizar tomografías donde se considera expandir la excavación de la cantera en el Rancho San Pedro Buenavista.
- ✓ Procesar la información geoelectrica determinando profundidad y espesor de la capa de interés.
- ✓ Hacer un reconocimiento macroscópico del tipo de roca explotada en la cantera del Rancho San Pedro Buenavista.
- ✓ Correlacionar los datos entre tomografías para determinar el comportamiento, volumen y tonelaje de la roca.

Capítulo 1. Generalidades de la zona de estudio

1.1.- Ubicación

El Rancho de San Pedro Buenavista se sitúa a 5 km al Noroeste del Municipio Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, en el estado de Tlaxcala, en la carretera federal a Españita en el kilómetro 8 (Figura 1.1), cuyas coordenadas del polígono de interés se muestran a continuación en la Tabla 1.1

PUNTO	COORDENADA N	COORDENADA E
1	2144340.00	563324.00
2	2144437.00	563392.00
3	2144415.00	563502.00
4	2144258.00	563445.00
5	2144294.00	563338.00

Tab.1.1 Coordenadas UTM de la superficie donde se llevó acabo las Tomografías Eléctrica de Resistividad, (TER).

PUNTO	Latitud	Longitud
1	19°23'32"	98°23'49"
2	19°23'33"	98°23'47"
3	19°23'33	98°23'42"
4	19°23'30"	98°23'44"
5	19°23'30"	98°23'47"

Tabla 1.2 Tabla con coordenadas geográficas grados, minutos y segundos para los puntos del polígono donde se llevó a cabo las Tomografías.

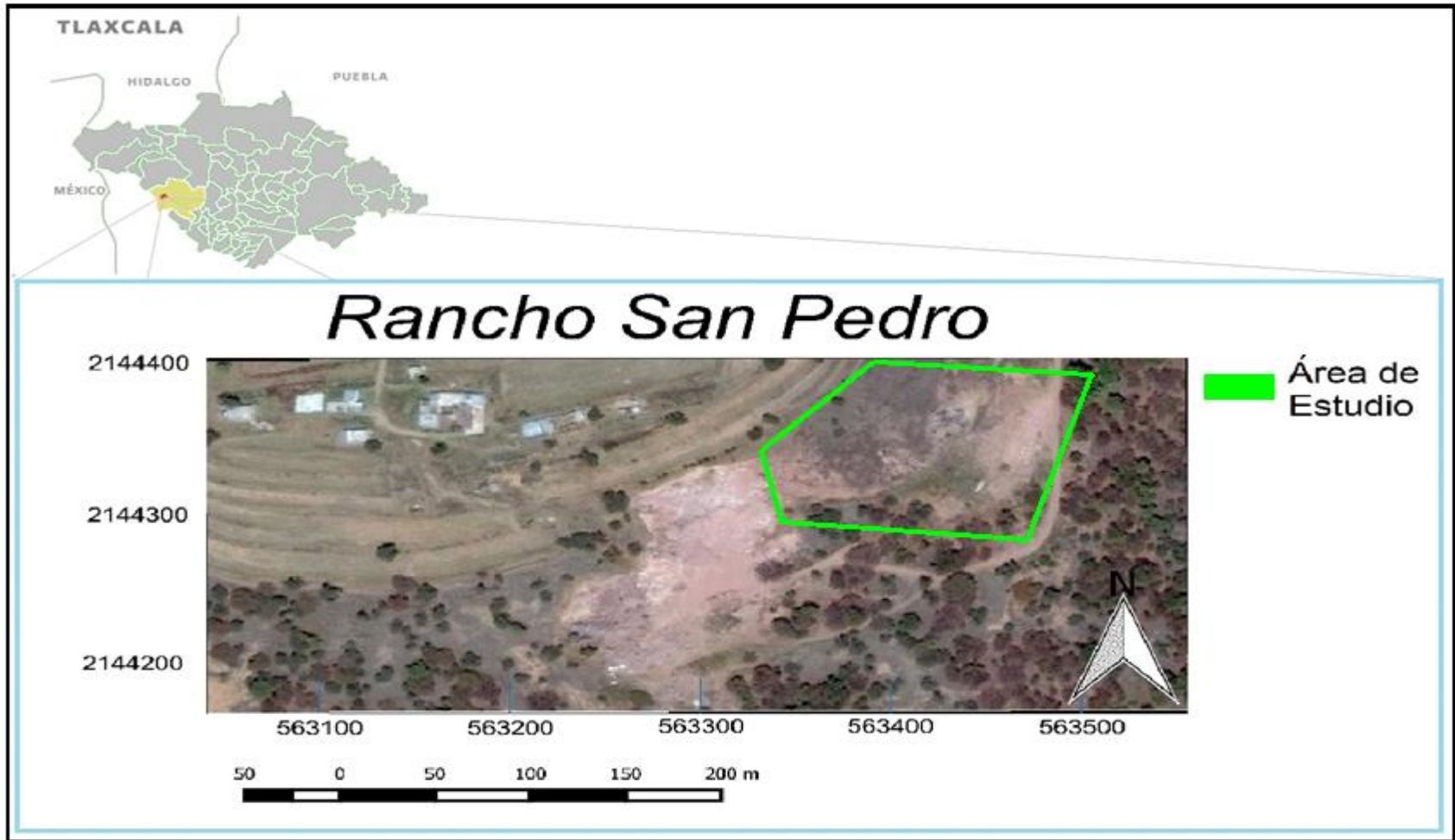


Figura 1.1. Ubicación de Rancho San Pedro y zona donde realizó el estudio

1.2.- Geología del municipio

El municipio de Ixtacuixtla colinda al Norte con el municipio de Españita y Hueyotlipan, al Este con Santa Ana Nopalucan, Nativitas, Tepetitla y con el estado de Puebla, al Oeste colinda con el estado antes mencionado y con el municipio de Españita. El municipio de Ixtacuixtla ocupa el 4.1% de la superficie total del estado cuenta con 113 localidades, incluida la cabecera municipal del mismo nombre tiene un clima predominantemente templado-subhúmedo, con lluvias en verano; su uso de suelo es conformado por un 16% de bosques, 18% de pastizales y un 53% de uso agrícola.

Pertenece a la provincia geológica Eje Neovolcánico y a su vez a la subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac, está constituido básicamente por topofomas que en un 58% son meseta basáltica con cañadas en un 35% con llanura aluvial con lomeríos y en un 7% lomerío de basalto con cañada.

Básicamente su geología está constituida por rocas ígneas extrusivas, toba de constitución intermedia de edad neógena en un 78% del territorio que constituye al municipio, en un 10 % se conforma por suelo aluvial de edad correspondiente al cuaternario, como se muestra en la Figura 1.2; dichos datos geológicos tomados del (Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, Tlaxcala, 2009).

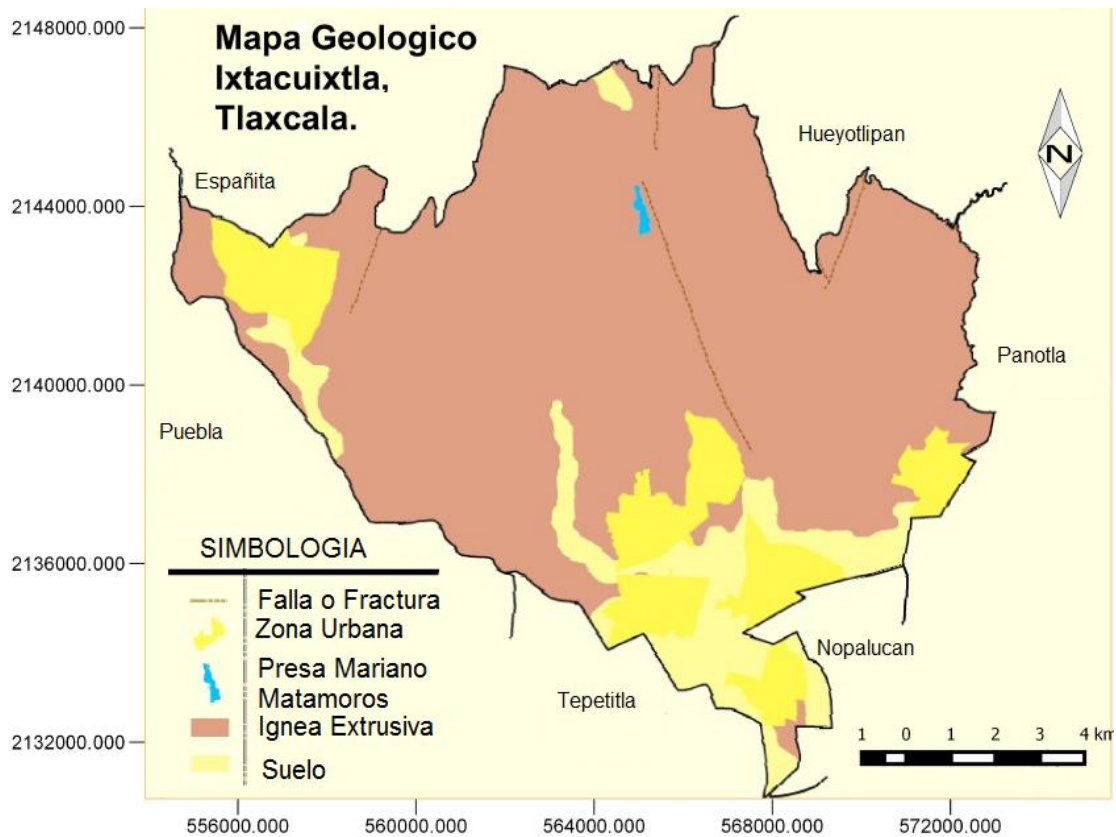


Figura 1.2 Mapa Geológico de Ixtacuixtla Tlaxcala (PIGM de los Estados Unidos Mexicanos Ixtacuixtla Tlaxcala, 2009)

De igual manera se observan un conjunto de fracturas y una falla de tipo normal paralela a la Presa Mariano Matamoros ubicada en la parte central de la Figura 1.2 con una longitud aproximada 7 km. Por otro lado las fracturas están ubicadas en las porciones norte, este y oeste como lo ilustra el mapa geológico. (Carta Geológica Minera Edo. de México, 2002).

A la altura de la presa Mariano Matamoros se distingue la cantera de San Pedro, cuyo tiempo de explotación es aproximadamente de 10 años. La roca de color rojizo, densa y muy fracturada de espesores observados en la cantera de 15 a 20 m. Figura 1.3



Figura 1.3 Izquierda, Cantera de San Pedro siendo explotada. Derecha, muestra de mano de la roca explotada.

Por análisis macroscópico de la muestra de mano, se llega a la conclusión de que la roca extraída es una Dacita, teniendo como principales características, una coloración rojiza, lo cual nos indica un mayor contenido de silicatos, mostrando una diferencia marcada en la composición mineral de una roca andesítica, y teniendo un mejor acercamiento a la coloración de una roca ácida, por otro lado la roca no presenta porosidad marcada lo cual descarta un enfriamiento súbito de la lava en el tiempo de formación de la roca, por el contrario, muestra formación de pequeños minerales apreciables a simple vista, de esta manera se infiere que la roca tuvo un ambiente de formación porfídico de acuerdo a las principales familias de rocas ígneas según López Ramos (1980).

Capítulo 2. Conceptos Teóricos

2.1.- Fundamentos Teóricos

El método de Corriente continua consiste en arreglos de cuatro electrodos alineados y dispuestos simétricamente con respecto a un punto de atribución generando un estímulo al suelo mediante inyección de corriente eléctrica continua a través de los electrodos A y B, en respuesta se obtiene una diferencia en el potencial en los electrodos M y N que estos a su vez están unidos midiendo la diferencia de potencial a distintos puntos. Figura. 2.1

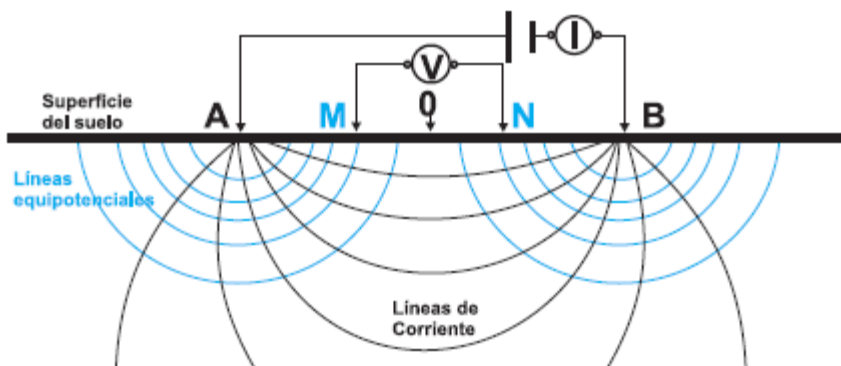


Figura 2.1 Principio básico del método de resistividad

2.2.- Prospección Eléctrica de Corriente Continua

El método de prospección eléctrica mediante corriente continua se fundamenta en detectar los efectos superficiales que produce el flujo de una corriente eléctrica inducida, por el subsuelo a partir de la medición de la diferencia de potencial, pero el parámetro físico básico que se obtiene es la resistividad del subsuelo en los diferentes terrenos siendo la unidad de medida ohmio-metro $\Omega.m$. Se debe hacer mención que la resistividad en las rocas se ve afectada en función de algunas características como las siguientes:

- Distribución espacial.
- Composición mineralógica.
- Sales disueltas.
- Cantidad de humedad.
- Porosidad y/o permeabilidad.

