

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental

TRABAJO DE TITULACIÓN

Título del proyecto

MODELAMIENTO GEOFÍSICO TRIDIMENSIONAL DEL SISTEMA DE BOMBEO DE
LLIO, EP EMAPAR

Autor:

Mayorga López Marco Sebastián

Tutor:

PhD. Benito Guillermo Mendoza Trujillo

Riobamba – Ecuador

Año 2020

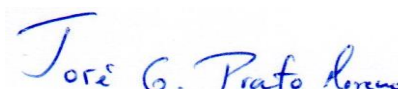
CERTIFICACIÓN DEL TRIBUNAL.

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación del título: "MODELAMIENTO GEOFÍSICO TRIDIMENSIONAL DEL SISTEMA DE BOMBEO DE LLIO, EP EMAPAR", presentado por: Mayorga López Marco Sebastián y dirigido por: PhD. Benito Guillermo Mendoza Trujillo.

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación, se constató el cumplimiento de las observaciones realizadas y se remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Por constancia de lo expuesto firman:

PhD. Jose Prato



Presidente del tribunal

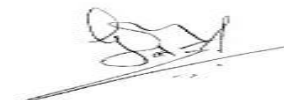
.....
Firma

PhD. Benito Guillermo Mendoza Trujillo
Tutor del Proyecto




.....
Firma

MsC. Patricio Santillán
Miembro del Tribunal



.....
Firma

MsC. María Fernanda Rivera
Miembro del Tribunal

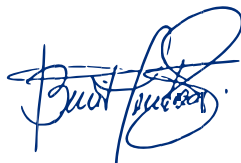


.....
Firma

DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA

Por la presente, certifico que el actual trabajo de investigación previo a la obtención del título de INGENIERO AMBIENTAL, elaborado por el señor Marco Sebastián Mayorga López con el tema: “MODELAMIENTO GEOFÍSICO TRIDIMENSIONAL DEL SISTEMA DE BOMBEO DE LLIO, EP EMAPAR”, el mismo que fue analizado y supervisado bajo mi asesoramiento permanente en calidad de Tutor y Guía, por lo que se encuentra apto para ser presentado y defendido.

Es todo lo que se puede informar en honor a la verdad.



.....
PhD. Benito Guillermo Mendoza Trujillo.

C.I: 060301386-3

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Yo, Marco Sebastián Mayorga López con cédula de identidad No.180435616-8; hago referencia como autor del presente trabajo de investigación, titulado: “MODELAMIENTO GEOFÍSICO TRIDIMENSIONAL DEL SISTEMA DE BOMBEO DE LLIO, EP EMAPAR”, dirigida por el tutor del proyecto, PhD. Benito Guillermo Mendoza Trujillo.

Manifiesto mi responsabilidad y la originalidad en la conceptualización de ideas, interpretación de resultados, y sustento de autores que han sido debidamente referenciados en la presente investigación.



.....
Marco Sebastián Mayorga López

C.I: 180435616-8

AGRADECIMIENTO

A Dios por ayudarme y guiarme en cada momento de mi vida por enseñarme a ser una gran persona y fiel amigo que nunca abandona. A mi familia por ser mi más grande inspiración, motivación y consejeros que fueron capaces de ayudarme a llegar lejos. A la Universidad Nacional de Chimborazo por recibirme con los brazos abiertos, a la Facultad de Ingeniería y Carrera de Ingeniería Ambiental por darme todo lo necesario para mi formación profesional y darme una serie de experiencia que quedaran marcados por el resto de mi vida; al Dr. Benito Mendoza quien con su amistad, compañerismo, motivación y orientación profesional ha sabido guiarme durante todo el trabajo de investigación y todos mis maestros en general por brindar sus conocimientos, dedicación y compromiso, todas sus enseñanzas me servirán para mi vida como profesional.

DEDICATORIA

A mis padres Cecilia Elizabeth López Valencia y Marco Marcelo Mayorga Mayorga, por ser mi mayor motivación para seguir adelante, por todo el cariño y sus enseñanzas que me brindan día a día.

A mis hermanos Leonardo, Juan y María José, que me han brindado todo su cariño y apoyo incondicional.

A mis sobrinos Diego, Juan, Samuel, Evan, Emilia, Micaela y Janice, que me enseñaron a mejorar día a día como persona.

Y a Dios, por dejarme vivir esta bella experiencia a lado de todos mis seres queridos.