Se ha establecido que la resistividad en las rocas depende en gran medida de sus propiedades físicas, mineralógicas y porcentaje de saturación de agua donde si bien el agua pura es prácticamente aislante, de manera natural la encontramos con minerales disueltos, siendo conductiva por su grado de salinidad, de esta manera podemos deducir que pese a que los minerales metálicos son conductivos y los minerales vítreos son mayormente resistivos, la fisura y la presencia de agua salada aumentan los rangos de conductividad. Algunos materiales como limos, arenas, arcillas y margas, por mencionar algunos, se mantienen en un nivel intermedio de conductividad. Figura 2.2 Cantos 1973.

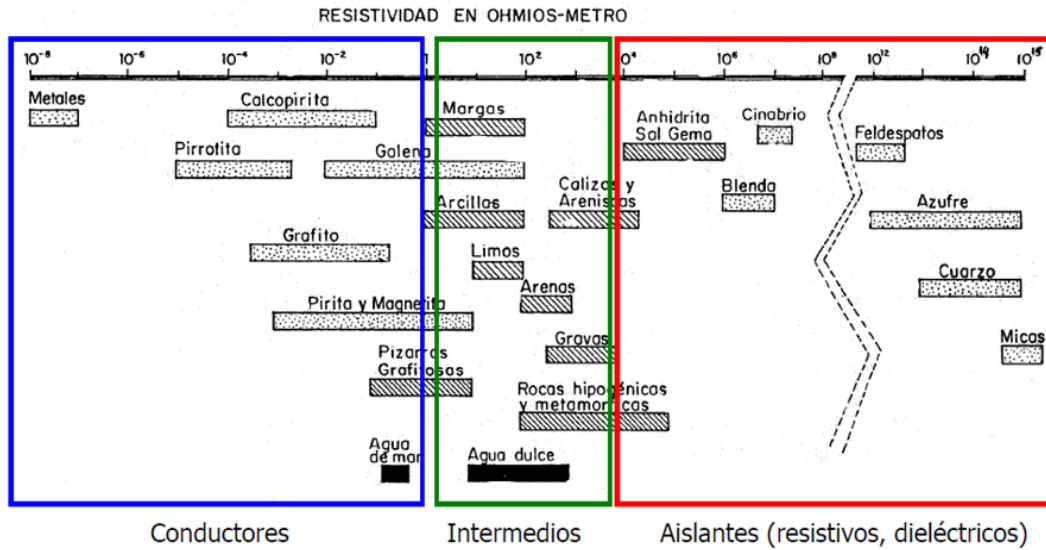


Figura 2.2 Gráfico de los rangos de variación de las resistividades más comunes de algunas rocas y minerales.

2.3.- Medida de la Resistividad Eléctrica

Al introducir una corriente de intensidad I en el suelo en un punto A , mediante la ley de Ohm se calcula una resistencia R , que es la oposición del paso de la corriente en un casquete (semiesférico) de radio r y de diferencial dr y donde ρ es la resistividad y es una propiedad intrínseca de cada material Figura 2.3 (Roman, 2010).

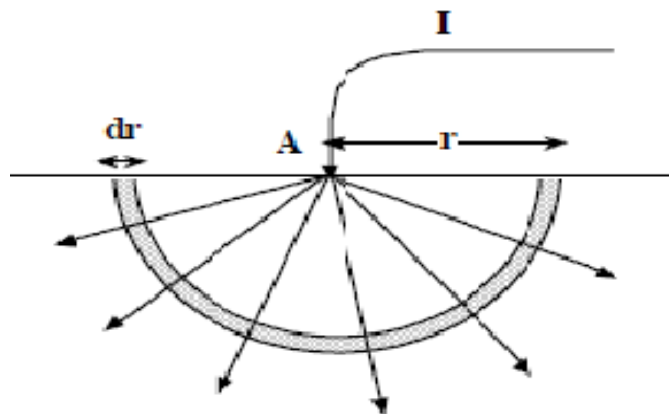


Figura 2.3 Descripción del casquete semiesférico.

$$R = \rho \frac{\text{longitud}}{\text{seccion}} = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \quad (1)$$

Tomando como base la ecuación de la ley de Ohm ecuación (2) que indica que el voltaje es proporcional al producto de la resistencia eléctrica por la intensidad de corriente

$$-dv = R * I \quad (2)$$

Y sustituyendo el valor de R de la ecuación (1) en (2) resulta

$$-dv = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \cdot I \quad (3)$$

Al integrar se obtiene:

$$V = \rho \frac{I}{2\pi r} \quad (4)$$

Para introducir esta corriente debe existir otro electrodo B , por lo cual el potencial generado en el punto M será igual que el producido por el A menos el producido por B , aplicando dos veces la expresión 4 tenemos el potencial en el punto M :

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi AM} - \frac{\rho I}{2\pi BM} \quad (5)$$

Pero en la práctica no medimos el potencial en un punto, sino que medimos la diferencia de potencial entre dos puntos M y N aplicando Figura 2.4, la expresión anterior al punto N resulta.

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi AN} - \frac{\rho I}{2\pi BN} \quad (6)$$

Por tanto la diferencia de potencial entre los puntos M y N será la ecuación (7):

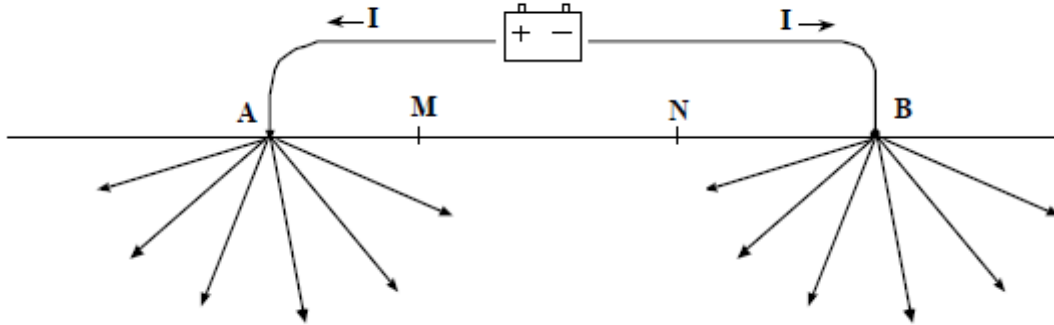


Figura 2.4 Casquete semiesférico para diferencia de potencial en M y N

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (7)$$

Despejando la resistividad ρ tenemos:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \quad (8)$$

Simplificando esta expresión y llamando K a la segunda fracción resulta la fórmula que se usa en el campo en cada medida:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K \quad (9)$$

Donde K se denomina coeficiente geométrico del arreglo, el cual depende de las distancias de los 4 electrodos, es necesario que A , B , M y N estén en una disposición especial para deducir la formula. Para obtener la resistividad del suelo se divide la diferencia de potencial con la corriente inyectada, esto se multiplica por el coeficiente K

El valor de ρ obtenido de la operación anterior podría verse afectado por la influencia de distintos materiales a profundidad, por lo tanto es denominado como resistividad aparente ρ_a .

2.4.- Tomografía Eléctrica Resistiva (TER)

La Tomografía Eléctrica Resistiva (TER) desarrollada en la década de los 90's definida como la evolución de los métodos geoelectricos, impulsada por el desarrollo de las computadoras permio gran cantidad de cálculos en poco tiempo.

El método consiste en sacar un perfil continuo de datos de resistividad del suelo el cual permite obtener una imagen detallada de la variación de la resistividad del suelo, a diferencia de los métodos clásicos que no resultan tan acertados (sondeos eléctricos verticales y calicatas),

Otras de las ventajas de la tomografía eléctrica se muestran en la Tabla 2.1. (Mejía & Vega Vega, 2009)

<i>TOMOGRAFIA ELECTRICA.</i>	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Buena resolución horizontal y vertical ✓ Permite corrección topográfica. ✓ Mayor cobertura en área. ✓ Los resultados de la TER se presentan en una imagen que facilitan la comprensión. ✓ Permite realizar el levantamiento de resistividades aun en suelos cuya geología es compleja. ✓ El uso de los resultados en la TER conllevan a una optimización en los cuales la reducción de los costos es significativo. ✓ Permite el uso en otras aplicaciones como la geotecnia. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mayores requerimientos en equipo. ✓ Uso de software más especializado y costoso. ✓ Mayor tiempo de adquisición de datos e interpretación.

Tabla 2.1 Comparación de ventajas y desventajas del método de Tomografía Eléctrica Resistiva.

2.5.- Tipos de Arreglos

La TER es utilizada para determinar variaciones laterales como verticales sobre aquellas estructuras geológicas complejas. El estudio se realiza con un cierto número de niveles de datos, en cada nivel se usa una separación entre electrodos constante y aumenta a medida que varía el nivel de profundidad. El número de lecturas dependerá del número de electrodos y niveles.

2.5.1.- Wenner o Wenner Alpha

En este arreglo los electrodos se mantienen equidistantes y se mueven linealmente con disposición electródica $A M N B$ aumentando el espaciamiento $n \times a$ donde n es el factor de separación conocido también como nivel, una de las principales cualidades de este arreglo es que es apto para ver cambios verticales y una de sus deficiencias es su deficiente apreciación en cambios horizontales. Figura 2.5 (Lara, 2012)

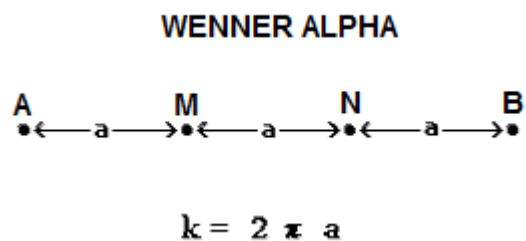
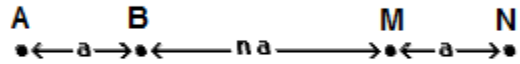


Figura 2.5 Disposición de electrodos y factor geométrico para el arreglo Wenner Alpha

2.5.2.- Dipolo-Dipolo

La disposición geométrica de este arreglo está dada por $A B M N$ en principio la distancia es equidistante entre electrodos pero se incrementa $n \times a$ en $A-B$ y $M-N$ una de sus ventajas es que es altamente sensitivo a los cambios horizontales, en contraste la visualización a cambios verticales es carente y con baja intensidad de señal para valores grandes del factor n , la profundidad media de investigación depende del espaciamiento de a y el factor n . Figura 2.6

DIPOLO - DIPOLO



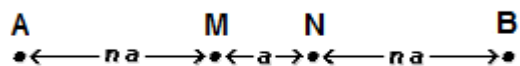
$$k = \pi n(n+1)(n+2) a$$

Figura 2.6 Disposición de los electrodos y factor geométrico en arreglo Dipolo-Dipolo.

2.5.3.- Wenner –Schlumberger

Es un híbrido entre los arreglos Wenner y Schlumberger, la disposición electródica es la misma que en el arreglo Wenner con la diferencia que el factor n es la relación de distancia $A-M$ o $N-B$ usado para apreciación moderada en estructuras tanto verticales como horizontales, además maneja una profundidad media con respecto a los arreglos Wenner y Dipolo-Dipolo Figura 2.7

WENNER - SCHLUMBERGER



$$k = \pi n(n+1) a$$

Figura 2.7 Disposición de los electrodos y factor geométrico en arreglo Wenner-Schlumberger.

2.6.- Profundidad de la tomografía

La profundidad a la que se sitúa un punto de atribución depende de la disposición de los electrodos (más espacio horizontal, mayor profundidad), también a la distribución de las resistividades del medio. En la Tabla 2.2 a continuación se muestra el factor de profundidad media Z_e donde L es la longitud total del arreglo. El factor geométrico está dado para un espaciamiento de electrodos (a).

La profundidad media nos da una idea de profundidad de investigación y no depende de la resistividad aparente, debido a que las profundidades son estrictamente medias para un modelo de tierra homogéneo y suficientemente buena para planear un estudio de campo.

De la Tabla 2.2 podemos obtener la profundidad general de nuestro estudio mediante el valor correspondiente a la apertura entre electrodos multiplicado por el valor correspondiente Z_e/a . Como se muestra en la gráfica 2.1 siguiente con un valor de a igual a 5 m, para 8 niveles, se puede apreciar las diferentes profundidades a las que se puede llegar dependiendo el arreglo que se elija (Loke, 2001). Figura 2.8 se ejemplifica una gráfica comparativa para los tres arreglos principales de tomografía, con un espaciamiento electródico de 5 m y para 8 niveles.

Array type	z_e/a	z_e/L	Geometric Factor	Inverse Geometric Factor (Ratio)
Wenner Alpha	0.519	0.173	6.2832	0.15915 (1.0000)
Dipole-dipole				
n = 1	0.416	0.139	18.850	0.05305 (0.3333)
n = 2	0.697	0.174	75.398	0.01326 (0.0833)
n = 3	0.962	0.192	188.50	0.00531 (0.0333)
n = 4	1.220	0.203	376.99	0.00265 (0.0166)
n = 5	1.476	0.211	659.73	0.00152 (0.0096)
n = 6	1.730	0.216	1055.6	0.00095 (0.0060)
n = 7	1.983	0.220	1583.4	0.00063 (0.0040)
n = 8	2.236	0.224	2261.9	0.00044 (0.0028)
Wenner - Schlumberger				
n = 1	0.519	0.173	6.2832	0.15915 (1.0000)
n = 2	0.925	0.186	18.850	0.05305 (0.3333)
n = 3	1.318	0.189	37.699	0.02653 (0.1667)
n = 4	1.706	0.190	62.832	0.01592 (0.1000)
n = 5	2.093	0.190	94.248	0.01061 (0.0667)
n = 6	2.478	0.191	131.95	0.00758 (0.0476)
n = 7	2.863	0.191	175.93	0.00568 (0.0357)
n = 8	3.247	0.191	226.19	0.00442 (0.0278)
n = 9	3.632	0.191	282.74	0.00354 (0.0222)
n = 10	4.015	0.191	345.58	0.00289 (0.0182)

Tabla 2.2 Factor de profundidad media Z_e , de acuerdo al número de niveles Look (2001).

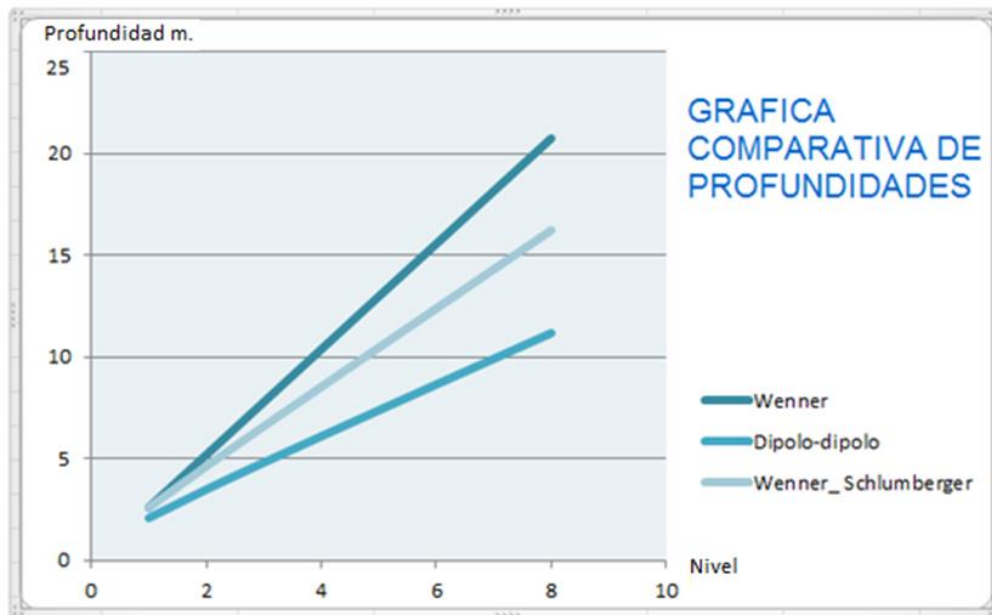


Figura 2.8 Gráfica comparativa de profundidades de los tres tipos principales de tomografías a un nivel 8.

Capítulo 3. Metodología y Procesamiento

3.1.- Metodología

El desarrollo de este estudio implicó un trabajo de investigación en campo en la zona, para la obtención de las resistividades aparentes en donde se pretende llevar a cabo la expansión de la cantera del Rancho de San Pedro localidad de Ixtacuixtla, Tlaxcala; misma donde se busca observar el comportamiento general de la roca. Se llevaron a cabo 4 tomografías y fueron distribuidas sobre la superficie en donde se planea una expansión de la cantera, con una disposición eléctrica Wenner-Schlumberger, como se mencionó en el capítulo anterior una de las ventajas de éste arreglo es la apreciación moderada en estructuras tanto verticales como horizontales, manejando una profundidad media en consideración de los arreglos Wenner y Dipolo-Dipolo. A continuación se hace una descripción de los materiales empleados y las tomografías llevadas a cabo.

3.2.- Instrumentación

Para llevar a cabo el presente trabajo se utilizaron diversos instrumentos que facilitaron la obtención de los datos en campo, los cuales se muestran a continuación en la Tabla 3.1.

CANTIDAD (pza.)	MATERIAL
1	RESISTIVIMETRO
30	ELECTRODOS
4	CARRETES
4	RADIOS
4	MARROS
1	CINTA METRICA
1	LIBRETA DE CAMPO
1	CINTA DE AISLAR
1	PINZAS

Tabla 3.1 Materiales empleados para la toma de datos en el área de estudio.

3.3.- Descripción del equipo

Para realizar el estudio geofísico se empleó un resistivímetro (SARIS) de la marca Scintrex el cual es una consola electrónica y un módulo de alimentación y otro de baterías, que puede ser usada en modo estándar de 4 electrodos, y en una forma multi-*eléctrica*. De igual manera consta de un módulo de alimentación con carga eléctrica de 100 watts y hasta 1 Ampere. Es un instrumento de fácil uso y peso ligero, por otro lado incluye una amplia gama de arreglos, cuenta con una memoria interna de 1,008 kilobytes el cual permite almacenar hasta una semana de datos, además el sistema cuenta con un panel frontal como se muestra en la Figura 3.1.



Figura 3.1 Toma frontal del resistivímetro empleado para la adquisición de los datos.

Al inicio de la toma de datos en campo fue necesario conectar los carretes de cable con una longitud de 150 m a los puertos correspondientes de la consola siendo estos los de corriente A y B, encargados de suministrar la energía al suelo, y los cables que medirían el diferencial de potencial: M y N. (Manual de Operaciones, SARIS, 2001)

3.4.- Toma de datos y descripción

Se llevó acabo la toma de datos para cuatro tomografías con un arreglo eléctrico Wenner-Schlumberger, realizadas con la finalidad de analizar el comportamiento general de la roca a profundidad en la cantera del Rancho San Pedro, dichas tomografías se efectuaron en una superficie de forma irregular de 19953.723 m². En dicha área se pretende la ampliación de la cantera para su explotación, de igual manera en la Figura 3.2 se muestra la disposición de las tomografías a lo largo de la superficie de interés.

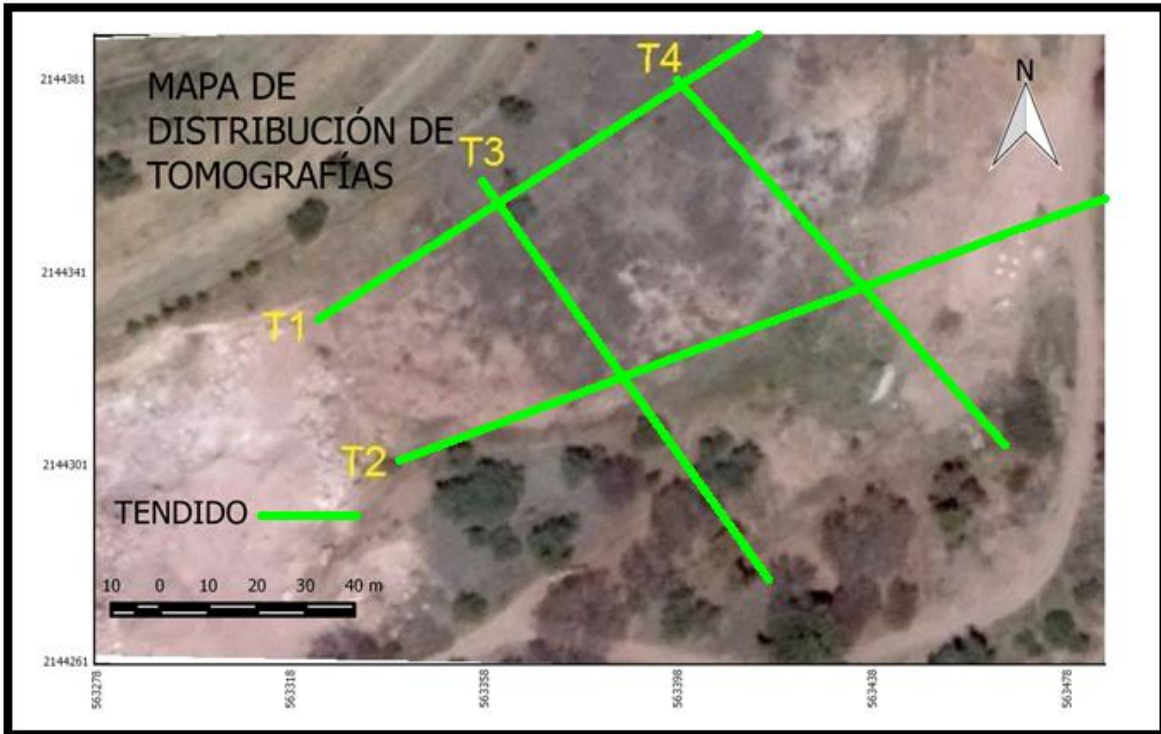


Figura 3.2 Distribución de los perfiles en la superficie a analizar.

3.4.1.- Tomografías

En la Tabla 3.2 se muestra una descripción de las características técnicas que presentan cada una de las 4 tomografías, así como sus coordenadas de inicio y final, de igual manera el espaciamiento electródico, la longitud total del tendido y niveles respectivos para cada tendido y la profundidad alcanzada.

TOMOGRAFÍAS	COORDENADAS INICIO/FINAL		ALTURA INICIO/FINAL		LONGITUD	APERTURA/ELECTRODOS	NIVELES	PROFUNDIDAD
1	2144331.29 N	563417.71 E	2605 m	2600 m	110 m	5 m	9	20 m
	2144391.33 N	563324.71 E						
2	2144302.80 N	563341.32 E	2599 m	2576 m	152 m	8 m	8	25 m
	2144356 N	563488.87 E						
3	2144379.36 N	563358.42 E	2605 m	2589 m	100 m	5 m	8	15 m
	2144278.75 N	563417.29 E						
4	2144379.78N	563398.03 E	2602 m	2593 m	100 m	5 m	8	15 m
	2144305 N	563465 E						

Tabla 3.2 Datos técnicos de la geometría empleada en las 4 tomografías.

3.5.- Trabajo de Escritorio

Al finalizar el trabajo de campo en la cantera se llevó acabo el procesamiento de datos mediante el software RES2DINV ® de la empresa GEOTOMO-SOFTWARE. Inicialmente se realizó la carga de las resistividades adquiridas en la cantera en un block de notas mediante la estructura recomendada en el manual del programa. Posterior al ingreso del arreglo, las resistividades con sus respectivos puntos de atribución y sus respectivas alturas se procedió a visualizar los puntos graficados en el programa, esto con la finalidad de observar la calidad de los datos, dicho en otras palabras, que las resistividades sean congruentes entre sí evitando valores anómalos, teniendo como criterio para la eliminación de estos puntos la tendencia de la forma en la curva, como se muestra en la Figura 3.3

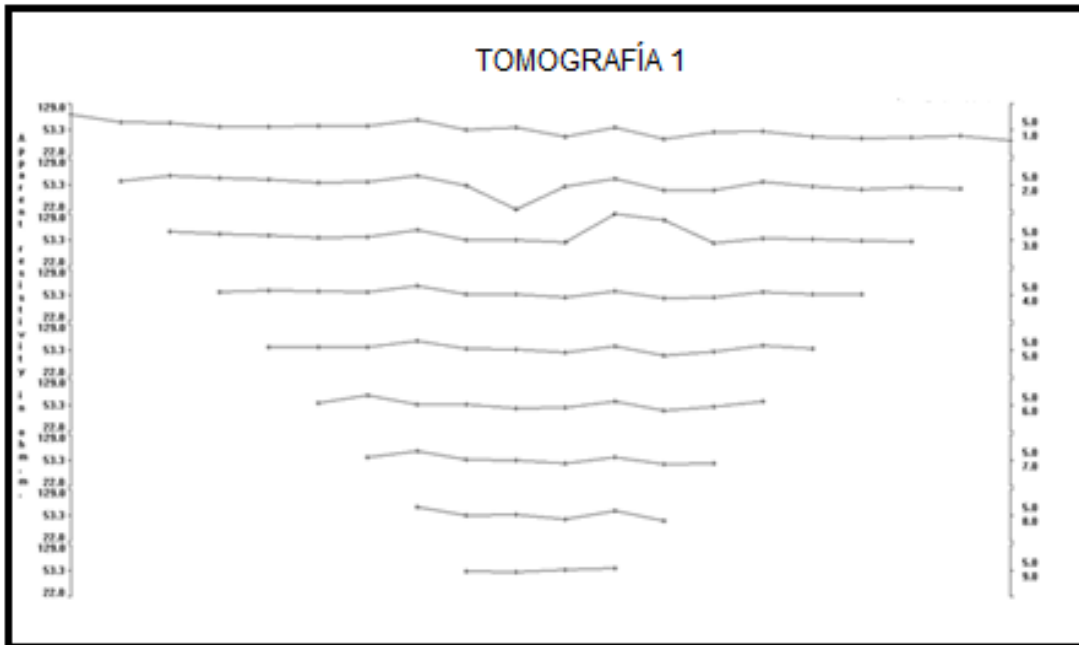


Figura 3.3 Apartado donde se eliminan los puntos con resistividades anómalas.