SIGLAS Y ABREVIATURAS UTILIZADAS

- SEV: Sondeo Eléctrico Vertical.
- SIG: Sistema de Información Geográfica.
- OMt: Formación Yaruquies (Terciario).
- PR & PR': Formación Riobamba (Pleistoceno).
- PCH: Sedimentos Río Chambo (Pleistoceno).
- PcEa: Formación Apagua (Paleoceno – Eoceno).
- Ohm*m: Ohmio por metro.
- IDW: Inverse distance weighting (Ponderación de distancia Inversa).
- GPS: Sistema de Posicionamiento Global.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DEL TRIBUNAL	II
DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA	III
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
DEDICATORIA	VI
SIGLAS Y ABREVIATURAS UTILIZADAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE FIGURA	XI
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1. Problemática	2
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos.	3
1.3.1. Objetivo General.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
CAPÍTULO II.....	4
2 MARCO TEÓRICO	4

2.1.	Resistividad eléctrica de los suelos.	4
2.1.1.	Medición de la Resistividad del suelo.....	5
2.2.	Método Geofísico.....	5
2.3.	Tomografía Eléctrica.....	6
2.4.	Sondeo eléctrico vertical	6
2.4.1.	Arreglos Geométricos	6
2.4.1.1.	Arreglo Wenner.	7
2.4.1.2.	Arreglo Schlumberger.....	7
2.4.1.3.	Arreglo Dipolo-dipolo.....	7
2.4.1.4.	Arreglo polo-dipolo.	8
2.5.	Equipo Requerido	8
2.6.	Estratigrafía.	9
2.6.1.	Estrato.	9
2.7.	Factores que influyen en la Resistividad.....	10
2.7.1.	Naturaleza del terreno.	10
2.7.2.	Humedad.	10
2.7.3.	Salinidad.....	10
2.7.4.	Temperatura.....	11
2.7.5.	Estratigrafía del terreno.....	11
2.7.6.	Variaciones estacionales.	11
2.7.7.	Compactación del terreno.....	11

2.8.	Software.....	11
2.8.1.	RES2DINV.....	11
2.8.2.	Voxler 3-D.....	12
CAPÍTULO III.....		13
3	METODOLOGÍA	13
3.1.	Tipo de Estudio.	13
3.2.	Caracterización de la Zona de Estudio.....	13
3.3.	Definición de los Puntos de Monitoreo.....	13
3.4.	Configuración del equipo en campo y adquisición de datos.	13
3.5.	Procesamiento de Datos.	14
CAPÍTULO IV		15
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
4.1.	Caracterización de la zona de estudio.....	15
4.1.1.	Descripción geológica del acuífero.....	15
4.1.2.	Hidrogeología del acuífero.....	16
4.2.	Zona de Estudio.	17
4.3.	El estudio de las tomografías realizadas en Llio se muestra a continuación:.....	19
4.4.	Reconstrucción Estratigráfica en 3-D.	24
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	26
5.1.	Conclusiones.....	26
5.2.	Recomendaciones	26

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	27
7. APÉNDICES O ANEXOS	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resistividad de materiales geológicos de algunos tipos de agua.	4
Tabla 2. Coordenadas UTM de los pozos (punto central de las tomografías).....	18

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. Arreglo Wenner.	7
Figura 2. Arreglo Schlumberger.	7
Figura 3. Arreglo Dipolo-dipolo.....	7
Figura 4. Arreglo polo-dipolo.....	8
Figura 5. Equipos requeridos.....	9
Figura 6. Estratos del Subsuelo.	10
Figura 7. Eliminación de Datos Incorrectos.	12
Figura 8. Mapa de Ubicación del acuífero del río Chambo.	15
Figura 9. Descripción geológica del acuífero del río Chambo.	16
Figura 10. Mapa Geológico de la subcuenca del rio Chambo y sección Geológica del acuífero del Chambo.	17
Figura 11. Mapa de identificación de puntos de monitoreo.	18
Figura 12. a) Tomografía Eléctrica Pozo 1, b) Estratigrafía pozo 1.....	19
Figura 13. a) Tomografía Eléctrica Pozo 2, b) Estratigrafía pozo 2.....	20
Figura 14. a) Tomografía Eléctrica Pozo 3, b) Estratigrafía pozo 3.....	20
Figura 15. a) Tomografía Eléctrica Pozo 4, b) Estratigrafía pozo 4.....	21

Figura 16. a) Tomografía Eléctrica Pozo 5, b) Estratigrafía pozo 5.....	22
Figura 17. a) Tomografía Eléctrica Pozo 6, b) Estratigrafía pozo 6.....	22
Figura 18. a) Tomografía Eléctrica Pozo 7, b) Estratigrafía pozo 7.....	23
Figura 19. Tomografía Eléctrica sección de la vía, dentro del campo de bombeo.....	23
Figura 20. Tomografía Eléctrica Pozos EMAPAR (Tenelema, 2017).	24
Figura 21. Reconstrucción 3D a) Zona completa de estudio b) Corte zona de estudio.	25