Posterior a la corrección de las resistividades se llevó a cabo el procesamiento de los datos generando el archivo de salida con las resistividades corregidas para la visualización de las tomografías, donde se aprecian tres perfiles, siendo el primero la representación de las medidas observadas en campo, el segundo corresponde a las resistividades calculadas a partir del modelo de resistividades siendo este el tercer modelo de resistividad calculado con respecto a la profundidad verdadera, obteniendo el resultado de la inversión de datos donde se busca encontrar un modelo geoelectrico. Figura 3.4

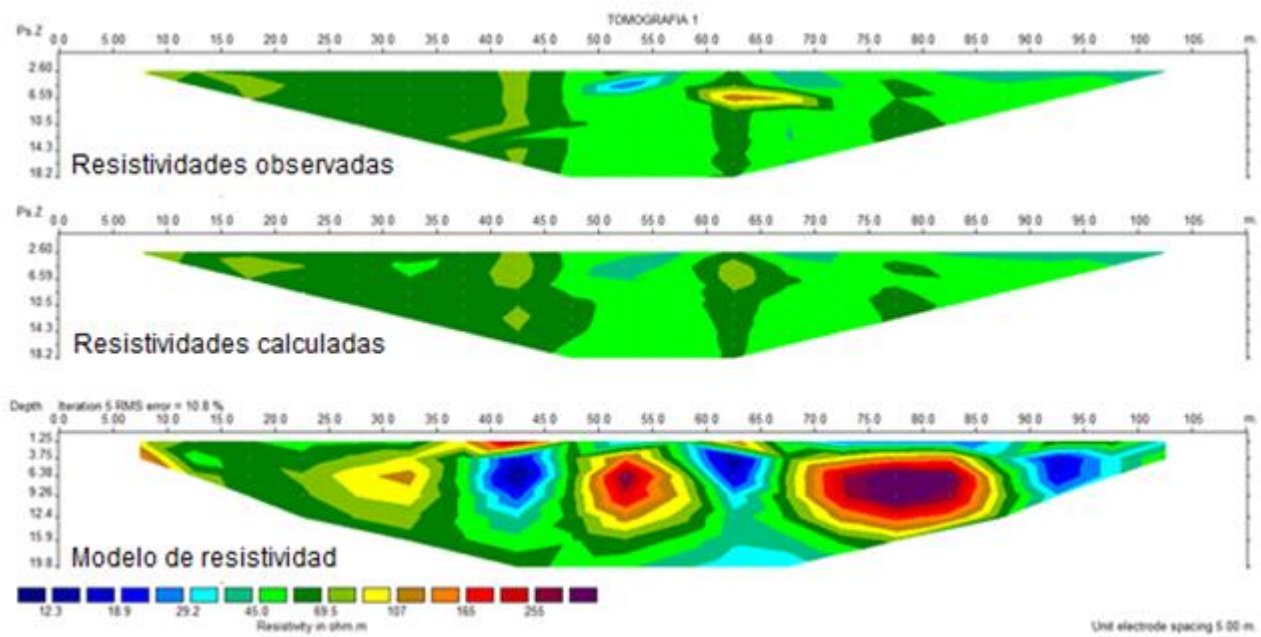


Figura 3.4 Inversión de los datos de resistividad de la Tomografía 1.

Una vez generados los perfiles en el programa RES2DINV, tomando en cuenta las respectivas tomografías y considerando que en algunos casos tienen una variación considerable en la altura entre el punto de inicio y el punto final como se describe en la Tabla 3.2, es necesario generar un perfil con topografía.

Posterior al procesamiento de los datos de las 4 tomografías con el software RES2DINV fue necesario generar un archivo de salida para poder ser abierto en el programa SURFER, con las resistividades y su disposición dentro del perfil obtenido con la finalidad mapear los valores de resistividades caracterizando parámetros arbitrarios de las zonas representativas, de alta, media y baja resistividad para una mejor apreciación, como resultado se puede observar el comportamiento de las anomalías a lo largo de las tomografías, pudiendo asignar una unidad geológica a dichos parámetros geoelectricos; estas unidades geológicas son congruentes con los materiales observados en campo así como sus condiciones físicas y toda la información recabada previa a la toma de datos permitiendo la obtención de los perfiles geológicos.

Otra herramienta de gran utilidad para el desarrollo de este trabajo sin duda ha sido el programa VOXLER 3® el cual es un software científico de modelación en 3D que permite observar las tomografías y su disposición conforme a sus respectivas coordenadas, así también una valoración tridimensional de los materiales, lo que permite obtener la cualificación de los volúmenes de las unidades que se describen en nuestra próxima unidad.

Capítulo 4. Interpretación de Datos Geoeléctricos

4.1.- Interpretación de Tomografías.

Posterior al procesamiento de datos en el programa RES2DINV se obtuvieron perfiles geoeléctricos que en este capítulo se describen. Para el análisis de dichas tomografías, se identificaron tres zonas de resistividad apreciables; la primera denominada como baja resistividad cuyos valores que van de los 10 Ohms.m a los 40 Ohms.m, en segundo plano tenemos las resistividades medias donde sus rangos abarcan de los 41 Ohms.m a 90 Ohms.m y por último nos referiremos a las altas resistividades con un rango de valores que van de los 91 Ohms.m en adelante, siendo este material el de interés para su explotación en la cantera. Es necesario destacar que estos criterios se aplicaron para la descripción de las 4 tomografías y la generación de las secciones geológicas.

4.1.1.- Tomografía 1

La Tomografía 1 en la Figura 4. 1. Dicha tomografía cuenta con una orientación SW-NE, donde la parte SW cuenta con una elevación 2690 msnm y en la parte NE se ubica 2900 msnm, se observan resistividades que van de los 10 Ohms.m hasta los 190 Ohms.m. Comenzando la descripción con las resistividades bajas las cuales se encuentran referenciadas como zona azul, con valores que van de los 10 Ohms.m hasta los 40 Ohms.m; cuenta con 3 anomalías representativas en este perfil, la primera se ubica a los 40 m con respecto a la horizontal a una profundidad de 2 m y un espesor de 10 m y una anchura de 5 - 6 m asemejando una forma circular, la cual se halla rodeada en su totalidad por resistividades medias (zona verde), que van de los 41 Ohms.m a los 90 Ohms.m que ocupan los espacios entre las anomalías de baja y

alta resistividad siendo esta zona la que aflora mayoritariamente a lo largo del tendido.

En la baja resistividad tenemos la segunda anomalía, se ubica a una longitud de 60 m con respecto al tendido asemejando la forma a una cuña a una profundidad 1-2 m con una longitud en su parte más ancha de 8 m reduciéndose a profundidad llegando a 1 m aproximadamente volviendo a engrosar para la parte más profunda llegando a los 5 m cuenta con un espesor de 15-16 m aparentemente siguiendo a profundidad, rodeada en la parte superior y en los costados de nueva cuenta por resistividades medias (color verde).

Llegando a los 86 m con respecto al tendido se tiene un afloramiento de baja resistividad siendo la anomalía para bajas resistividades que a profundidad se va ensanchando con un espesor aproximado de 8-10 m y un ancho de 6m para la parte más pronunciada, rodeada en sus flancos por resistividades medias.

Por último se observan altas resistividades con valores asignados de 91 Ohms.m en adelante en este caso con resistividades que llegan a los 290 Ohms.m, esta zona tiene 3 anomalías apreciables, la primera se encuentra a los 25 m a lo largo del tendido a una profundidad de 2 m y un espesor de 5 m, saliendo de manera zigzagueante hasta llegar a la superficie a los 35 m, expuesta hasta los 46 m con un espesor promedio de 2 m. La segunda anomalía de este apartado se ubica siguiendo a lo largo del tendido a 47 m con profundidad de 2 m, un espesor de 12 m y un ancho de la anomalía de 10 m con forma asemejada a una circunferencia.

Por último se encuentra una anomalía de alta resistividad la cual se ubica llegando a los 68 m del tendido a una profundidad de 2 m, con un espesor de 10 – 11 m y una longitud de 18m.

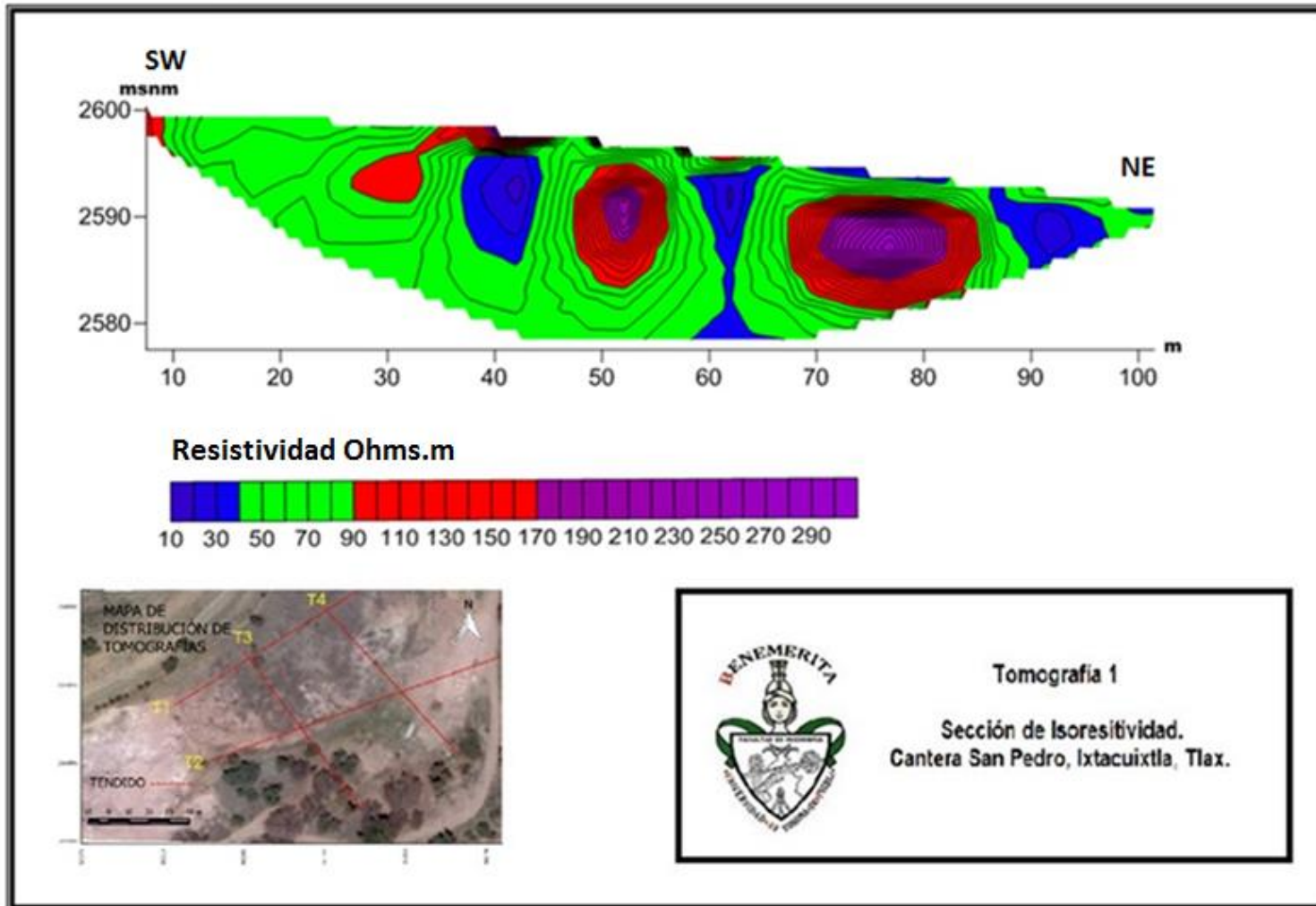


Figura 4.1 Zonas de resistividad en la Tomografía 1.

4.1.2.- Tomografía 2

Siguiendo con los perfiles de zonas resistivas se tiene la Tomografía 2 , la cual tiene una orientación SW-NE donde en el punto de inicio situado al SW cuenta con una elevación de 2595 msnm y en la parte NE su altura es de 2585 msnm, llegando a una profundidad máxima de penetración de 20-21 m. con resistividades que van de los 15 Ohms.m a los 100 Ohms.m, donde las resistividades bajas (área azul) se encuentran expuestas en superficie a partir de los 40 m, teniendo su origen en profundidad, observándose desde los 20 m con respecto al tendido, a una profundidad de 2 - 5 m y un espesor de 13 - 14 m; cuenta con una longitud total de 45 m donde se encuentra rodeando un afloramiento de resistividad media (área verde) iniciando a los 10 m a lo largo del tendido con un espesor de 2-5 m y una longitud de 25 m.

Dando continuidad a la descripción de bajas resistividades a los 67 m siguiendo el tendido encontramos una anomalía que finaliza a los 100 m, con profundidad de 8 m y 16 m en el punto más profundo y un espesor máximo de 15 m.

Entre 30 y 67 m con respecto al tendido surge una zona de resistividad media que haciendo hasta superficie rodeando las dos anomalías de baja resistividad y ocupa la mayor parte de la Tomografía teniendo un espesor máximo de 20 m y siendo el mínimo de 5 m. En la parte central de la zona predominante de resistividades medias que se acaban de describir se aprecia un lente de alta impedancia iniciando a los 70 m con respecto a la horizontal con un espesor de 4 m a una profundidad de 5 m y una longitud de la anomalía de 11 m, siendo esta la única resistividad alta en este perfil que se muestra en la Fig. 4.2.