RESUMEN

Los pozos del Sistema de Bombeo de Llio se encuentra ubicado en el Cantón Guano de la parroquia San Andrés, de este sistema se conoce poco más que su caudal de producción, este desconocimiento dificulta la toma de decisiones para el manejo o un mejor aprovechamiento, control y protección del acuífero. En este sentido, no se cuenta con estudios estratigráficos que permitan conocer los materiales litológicos que conforman el subsuelo de donde se obtiene el agua mediante los pozos. Por tanto, para conocer la estructura del suelo se utiliza el método geofísico de tomografías eléctricas de resistividad, ya que este no es un método invasivo, cuyos resultados son contrastados con las estratigrafías tomadas de la construcción de los pozos para obtener la interpretación adecuada de la estratigrafía. Es así que, los resultados obtenidos en este trabajo son imágenes de resistividades eléctricas en dos dimensiones (2D) y reconstrucción estratigráfica en tres dimensiones (3D), cuyos datos muestran que el sistema de bombeo se encuentra en una zona del acuífero con gran capacidad permeable en la parte más superficial (hasta los 15 metros de profundidad), la mayor parte de esta estratigrafía está compuesta por arenas, grabas y arcillas (cangagua); de igual manera, se muestra una zona semipermeable (entre los 15 y 50 metros de profundidad) aquí se muestran grabas gruesas y granitos más pequeños y por último se encontró la presencia de granitos y lavas como incrustaciones en profundidades entre los 10 y 60 metros.

PALABRAS CLAVES

Geofísica, tomografía y resistividad eléctrica, reconstrucción estratigráfica.

ABSTRACT

The wells of the Llio Pumping System are in the Guano Canton of the San Andrés parish. People know about this production flow only, the lack of information hinders decision making for accurate management, better use, control, and protection of the aquifer. There are no stratigraphic studies that reveal the lithological materials that compone the subsoil from which the water is obtained through the wells. Therefore, to know the soil structure, the geophysical method of electrical resistivity tomography is used, and it is not an invasive method; the results are contrasted with the stratigraphy taken from the construction of the wells to obtain the adequate interpretation of the stratigraphy. Thus, the results obtained in this factic research are images of electrical resistivities in two dimensions (2D), and stratigraphic reconstruction in three dimensions (3D). The data shown reveals that the pumping system is located in an area with significant permeable capacity. The superficial part (up to 15 meters deep), has a stratigraphy mostly composed of sand, gravels, and clay (cangahua).

Alike, a semi-permeable zone, is (between 15 and 50 meters deep) composed of thick gravels and smaller granites. Finally, the granites and lavas as incrustations were found in depths of between 10 and 60 meters.

KEYWORDS

Geophysics, tomography and electrical resistivity, stratigraphic reconstruction.



Reviewed by: Marcela González R.
English Professor

INTRODUCCIÓN

El mundo se encuentra en una crisis ambiental que va en aumento, afectando los recursos naturales y la supervivencia de los seres humanos, además el agua natural incluyendo los pozos, son susceptibles a la contaminación provocada por el hombre tras sus malas decisiones, por lo que se buscan medidas correctivas que puedan ayudar a un mejor aprovechamiento de este recurso (ONU, 2019).

En los últimos años el planeta se ha visto afectado por las actividades antrópicas de las personas y más cuando hablamos del aumento de la demanda en el uso del agua, ya que es un suministro importante para poder satisfacer las necesidades de las mismas, del cual se estima que en un tiempo determinado este recurso natural va a escasear porque el hombre busca con ansias tener un desarrollo agrario, industrial y turístico. El subsuelo es el lugar en donde se representa la mayor cantidad de agua subterránea en el planeta además de estar conectada con el Ciclo Hidrológico; el agua que cae se recarga en el suelo y circula en el subsuelo hasta llegar a los manantiales o ríos para alimentar a cada uno estos (Vera, 2014).

En el Ecuador, el agua subterránea es un recurso valioso que se suministra a un grupo determinado de personas o sirve para el riego de cultivos; incidiendo en el bienestar económico y el desarrollo positivo de los ecosistemas. Hace años atrás se han enfocado más en el desarrollo de las aguas superficiales, aplicando estos paradigmas de manejo erróneamente en la gestión del agua subterránea. Por esto, en la actualidad se ha dado énfasis en el desarrollo de una serie de investigaciones sobre los acuíferos explotados para mejorar el manejo sostenible de los mismos. Según el Inamhi, en el país la demanda por el uso del agua potable aumento considerablemente en los últimos 20 años por el aumento demográfico y que solamente muy pocos ciudadanos cuentan con este suministro debido a su escases, además existen estadísticas de aproximadamente 5000 puntos de agua, pozos excavados y perforados en el país. También algunos cantones como: Tulcan, Ambato, Riobamba, Guaranda, Milagro y Esmeraldas han realizado perforaciones en pozos para abastecer a los ciudadanos de agua potable (Burbano, Becerra, & Efrén Pasquel, 2015).

El cantón Riobamba cuenta con dos acuíferos de aguas subterráneas como: los pozos de Llio y San Pablo que está afuera del límite de la ciudad. Los pozos del Sistema de Bombeo de Llio está ubicado en el Cantón Guano de la Provincia de Chimborazo cuenta con 7 pozos perforados los cuales estos pertenecen a EMAPAR y abastece de agua potable a la ciudad de Riobamba con un caudal aproximado de 250 L*s (Sendo, 2013).

CAPÍTULO I

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.Problemática

En nuestro país así como en el mundo, la sociedad se ha enfocado en utilizar las aguas subterráneas como fuentes de abastecimiento y desarrollo. Los ciudadanos se han centralizado en un lugar donde los recursos hídricos son factibles para su uso cotidiano. (Burbano, Becerra, & Efrén Pasquel, 2015).

El crecimiento demográfico, la urbanización, la industrialización, el aumento de producción y el consumo exigen una mayor demanda del recurso agua que se va agotando, provocando serias problemáticas ambientales y económicas a futuro. (UNESCO, 2015)

Los acuíferos son formaciones naturales compuestas por roca, arena o sedimento permeable; donde almacena o conduce agua subterránea a través de pozos o manantiales. El agua subterránea se encuentra en el subsuelo y es muy importante porque cumple una función vital en el ciclo hidrológico. (Ordoñez, 2011)

El objetivo del estudio es determinar las características del subsuelo mediante tomografías eléctricas de resistividad, que serán representadas en la reconstrucción en 2-D y 3-D para determinar qué materiales litológicos conforman el subsuelo y estimar si la zona es permeable o semipermeable.

Basándonos en estos argumentos, se precisa un estudio de la estratigrafía de los pozos subterráneos del sistema de bombeo de Llio mediante técnicas no invasivas y no destructivas como la tomografía eléctrica de resistividad, en conjunto a la aplicación de técnicas geoestadísticas para el tratamiento de los datos. La interpretación de estas técnicas permitirá la reconstrucción de la realidad litológica y la determinación de las características internas del subsuelo para una correcta interpretación de las unidades estratigráficas.

1.2.Justificación

El Sistema de Bombeo de Llio se caracteriza por el gran caudal de producción, sin embargo estos no han sido aprovechados ya que cuentan con escasos estudios hidrológicos o hidrogeológicos que dificultan la toma de decisiones por parte de los gestores del agua para potencializar el uso del acuífero.

En base a lo descrito, la presente investigación busca estudiar el acuífero del Sistema de Bombeo de Llio mediante el uso de dos programas para la reconstrucción de la estratigrafía

del sistema con el software Res 2-D, que permite verificar el nivel freático del acuífero y el software Voxler 3-D para la reconstrucción de la zona de estudio.

Los resultados obtenidos en este estudio permitirán comprender la estructura hidrogeológica del sector, mediante un modelo en 3-D que interrelacione las características estratigráficas conformadas en el acuífero de Llio.

Se debe recalcar que este acuífero actualmente es explotado, sin embargo, se podría implementar estrategias o una evaluación de las reservas y conocimientos de los mecanismos de recarga de los principales acuíferos conformados en el país (Burbano, Becerra, & Efrén Pasquel, 2015). Para brindar una gestión y un uso adecuado de estos, así beneficiando a todos los ciudadanos tanto desde el punto de vista social, ambiental y económico por ejemplo: en épocas de sequía se podría utilizar este suministro para que no se vea afectado la producción agrícola favoreciendo a la economía; adicional para que sea utilizada para el suelo como riego con el fin de que no se deteriore; y también se podría dar acceso a estas fuentes a aquellas personas que no poseen para el abastecimiento doméstico.

1.3.Objetivos.

1.3.1. Objetivo General.

Determinar las características estratigráficas en 3D del sistema de bombeo de Llio, que permitan conocer la distribución espacial de las estructuras hidrogeológicas en esta zona.

1.3.2. Objetivos Específicos.

- Estudiar los sondeos eléctricos verticales y la estratigrafía de los pozos asentados en el sistema de bombeo de Llio.
- Realizar tomografías eléctricas de resistividad, para determinar las características estratigráficas de la zona de estudio.
- Reconstruir la estratigrafía de Llio mediante un modelo en 3D.
- Correlacionar e Interpretar la estratigrafía del modelo 3D de la zona con los datos de los pozos.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1. Resistividad eléctrica de los suelos.

La resistividad eléctrica del suelo se lo define como el nivel de resistencia que puede presentar un metro cubico de terreno, por lo que resulta de mucho interés poder determinar si el terreno es óptimo para realizar las tomografías eléctricas (Villa, 2010). También es el que tiene la capacidad de conducir la electricidad dando resistividades diferentes de acuerdo al tipo de terreno, ya que el factor más importante es la resistividad del suelo mismo y no del electrodo.