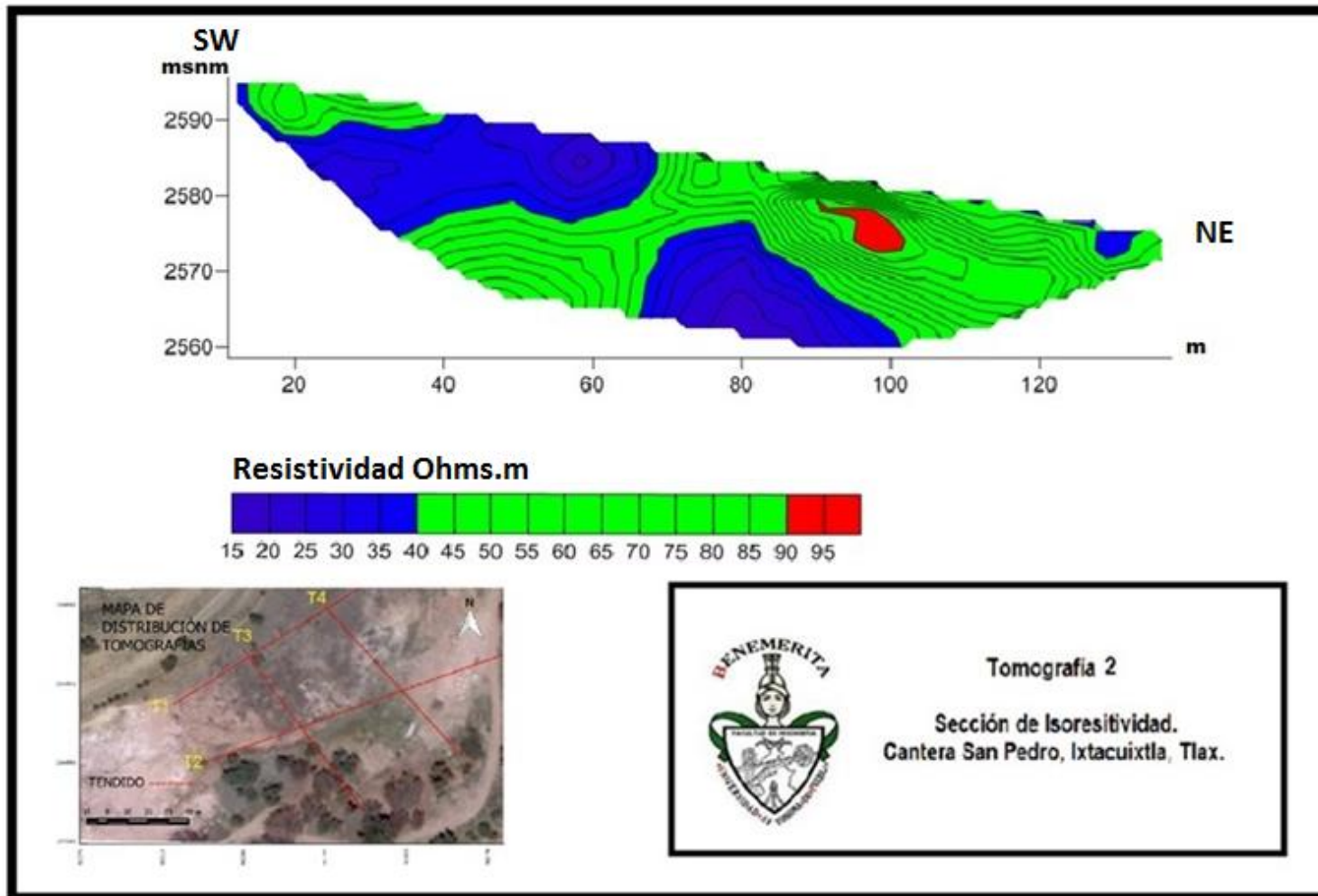


Figura 4.2 Zonas de resistividad en la Tomografía 2.

4.1.3.- Tomografía 3

La tomografía está orientada NW-SE observada en la Figura 4.3, donde en su origen del perfil se tiene una elevación de 2598 msnm y en el SE existe una elevación de 2577 msnm, abarcando resistividades de 15 Ohms.m a los 80 Ohms.m.

Este perfil se encuentra cubierto mayoritariamente con bajas resistividades (área azul) que cubren casi toda la Tomografía y envolviendo parcial o totalmente zonas medias (color verde). Las resistividades altas no se encuentran presentes en este perfil. Por consiguiente nos centraremos en describir las resistividades medias, las cuales se manifiestan en 5 zonas representativas de las cuales 4 se encuentran expuestas en superficie.

Al a los 7.5 m con respecto a la horizontal da inicio una zona de resistividad media finalizando a los 30 m , expuesta en superficie, llegando a los 15 m de profundidad y un espesor máximo de 10 m y una longitud de la anomalía de 12 m.

Siguiendo a lo largo del tendido y llegando a los 28 m existe un pequeño afloramiento en superficie de una longitud de 8 m con un espesor no mayor a 2 m. Al llegar a los 30-31 m con respecto a la horizontal tenemos un nuevo lente a una profundidad de 2 m y un espesor de 7 m y una longitud de 5 m siendo estas dos anomalías las más pequeñas.

A los 42 m del tendido surge una zona media expuesta en superficie con una longitud de 10 m y un espesor de 5 m, cubierto por resistividades bajas. Por último al llegar a los 65 m en la horizontal se encuentra expuesta una zona de medias resistividades con una profundidad máxima de 7-8 m y un largo de 23 m.

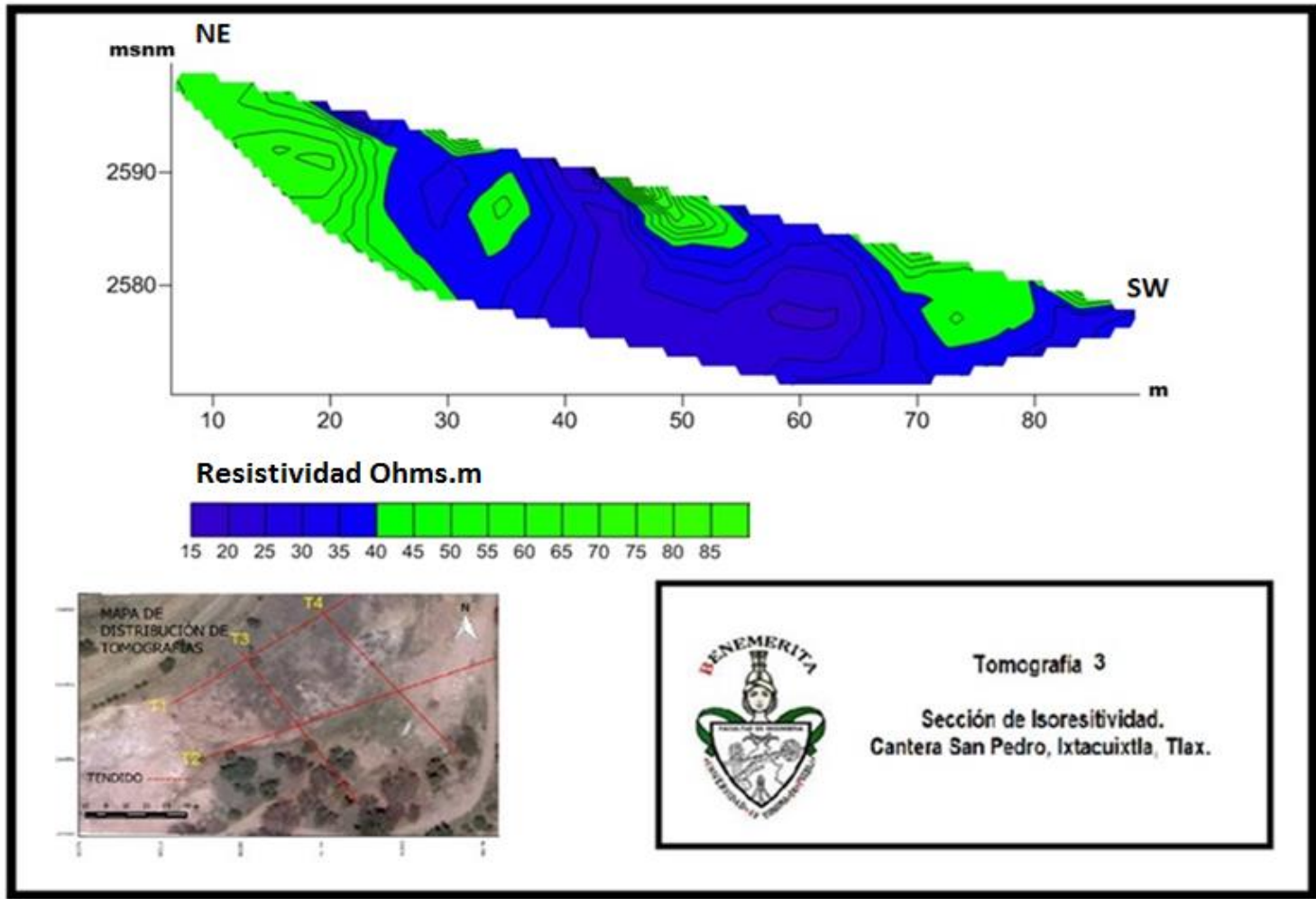


Figura 4.3 Zonas de resistividad en la Tomografía 3.

4.1.4.- Tomografía 4

Por último en la descripción de las zonas de resistivas tenemos la tomografía 4, la cual tiene una orientación NW- SE donde en la parte NW se ubica a una altura de 2595 msnm, en la porción SE tiene una altura de 2585 msnm y con una profundidad máxima de penetración de 15 m y una variación de resistividades que van de los 10 Ohms.m a los 200 Ohms.m.

Se observan tres zonas de resistividad las cuales se encuentran con una disposición horizontal, que a continuación se describirán iniciando por las bajas resistividades, solo se encuentran dos capas en la parte superior y en la parte inferior de la tomografía (zona azul). En la parte superior tiene una longitud de 85 m con un espesor mínimo de 1 - 2 m esta zona resistiva se encuentra expuesta en superficie. En la parte inferior de la tomografía a una profundidad de 12 - 14 m, con una longitud de 40 m y un espesor variable de entre 1 y 5 m.

En segundo término tenemos presencia de resistividades medias. Ubicando la primera zona tiene una longitud de 80 m; es una capa delgada con un espesor variante que va de los 2 m, como valor mínimo, llegando algunas zonas hasta los 3 - 4 m la cual subyace a la zona de bajas impedancias, esta misma zona de resistividad se repite a una profundidad de 6 m y 10 m de profundidad con una longitud de 55 m, con un espesor que va de los 3 a los 5 m. Cabe mencionar que estas dos zonas previamente descritas se encuentran rodeando tanto en la parte superior e inferior la tercera zona que a continuación se describe.

La zona de alta resistividad ubicada a lo largo de la parte central de la tomografía haciendo contacto tanto en la parte superior e inferior con zonas de resistividad media. La capa que nos aplica cuenta con una longitud de 70 m a una profundidad 3 - 5 m cuenta con un espesor que tiene una variación de 5 a 7.5 m Figura 4.4

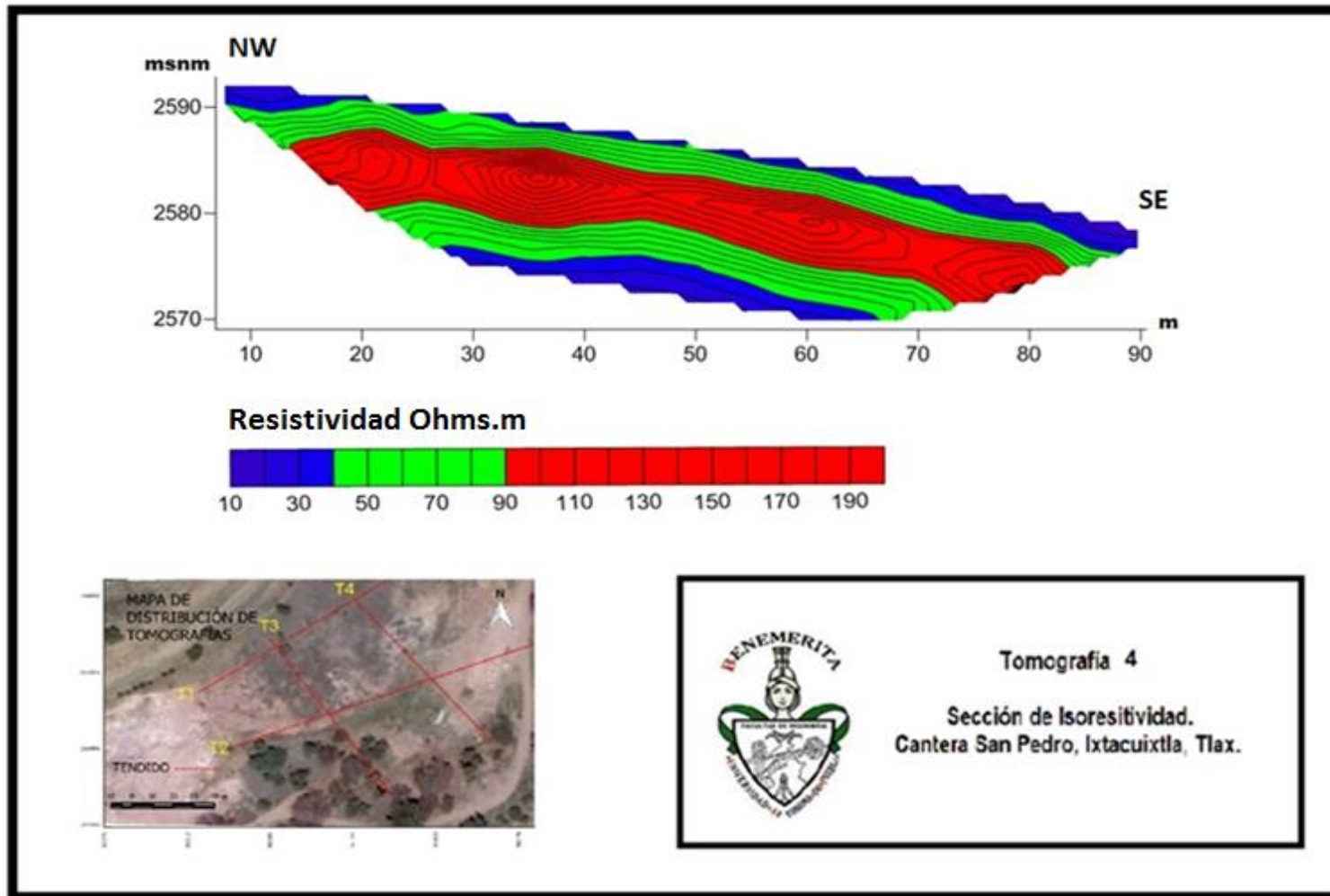


Figura 4.4 Zonas de resistividad en la Tomografía 4.