La resistividad de las rocas y sedimentos secos es elevada, por lo que actúan como semiconductores, o conductores de baja capacidad. Este comportamiento cambia cuando las fisuras o los poros están ocupados por agua, generando una disminución de la resistividad lo que permitirá obtener una mayor conducción de electricidad. Además del grado de saturación incide en la resistividad del medio, el contenido salino del agua; a mayor salinidad, menor resistividad y viceversa (tabla 1).

Tabla 1. Resistividad de materiales geológicos de algunos tipos de agua.

ROCAS O AGUA	RESISTIVIDAD (Ω.m)
Agua de mar	0,2
Agua de acuíferos aluviales	10 – 30
Agua de fuentes	50 – 100
Arenas y gravas secas	1000 – 10000
Arenas y gravas con agua dulce	50 – 500
Arenas y gravas con agua salada	0,5 – 5
Arcillas	0,5 – 5
Margas	2 – 20
ROCAS O AGUA	RESISTIVIDAD (Ω.m)
Calizas	2 – 20
Areniscas arcillosas	50 – 300
Areniscas cuarcitas	300 – 10000

Tobas volcánicas, cineritas	20 – 100
Lavas	300 – 10000
Esquistos grafitosos	0,5 – 5
Esquistos arcillosos o alterados	100 – 300
Esquistos sanos	300 – 3000
Gneis, granito alterados	100 – 1000
Gneis, granitos sanos	1000 – 10000

Fuente: (Bravo, 2012)

En los suelos es necesario que la resistividad y la conductividad eléctrica se encargue de determinar la magnitud en la que puede variar la resistividad con respecto a un geomaterial en campo. En el primer componente muestra los niveles de resistividad por materiales litológicos en donde la arcilla es la más baja con respecto a otros materiales como limos, arenas y gravas. En el segundo componente se explica la variación de la resistividad con respecto a su humedad, la saturación y del contenido de sales de los fluidos intersticiales de los geomateriales (Arias, Ramirez, & Patiño, 2011)

2.1.1. Medición de la Resistividad del suelo

La medición de la resistividad del suelo se aplica para conocer los valores de resistividad del terreno y los tipos de materiales geológicos que se encuentran conformados, ya que al establecer sus valores de resistividad se podrá tomar la decisión si el estudio va ser factible o no (Villa, 2010). Además, para medir la resistividad del terreno se requiere de la instalación de varios equipos específicos como: resistivímetro o unidad central, electrodos, batería de automóvil, cables y conectores.

2.2.Método Geofísico

La geofísica es la ciencia que se encarga del estudio de los fenómenos físicos que ocurren en el planeta detectando anomalías o fallas geológicas en los campos terrestres utilizando equipos o tecnología que permite obtener un beneficio a la humanidad (SGM, 2017).

Existen diversos métodos geofísicos que estudian las propiedades físicas del suelo entre los más utilizados se clasifican como: gravimetría, magnetométrico, eléctrico, sísmico, radiactivo y perfilajes en pozo. Cada uno de estos realiza una exploración diferente como, por ejemplo: gravimetría (densidad), magnetométrico (susceptibilidad magnética), eléctrico (resistividad),

electromagnético (conducción eléctrica), sísmico (velocidad de propagación de ondas sísmicas) (Jaimes, 2011).

La ventaja al utilizar el método geofísico es porque se lo denomina como no invasivo y no destructivo y se pueden realizar amplias investigaciones en campo, ya que se las utiliza para todo tipo de terreno incluso en cerros o montañas (Tenelema, 2017).

2.3. Tomografía Eléctrica

Es una técnica Geofísica donde se obtiene imágenes en dos dimensiones para el estudio del subsuelo, además analiza los materiales en función a su comportamiento eléctrico y como se distribuye en el terreno por su resistividad. Son estudios que se realizan en campo debido a que no provocan ninguna alteración al subsuelo donde los resultados obtenidos serán muy precisos y económicos (Arias, Ramirez, & Patiño, 2011).

La tomografía eléctrica con respecto a la resistividad eléctrica consiste en la inyección de corriente eléctrica mediante un par de electrodos instalados en el terreno generando la reconstrucción de la imagen para apreciar sus resistividades correspondientes ($\text{ohm}\cdot\text{m}$) de acuerdo a los materiales litológicos conformados en el subsuelo (GEOTEM, 2016).

2.4. Sondeo eléctrico vertical

También conocido como SEV o VES es el que permite obtener valores diferentes de resistividad mediante la separación de ambos electrodos de su punto central. El suelo y subsuelo se lo caracteriza por los diferentes tipos de materiales litológicos que lo conforman de acuerdo a su profundidad. Los sondeos eléctricos verticales se encuentran conformados por (A, B) a distancia estimada de 5 metros que van determinando las diferentes profundidades de un terreno. Existen varias configuraciones que son aplicadas dentro de los sondeos eléctricos verticales (Wenner, Schlumberger o Dipolo-Dipolo), la configuración de Schlumberger es una de las más usadas ya que se mueven los electrodos (A, B) (Uvidia, 2015).

2.4.1. Arreglos Geométricos

Los arreglos para el sondeo eléctrico vertical están representados en las siguientes figuras como: Arreglo Wenner, Arreglo Schlumberger, Arreglo Dipolo-dipolo y Arreglo Polo Dipolo. Donde los electrodos (A, B) son considerados activos porque conducen corriente directa hacia el subsuelo, mientras que los electrodos (M, N) son pasivos por que determina la diferencia de potencial (Moreno, 2010).

2.4.1.1. *Arreglo Wenner*. Es donde la distancia se encuentra establecida en cada electrodo como (A, M) se mantiene fijo al igual con los electrodos (N, B) donde sus distancias no varían. Para su respectiva medición, esto se lo aprecia en la (figura 1) (Palacios, 2016).

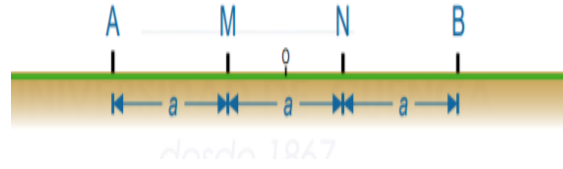


Figura 1. Arreglo Wenner.

Fuente: (Palacios, 2016).

2.4.1.2. *Arreglo Schlumberger*. Los electrodos (A, B) se alejan en donde $2L$ se denomina como la distancia establecida mientras que (M, N) se quedan fijos como en la anterior configuración, pero su distancia es corta con respecto a los electrodos (A, B) esto se lo aprecia en la (figura 2) (Palacios, 2016).

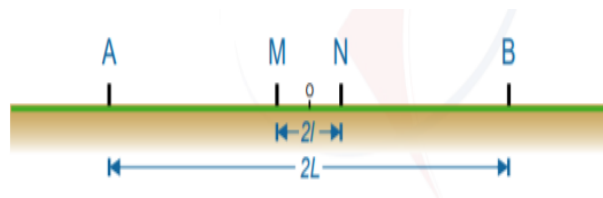


Figura 2. Arreglo Schlumberger.

Fuente: (Palacios, 2016).

2.4.1.3. *Arreglo Dipolo-dipolo*. Palacios (2016) concluyó que el Arreglo Dipolo-dipolo, las corrientes (A, B) se mantienen unidas y fijas como (a) mientras que (B, M) varían (na), finalmente la corriente (M, N) se mantiene fijo (a), como se lo puede apreciar en la (figura 3) (Palacios, 2016).

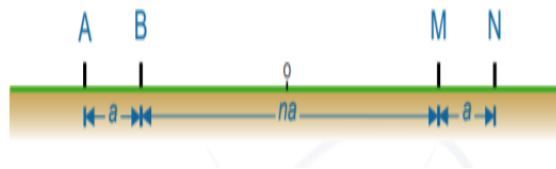


Figura 3. Arreglo Dipolo-dipolo.

Fuente (Palacios, 2016).

2.4.1.4. *Arreglo polo-dipolo*. Los dos electrodos (A, M) sus distancias se mantienen fijas (a), el Electrodo (M, N) su distancia varia (b), con respecto al electrodo (A, M), la distancia entre los electrodos (M, B) y (N, B) tienden a infinito, como se lo puede apreciar en la (figura 4) (Palacios, 2016).

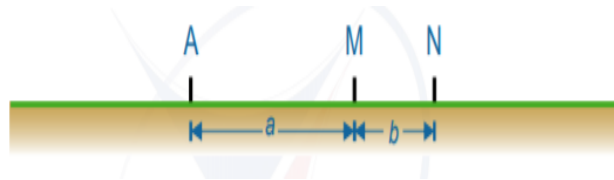


Figura 4. Arreglo polo-dipolo.

Fuente: (Palacios, 2016).

2.5. Equipo Requerido

En la (figura 5) se puede apreciar la clasificación de los equipos requeridos para ser aplicados en campo de las cuales son:

- **Electrodos:** Son barras metálicas fabricadas de acero inoxidable que deben tener un mango para fijar el conector y una pinza para conectar con el cable. El número total de electrodos a utilizar son 48 (Giraldo & Sendoya, 2012).
- **Cables:** Son también conocidos como cables de cobre que posee una longitud de 120 m por cada cable. Estos cables al ser colocadas en el terreno se encargara de conducir la corriente eléctrica desde el equipo hasta los electrodos o a la inversa (Giraldo & Sendoya, 2012).
- **Conectores:** Son cables pequeños con una longitud de 30 cm entre sus extremos se encuentran dos pinzas metálicas con el tamaño suficiente para que se puedan agarrar junto a los electrodos cumpliendo así una conexión firme entre los cables y el equipo (Giraldo & Sendoya, 2012).
- **Unidad central (resistivímetro):** Es el cerebro de todo el equipo la que se encarga de producir la corriente necesaria en el subsuelo para la toma de valores de resistividad, además muestra la magnitud de corriente eléctrica, y la diferencia de potencial medida. (Giraldo & Sendoya, 2012).
- **Batería:** Es la fuente de alimentación de todo el equipo. Esta fuente de alimentación se conecta con la unidad central y se encarga de producir la corriente eléctrica en todo el

sistema. Este equipo debe ser recargable, transportable y fácil de remplazar. (Giraldo & Sendoya, 2012).