4. 2.- Unidades Geológicas

Al obtener los modelos geoelectricos antes descritos se procede a realizar los modelos geológicos, esto se hace asignando a un rango de resistividades una unidad geológica, para esto se necesita conocer la geología local de la zona de estudio y la respuesta geoelectrica de ese tipo de material.

En base a la geología del lugar y de los resultados de los modelos geoelectricos se identificaron 3 unidades litológicas las cuales se describen en la Tabla 4.1

Unidad	Rango (Ohm.m)	Descripción
Unidad 1	Menor o Igual a 40 Ohm.m	Compuesta por dacitas, muy fracturadas.
Unidad 2	Mayor a 41 Ohm.m y menor o igual a 90 Ohm.m	Compuestas por dacitas, con un fracturamiento intermedio.
Unidad 3	Mayores a 91 Ohm.m	Dacitas con un fracturamiento insipiente comparado con la unidad 1 y 2.

Tabla 4.1 Unidades litológicas, rango de resistividades y descripción.

Como se mencionó brevemente el modelo geológico obtenido se infirió a partir de las unidades geoelectricas, de acuerdo a lo observado en campo sobre todo en el corte de la cantera donde es explotada la roca actualmente y se aprecia la roca expuesta la cual correspondiente a rocas dacíticas, cabe mencionar que las divisiones de las unidades corresponden al comportamiento y distribución de la

roca a profundidad donde, la unidad 1 correspondiente a la resistividades de menor valor las cuales involucran valores menores o igual a los 50 Ohms.m, son rocas muy fracturadas y por ende el agua intersticial tiene mayor afluencia, permitiendo el paso de la corriente a través de las grietas en ellas. Esto reduce la resistividad que se puede describir como la dificultad del paso de la corriente a través de un material.

Por otro lado tenemos la Unidad 2 la cuales se rige con valores que son mayores a los 50 Ohms.m y menores o iguales a los 90 Ohms.m, esto se ve traducido en el modelo geológico como rocas dacitas con un menor fracturamiento debilitando el paso de la corriente a través de ellas.

Por último la Unidad 3 son resistividades mayores a los 90 Ohms.m, siendo la roca dacítica más sana, relativamente, lo cual nos dice que al existir menor fracturamiento, en consecuencia habrá menor agua intersticial, esto se ve traducido a que tenemos un menor flujo al paso de la corriente hay que recordar que los minerales disueltos en el agua, que esta a su vez se encuentra infiltrada en las rocas por medio de un fenómeno conocido como permeabilidad secundaria, es lo que permite el paso de la corriente a través de nuestro medio, en consecuencia en nuestra unidad 3 al encontrarse menos expuesta a la permeabilidad generada después de su génesis, la roca muestra un comportamiento de resistencia al paso de la corriente, cabe destacar que las resistividades de una roca sana ígnea están en un rango de 7000 Ohm.m por ende se asume que nuestra unidad tres, pese a que son resistividades altas comparada con la unidad 1 y 2, presentan fracturamiento de acuerdo con las resistividades ya descritas en este apartado.

4.3.- Interpretación

Al apreciar la distribución de las unidades a lo largo de los perfiles geológicos previamente mostrados en la Tabla 4.1, logran dar una idea de la distribución de las rocas en las secciones geológicas, observándose las siguientes características generales, dando inicio por el primer perfil geológico en la Figura 4.5.

En este perfil geológico se observa de manera general que la unidad 2, color verde, correspondiente a rocas dacíticas porfídicas de mediano fracturamiento, que cubre mayormente la tomografía rodeando las anomalías de la unidad 1 y la unidad 3, azul y rojo respectivamente, siendo la unidad 3 correspondiente a la roca dacítica porfídica más sana y siendo representativas de ella 3 anomalías de forma lenticular, ubicando la primera en el centro de la tomografía y la otra en la porción NE del tendido, cabe mencionar que estas dos anomalías no se encuentran expuestas en superficie, siendo la única que aflora la situada a los 40 m en la porción SW, la cual se encuentra sobre yaciendo a la unidad 1, donde las rocas dacíticas porfídicas con mayor presencia de agua intersticial son su principal característica y por ende con mayor fracturamiento, estas se encuentran dispuestas en dos sitios más, el primero se sitúa en el centro de la tomografía a 60 m asemejando su forma a cuña. La segunda anomalía se halla a 85-90 m en la porción NE donde por brevedad aflora en superficie para luego subyacer por debajo de la unidad 2.

Con lo que respecta al segundo perfil geológico Figura 4.6, cabe mencionar que la unidad 3 se encuentran ausente a excepción en la porción NE donde un pequeño lente se hace presente, dicha anomalía es minúscula comparada con la unidad 2 que lo rodea en su totalidad, siendo esta la unidad predominante en esta tomografía. Esta misma unidad 2 en la porción SW donde aflora en superficie y a su vez sobre yaciendo a la unidad 1 la cual a los 40 m se encuentra expuesta en superficie. Esta misma anomalía, unidad 1 a profundidad se encuentra sobre yaciendo a la unidad 2 la cual a partir de los 65-70 m con respecto al tendido se

encuentra expuesta en superficie para seguirse de esta manera hasta lo que resta de tomografía y donde a la vez en la parte central y a profundidad de la tomografía nuevamente rodea parcialmente a unidad 1.

En el tercer perfil geológico (Figura 4.7) predominan las dacitas porfídicas saturadas de la unidad 1, solo cubriendo parcialmente algunas de las anomalías donde se infieren rocas dacíticas parcialmente fracturadas, las cuales se encuentran diseminadas a lo largo de la tomografía y en la mayoría de los casos expuestas en superficie, siendo la anomalía de mayor tamaño de esta unidad la ubicada en la porción NE de la tomografía y conforme se avanza en la tomografía, dicha unidad se vuelve insipiente, donde dos anomalías afloran en superficie la primera a los 30 m y la segunda a los 50 m. De manera ajena a los afloramientos tenemos un lente a los 32 - 35 m el cual se encuentra a una profundidad de 5 m. Por último para esta unidad en la porción SW a 65 m con respecto al tendido tenemos un nuevo afloramiento de igual manera expuesto en superficie. Cabe aclarar que en esta tomografía la roca correspondiente a la unidad 3, siendo estas dacitas porfídicas relativamente sanas, se encuentran ausentes.

El cuarto perfil geológico en donde las 3 unidades son apreciables con una disposición horizontal como se muestra en la Figura 4.8, siendo la roca dacítica porfídica saturada la menos abundante localizándose de manera horizontal en la parte superior, se encuentra expuesta en superficie, donde en la parte central de la tomografía se vuelve una capa delgada no mayor a 1 m con respecto a sus flancos tanto en la porción NW y SE. Esta misma unidad se encuentra de igual manera en la parte inferior de la tomografía, siendo esta unidad 1 la de menor presencia en este perfil geológico.

Por otro lado a una profundidad media de 5 m se encuentra localizada roca dacítica porfídica más sana, la cual es la capa de mayor espesor y de nuestro interés, y se encuentra subyaciendo y sobre yaciendo por la unidad 2, siendo esta tomografía donde la unidad 3 tiene mayor presencia.