Figura 5. Equipos requeridos.

Fuente: Elaboración del Autor

2.6.Estratigrafía.

La estratigrafía es la rama de la Geología que se encarga del estudio e interpretación de cómo se encuentra conformada los estratos de una roca con una finalidad arqueológica. En donde podemos reconocer la antigüedad de las capas del suelo. (S.G.M, 2017)

Uno de los objetivos de la estratigrafía es la identificación de los materiales correspondiente de los materiales litológicos conformados en el subsuelo como su litología, textura, estructuras, propiedades geofísicas y geoquímicas y su contenido fósil. Donde estas propiedades se las denomina como facies (Tenelema, 2017).

2.6.1. Estrato.

Los estratos son rocas sedimentarias que se depositan en un lugar determinado por un periodo de tiempo donde se las aprecia a simple vista porque poseen una forma uniforme, ya que estos sedimentos se forman en las orillas de los ríos, en los fondos marinos o al pie de las montañas. Los estratos más jóvenes se los encuentra en la superficie como los lodos o areniscas siendo estos suaves y blandos que se van acumulando por la sedimentación. Los estratos más viejos se encontraran en el subsuelo como rocas o gravas debido a que estas se endurecen con el tiempo como se encuentra representado en la (figura 6) (Castillo, 2015)

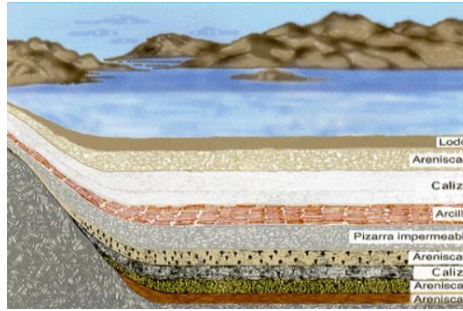


Figura 6. Estratos del Subsuelo.

Fuente: (Castillo, 2015).

2.7. Factores que influyen en la Resistividad.

La resistividad eléctrica del suelo dependerá mucho de siete factores que influyen en la resistividad como: Naturaleza del Terreno, Humedad, Salinidad, Estratigrafía del terreno, Temperatura, Variaciones Estacionales y Compactación del suelo. Estos factores son primordiales para la conducción de electricidad o resistividad del suelo (Martinez & Romero, 2011).

2.7.1. Naturaleza del terreno.

Los suelos que son de grano fino o muy fino poseen muy poca resistividad y son excelentes conductores que los de grano medio, grano grueso o muy grueso. Conforme va aumentando el tamaño de la partícula la resistividad del terreno es más elevada. Por ello la roca y la grava tiene mayor resistividad que la arena y a su vez la arena mayor resistividad que la arcilla (Martinez & Romero, 2011).

2.7.2. Humedad.

La humedad en un terreno es muy importante, ya que de eso depende los valores de resistividad un suelo húmedo es menos resistivo a comparación de otro que no posee agua. En épocas de sequía la resistividad del suelo será elevada por eso se debe añadir agua a los terrenos continuamente para tener mejores valores (Martinez & Romero, 2011).

2.7.3. Salinidad.

El agua disuelve las sales en el terreno convirtiéndolas en moléculas más pequeñas como iones o cationes que serán transportadas como electrones. Los valores de resistividad serán altos si existe concentraciones mínimas de sales o resistividades bajas por mayores concentraciones de sales en el terreno (Martinez & Romero, 2011).

2.7.4. Temperatura.

La temperatura en el terreno varía y más cuando transcurre el día, entonces si la temperatura es baja la resistividad del suelo aumenta por lo que se recomienda realizar estos estudios en horas de la mañana o en la tarde porque la temperatura va ir aumentando a medida que pase el tiempo y su resistividad ira disminuyendo para obtener mejores resultados (Martinez & Romero, 2011).

2.7.5. Estratigrafía del terreno.

El terreno no es uniforme en sus capas. Esto se debe en cómo está conformada la estratigrafía porque tras la colocación de los electrodos y a medida que se siga recorriendo va ir cambiando la textura del suelo mismo, donde los valores de resistividad serán indispensables porque se desconoce los materiales litológicos del subsuelo (Martinez & Romero, 2011).