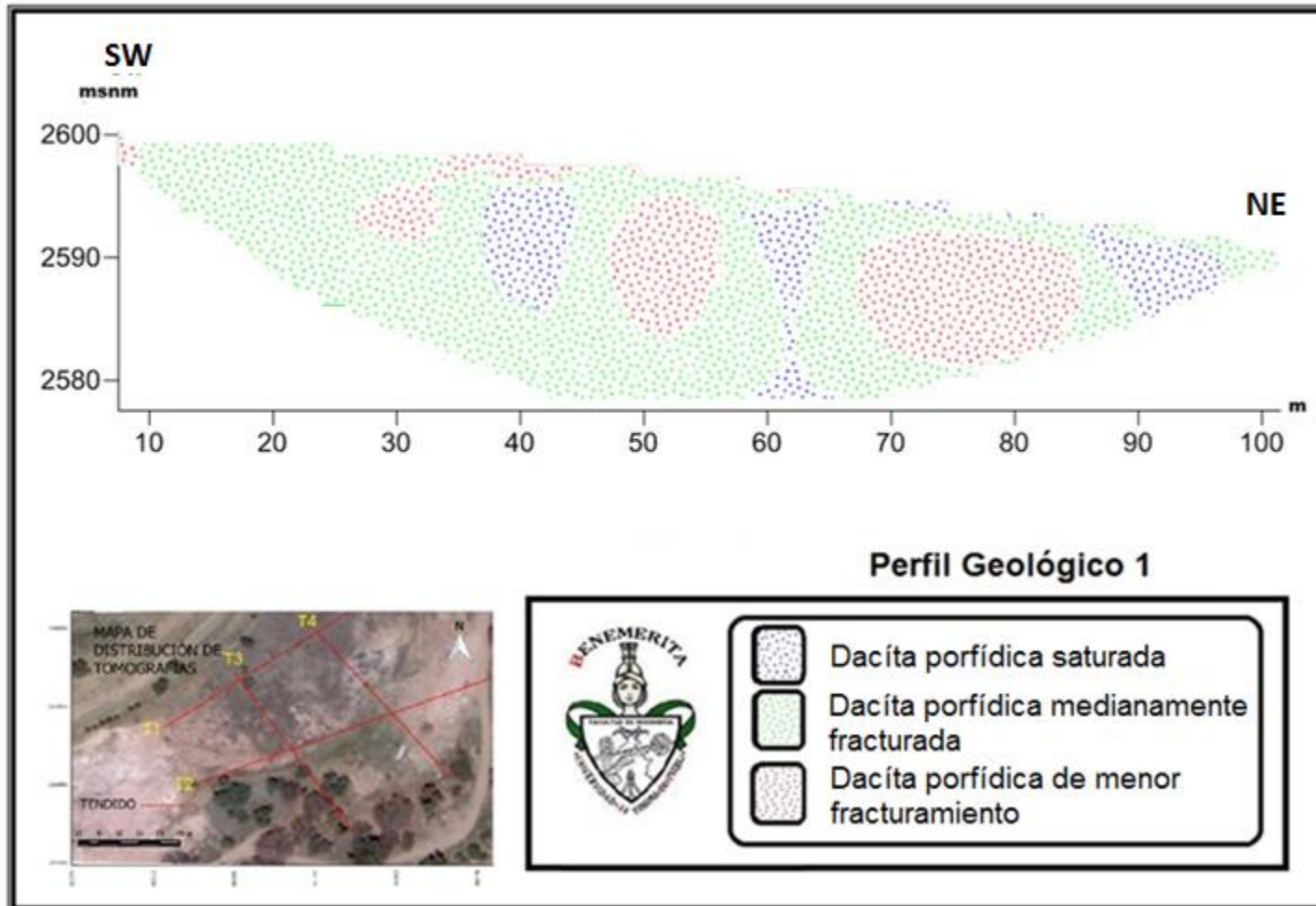


Figura 4.5. Primer perfil geológico

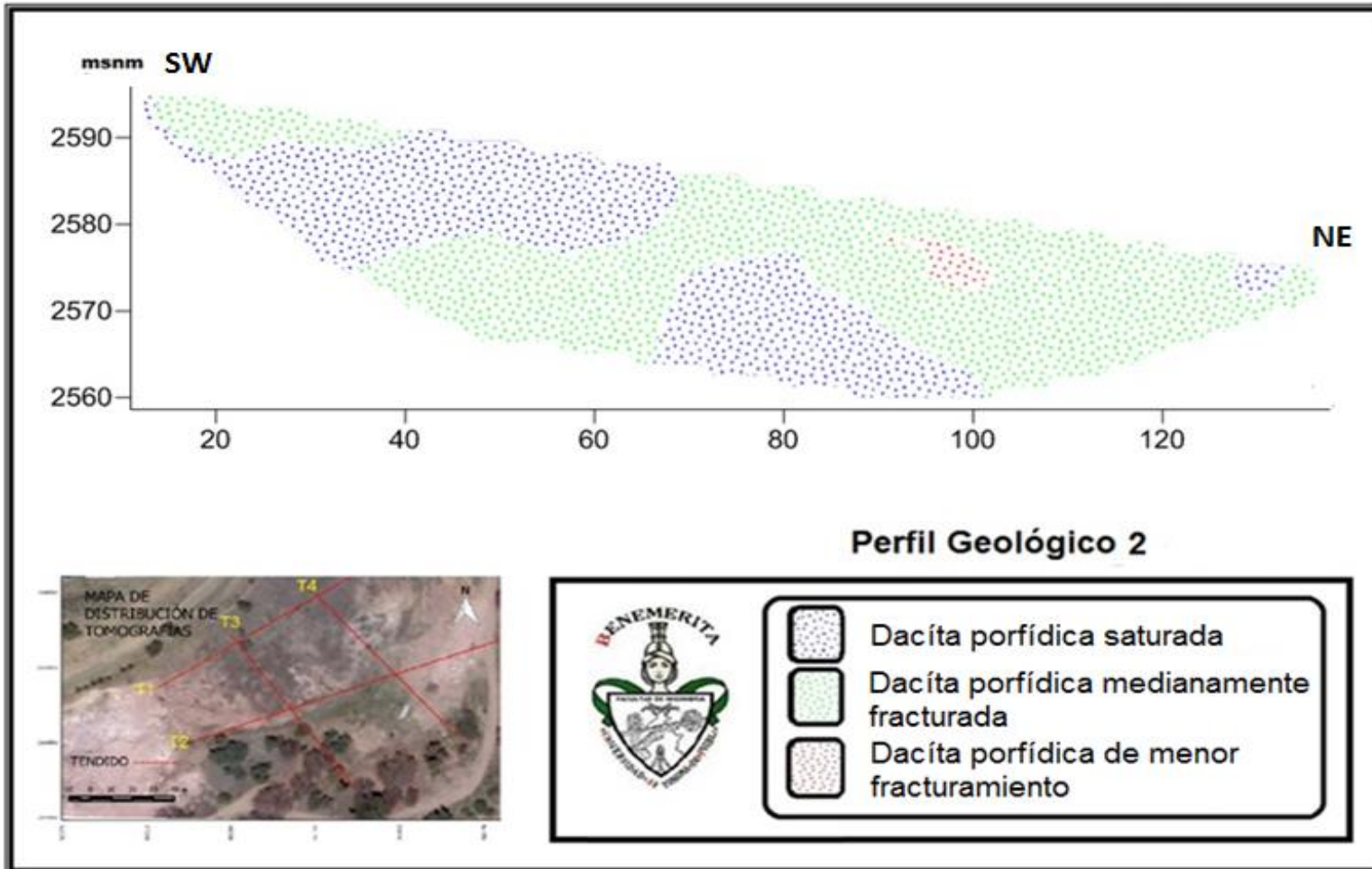


Figura 4.6 Segundo perfil geológico

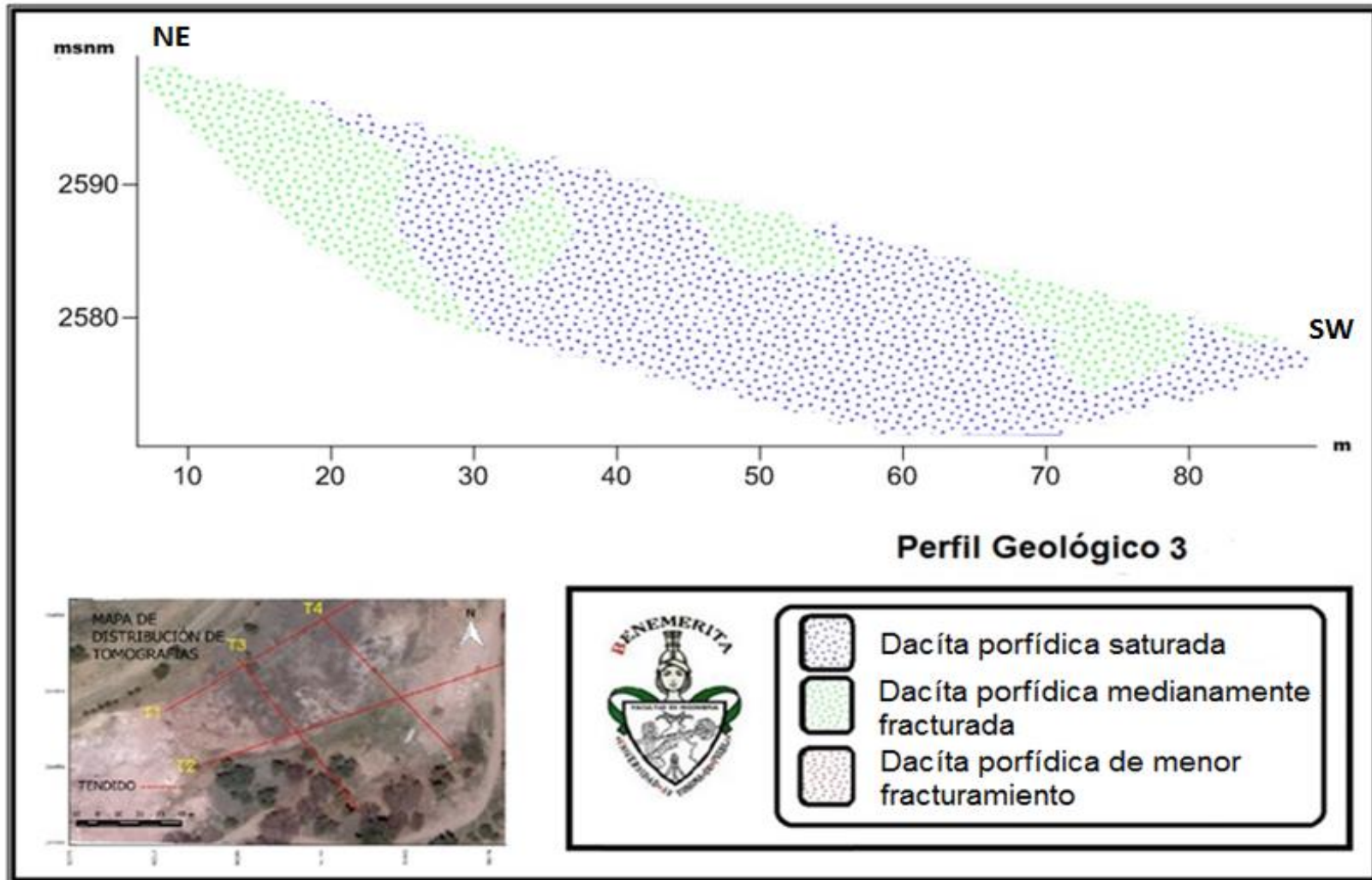


Figura 4.7 Tercer perfil geológico

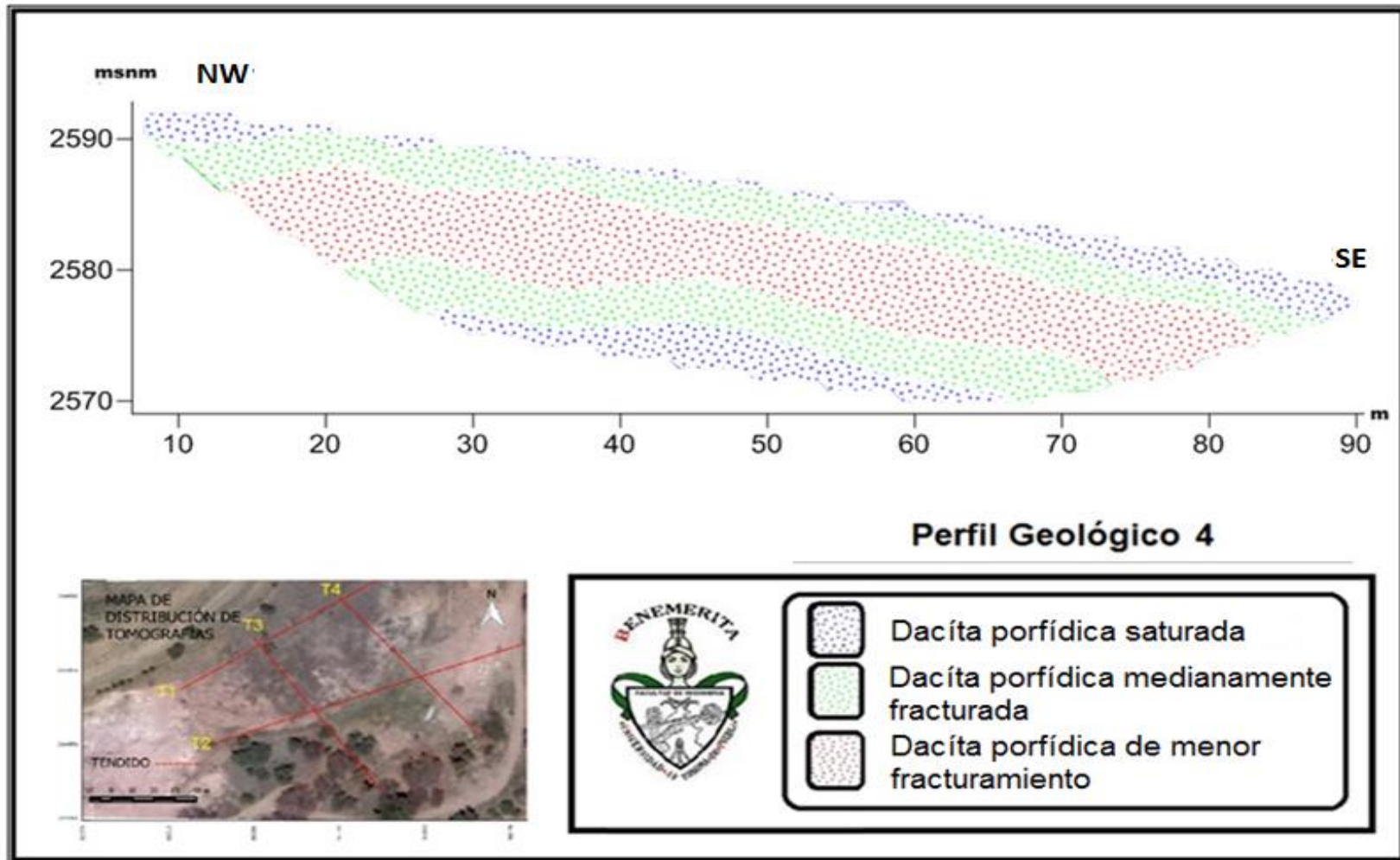


Figura 4.8 Cuarto perfil geológico

4.4.- Calculo de volumen y tonelaje

Para una mejor visualización en 3D, posterior a la caracterización geológica, se realizó una interpolación de las 4 tomografías para obtener un cubo de resistividades y con base en ello obtener un volumen del material a partir del rango de resistividades propuesto en la sección geológica Figura 4.9.

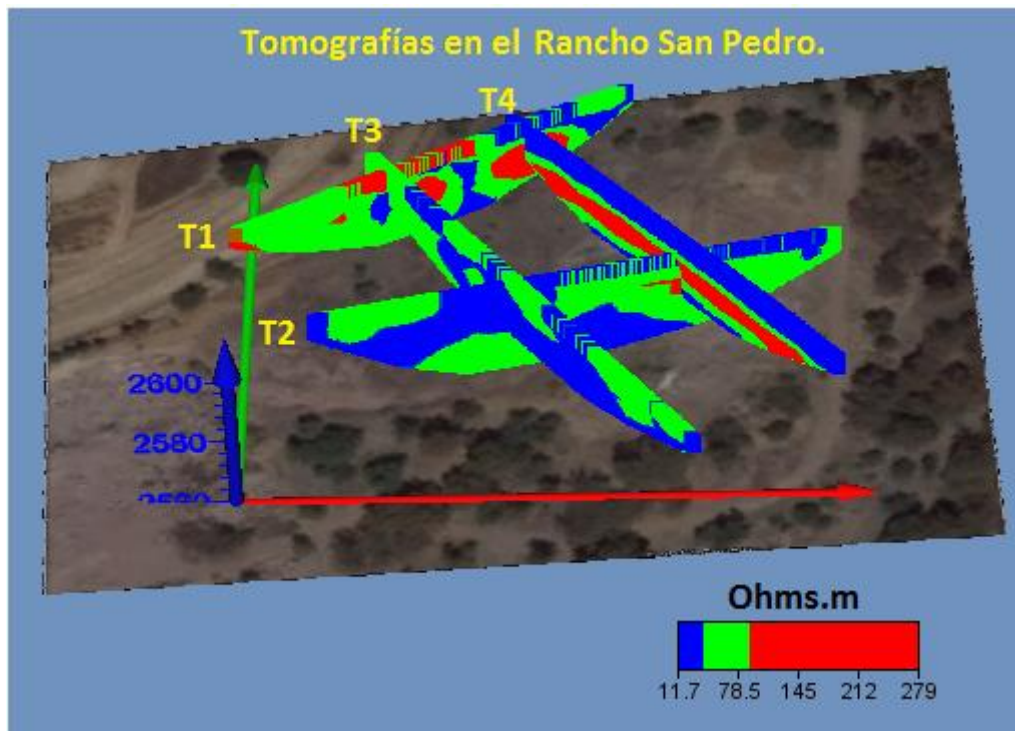


Figura 4.9 Se muestra las 4 tomografías en 3D con imagen de fondo del sitio donde se llevó a cabo la toma de datos.

Fue necesario generar una base de datos donde se involucraran los valores de ubicación, resistividad, altura y coordenadas con valores en X y Y de cada tomografía, por otra parte fue necesario restringir las coordenadas del polígono

para ubicar las zona donde mejor se aprecia la unidad 3, la cual es la roca que potencialmente se explotará.

En la siguiente tabla se muestran las coordenadas en X, Y, altura y profundidad; tanto en valores máximos como mínimos Tabla 4.2. Con la finalidad de centrar el cubo, en el área donde tenemos más datos, el cual permitirá calcular los volúmenes de cada unidad m^3 con mayor eficacia. Tabla 4.3.

COORDENADAS	VAL. MINIMO	VAL MAXIMO
NORTE	563345 E.	563480 E.
ESTE	2144277.5 N.	2144375 N.
ALTURA	2558 MSNM	2594 MSNM.

Tabla 4.2 Coordenada X, Y, Z para el cálculo del volumen en Voxler

En la tabla 4.3 se muestra las unidades con los valores de densidad Kg/m^3 , cabe mencionar que estas densidades han sido asignadas en base al grado de fracturamiento de la roca de acuerdo a tablas establecidas de geotecnia para distintos tipos de rocas Vásquez 2005 lo cual permite finalmente calcular las toneladas para cada material representadas por su respectiva unidad las cuales se describirán a continuación.

UNIDAD	VOLUMEN m^3	DENSIDAD Kg/m^3	TONELAJE
UNIDAD 1	236,489.00	2500	591,222.5
UNIDAD 2	200,975.00	2600	522,535
UNIDAD 3	26,290.00	2750	72,297.5

Tabla 4.3 Unidades con valores de volumen, densidad y tonelaje

4.4.1.- Unidad 1

Las rocas dacíticas porfídicas fracturadas, son las rocas más abundantes de acuerdo a la valoración de su volumen. En Voxler, teniendo un volumen total de 236,489 m^3 , con un tonelaje aproximado de 591,222.5 Ton. De acuerdo a la Figura 4.10, se ubica en el centro del sitio de estudio ubicándose expuesta en la zona Sur, Sureste y Centro del área de estudio.



Figura 4.10 Muestra distribución de la unidad 1 en el sitio de estudio

4.4.2.- Unidad 2

Como ya se ha mencionado esta unidad es representativa de rocas dacíticas porfídicas con un grado de fracturamiento medio, cuenta con un volumen aproximado de $200,975.00 \text{ m}^3$, logrando calcular un tonelaje 522,535 Ton. De acuerdo a la Figura 4.11. Su disposición predominante es en la porción Noroeste y Suroeste, donde se encuentran expuestas en superficie por el contrario en la porción noreste y sureste se localizan a una profundidad oscilante entre 1 y 3 m.



Fig.4.11 Muestra distribución de la unidad 2 en el sitio de estudio

4.4.3.- Unidad 3

Las rocas dacíticas porfídicas de menor grado de fracturamiento, comparada con las dos unidades previas, cuentan con un volumen aproximado de $26,290 \text{ m}^3$ y se ha calculado un tonelaje de aproximadamente 72,297 toneladas, esta unidad es la de menor abundancia dentro de la superficie estudiada, localizándose con mayor afluencia en la porción Este, siendo congruente con la tomografía 4, la cual es donde la presencia de esta unidad fue mayor a una profundidad media de 3 y 5 m, no se deben descartar algunas anomalías relacionadas a este tipo de roca en la porción Norte siendo estas de menor tamaño a la ya mencionada Figura 4.12.

Unidad 3 en el Rancho San Pedro.

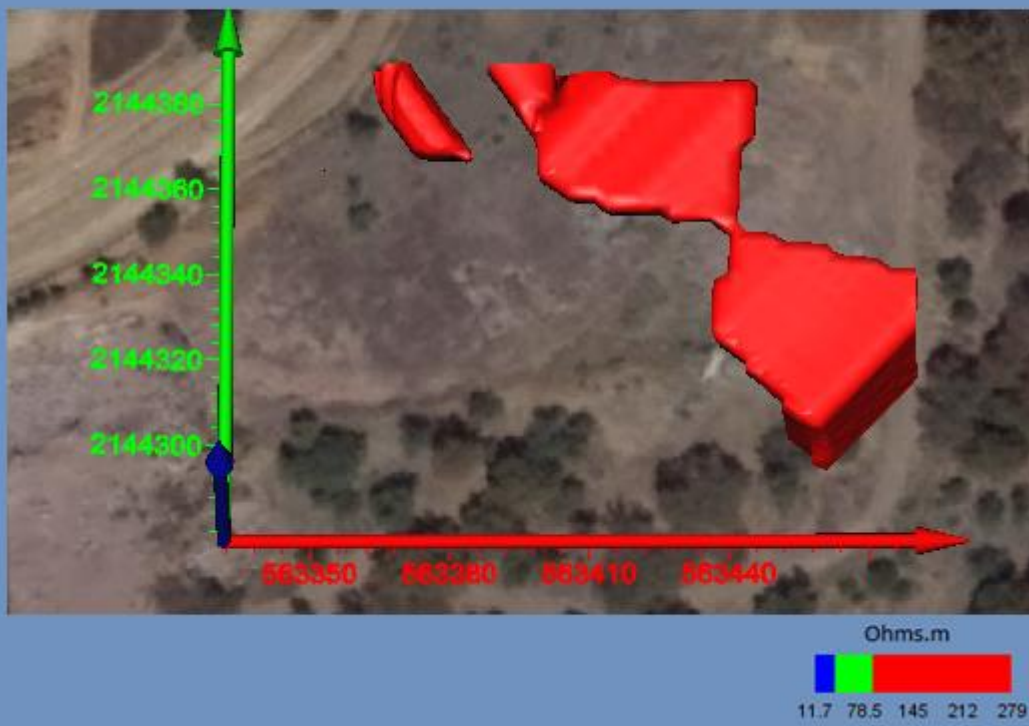


Figura 4.12 Muestra distribución de la unidad 3 en el sitio de estudio

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1.- Conclusiones

Con base en el análisis de cuatro Tomografías Eléctrica de Resistividad, en la zona de la cantera donde se pretende su ampliación, se observaron resistividades bajas debido a presencia de agua intersticial a lo largo de las tomografías realizadas, llegando a una profundidad promedio de 18 m. Se logró determinar la existencia de tres unidades, todas ellas correspondiente al mismo tipo de roca dacita porfídica, pero con diferente grado de fracturamiento, así mismo fue posible determinar la distribución de las 3 unidades halladas, donde la unidad 1 y 2 son las más abundantes, correspondiendo para la primera unidad a roca dacítica porfídica con presencia de agua intersticial producida por una permeabilidad secundaria. Para la unidad 2, la roca corresponde a dacita porfídica parcialmente fracturada, por último la unidad 3 corresponde a dacita porfídica más sana.

La unidad 1 es la roca con mayor presencia con un volumen $236,489 \text{ m}^3$ y un tonelaje aproximado $591,222 \text{ Ton}$ esta roca se encuentra ubicada mayoritariamente en la parte centro, Sur y Sureste donde se encuentra expuesta en superficie.

La unidad 2, esta roca se encuentra expuesta en la zona Noroeste y Sureste. En lado opuesto al Noreste y Sureste se localizan a una profundidad entre 1 y 3 m. Dicha roca cuenta con un volumen total de $200,975 \text{ m}^3$ y un tonelaje aproximado de $522,535 \text{ Ton}$.

La unidad 3 es la roca menos abundante con un volumen de $26,290.00 \text{ m}^3$ y un tonelaje aproximado de $72,297.5 \text{ Ton}$, esta unidad se encuentra concentrada en la porción Este de la zona de estudio, como referencia, a la altura de la tomografía 4, a una profundidad media de 5 m y un espesor de esta unidad de 6-8 m y

ensanchando a los costados de la tomografía 4 aparentemente siguiendo hacia el sur de la zona de estudio.

5.2.- Recomendaciones

El estudio se encuentra limitado al número de tomografías llevadas a cabo y en especial a la profundidad de penetración sin comprometer la apreciación horizontal para el arreglo electródico implementado. Por lo tanto, resulta recomendable complementar los análisis de las zonas resistivas obtenidas con un mayor número de tomografías y estudios a mayor profundidad sugiriéndose Sondeos Eléctricos Verticales; en especial hacia la zona sur y este donde se ha detectado la presencia de la roca con mayor resistividad.

Para estudios relacionados a soporte de carga en la roca, se recomienda extraer muestras de la roca representativa de cada una de las tres unidades involucradas por medio de Sondeos de Penetración Estándar esto con el propósito de cuantificar su relación de esfuerzo deformación.

Anexo 1: Cubo de resistividad para cálculo de volumen

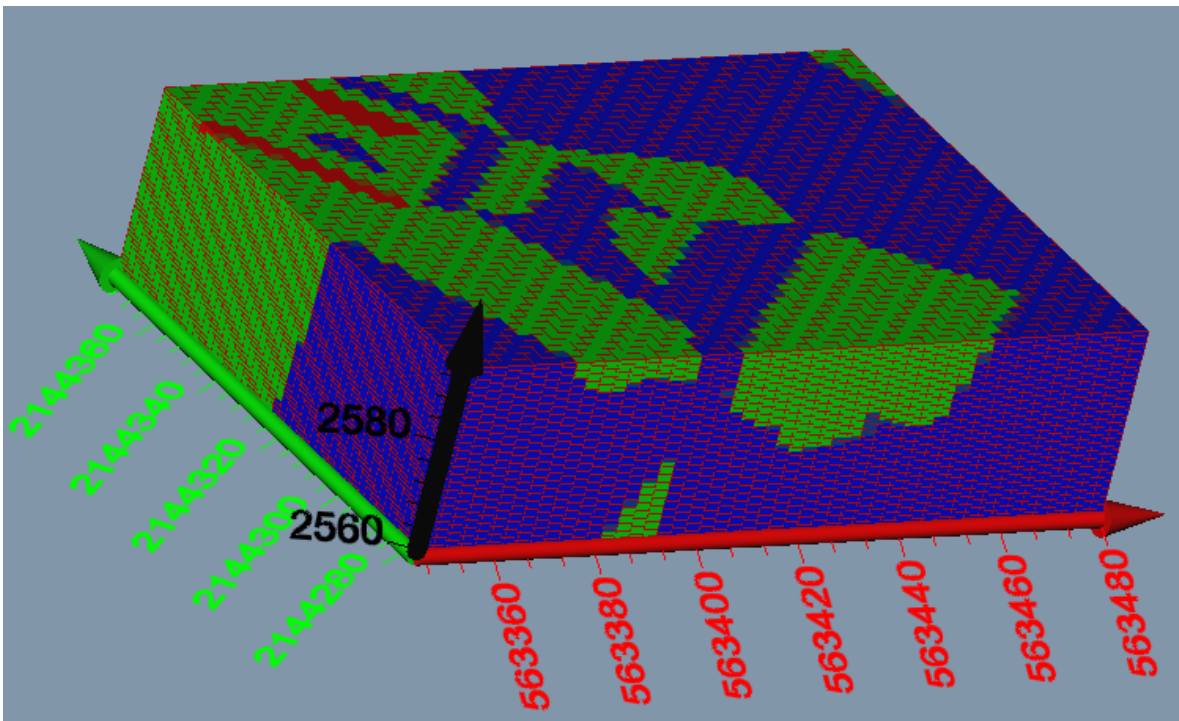


Figura 1.- Cubo obtenido en el Software Voxler para calcular el volumen de las tres unidades geológicas.

Anexo 2: Memoria fotográfica



Figura 2.- Cambio de electrodos de potencial previo a la inyección de corriente y toma de la resistividad.



Figura 3.- Sitio donde se colocó el resistímetro, para la toma de datos en la tomografía
2



Figura 4.- Programación del Resistímetro y planificación previa a la toma de datos en la tomografía 3



Figura 5.- Cambio de sitio del equipo para la toma de datos en la tomografía 4

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, I. R. (2012). Geofísica Aplicada a la Ingeniería Civil. Lima, Perú.:
GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING.

Barrientos, E. A. (2015). Tomografía Eléctrica Resistiva 3D en la Caracterización del Subsuelo Bajo Estructuras Civiles. Tesis. México: UNAM.

FERRÁS, A. J. (2011). Geoelectricidad. la Habana, Cuba: PROGRAMA DE FORMACIÓN IBEROAMERICANO EN MATERIA DE AGUAS, Ciudad de la Habana, Cuba.

Figuerola, J. C. (1973). Tratado de Geofísica Aplicada. Madrid: IGME.

GEOTOMO SOFTWARE (2003). Manual RES2DINV 3. Malaysia:

Golden Software, Inc. (2012).Voxler 3 Full User's Guide. Colorado:

INEGI (2009).Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, Tlaxcala. Clave Geoestadística 29015:.

Lara, R. Z. (2012). Detección de Zonas de Riesgo en la Ciudad de Guatemala. Tesis. México: UNAM.

Loke, D. M. (2001). Tutorial: 2-d and 3-d electrical imaging surveys. copyright (1996-2001).

Manual de Usuario Quantum Gis v.1.6.0. (2010). Obtenido de QUANTUM GIS:
<http://www.qgis.org>

Martínez-López, J., Rey, J., Sandoval, S., & Rodríguez, M. (2007). La tomografía eléctrica: una herramienta para la detección de huecos mineros. Madrid: GEOGACETA.

Mejía, F. H., & Vega Vega, P. A. (2009). Aplicación de métodos eléctricos de prospección geofísica. CIER.

Orellana, E. (1972). Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. Madrid: PARANINFO.

Patzelt, A., Kottman, A., & Waldport, M. (2007). Prospección geoeléctrica en la ciudad colonial de Panamá Viejo, técnicas, mediciones y primeros resultados de excavaciones. Panamá Viejo: Canto Rodado.

Prospección Eléctrica en Corriente Continua. (2009). Área de Geofísica Aplicada (IAG, UGR).

Ramón Márquez, V. M., García Amador, B. I., & Soriano Garibo, I. (2009). Cuantificación de arenas feldespáticas por el método de sondeos eléctricos verticales en Atexca, Zacatlán, Puebla. Geos.

Ramos, E. L. (2008). Geología General y de México. México: Trillas.

Román, J. S. (2010). Prospección Geofísica: Sondeos Eléctricos Verticales. España: Universidad de Salamanca.

Scintrex (2001). Manual de Operaciones, SARIS. Canadá:

Servicio Geológico Mexicano. (2015). Geofísica: Prospección Geoeléctrica. México

Vásquez, J. C. (2005). Características de las rocas. En J. C. Vásquez, Geotecnia. Loja Ecuador: Universidad Técnica Particular de Loja.

WIDE WORLD. (2017). Obtenido de PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: <http://www.wideworld.es>

Wiley, J. (2002). Field Geophysics. Chippenham: WILEY.

Zepeda, G. G. (2013). TESIS: PROPUESTA DE UN MAPA DE SUCEPTIBILIDAD DE SUELO AL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA PARA LA JUNTA AUXILIAR DE LA LIBERTAD, PUEBLA. Puebla: BUAP.