2.7.6. Variaciones estacionales.

El valor de la resistividad, varía de acuerdo a las diferentes estaciones del año. En tiempos lluviosos es donde se debe aprovechar ya que los valores de resistividad serán bajos, es de gran importancia considerar este factor para obtener buenos resultados (Martinez & Romero, 2011).

2.7.7. Compactación del terreno.

Al colocar los electrodos con el martillo se produce una pequeña vibración en el terreno provocando una separación entre el electrodo y el terreno. Por lo que se recomienda compactar el suelo para que exista un mejor contacto entre el electrodo y el terreno (Martinez & Romero, 2011).

2.8. Software

La interpretación de los datos se utilizó el programa Prosys II de Syscal, que será enviado para el formato RES2DINV; para el tridimensional se debe elegir un programa que será para formato en tres dimensiones. En base a los puntos de colocación el programa podrá determinar los valores semejantes a cada punto de atribución con relación a sus coordenadas (Moreno, 2010).

2.8.1. RES2DINV.

Este software permite realizar un modelo del subsuelo en dos dimensiones de acuerdo a los datos obtenidos. La ventaja de este software es eliminar puntos o datos erróneos debido al mal contacto del electrodo y del suelo mismo pero esta anomalía seguirá presente solo se busca un mejor resultado de acuerdo al modelo que se desea obtener (figura 7) (Moreno, 2010).

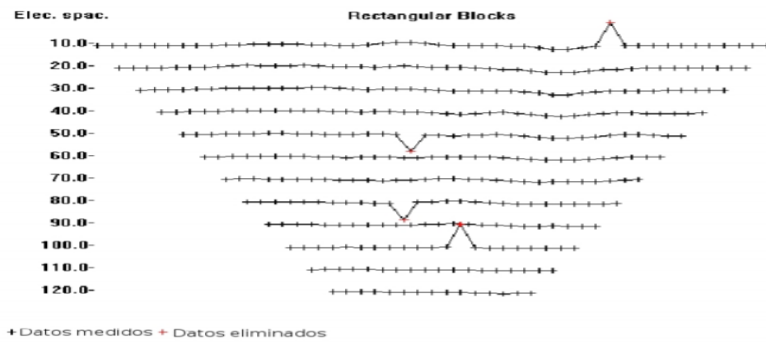


Figura 7. Eliminación de Datos Incorrectos.

Fuente: (GEOTEM, 2016).

2.8.2. Voxler 3-D.

El programa Voxler 3-D se encarga de crear impresionantes modelos tridimensionales a través de los datos obtenidos del software RES2DINV de una forma rápida y personalizada donde tendrá varios tipos de colores que podrán ser modificados de acuerdo al gusto que se quiera apreciar; además nos permitirá verificar la zona con los resultados finalmente obtenidos. Por otra parte, Voxler es ideal para aquellas personas especializadas en realizar estudios detallados del subsuelo (Altonar, 2019).

CAPÍTULO III

3 METODOLOGÍA

El estudio de estratigrafía del subsuelo mediante el método de tomografías eléctricas se las realizó de acuerdo con el procedimiento descrito a continuación:

3.1. Tipo de Estudio.

El trabajo de investigación es experimental y se lo realizó en el sistema de bombeo de Llio que se encuentra ubicado en el Cantón Guano de la parroquia San Andrés para lo cual se lo ha dividido en 2 partes:

- Obtención de imágenes reales en dos dimensiones con el método de interpolación software RES2DINV.
- La reconstrucción en tres dimensiones del sistema de bombeo de Llio por medio del método de interpolación software Voxler 4.

3.2. Caracterización de la Zona de Estudio.

Implica la presentación de las particularidades primordiales del área de investigación como: Ubicación, Limite Referencial, Geología, Hidrología e Hidrogeología. Y estas son estimadas como línea base ambiental y se recopila de estudios ya establecidos en el acuífero (Tenelema, 2017).

3.3. Definición de los Puntos de Monitoreo.

Cada uno de los puntos ubicados se tomará en cuenta lo siguiente: asequibilidad, proximidad de los pozos de agua, condiciones ambientales que sean idóneas. En este trabajo define los puntos de monitoreo mediante el GPS (Sistema de Posicionamiento Global), donde en la (figura 11) se obtiene un mapa de acuerdo a la geología de la zona. (Sendo, 2013)

3.4. Configuración del equipo en campo y adquisición de datos.

Para una tomografía eléctrica en dos dimensiones (2-D), comienza con la colocación de los electrodos de una forma equiespaciada en línea recta que se defina el inicio y el final del perfil para no tener problemas en la fase de interpretación. Para obtener mejores medidas de resistividad con errores mínimos se debe realizar dichas mediciones en una superficie lo más plana posible del suelo, aunque mediante el software ayuda a minimizar estos errores. Los electrodos se introducen en el terreno lo suficiente para un mejor contacto entre electrodo-suelo. En la computadora se configurarán las variables del dispositivo de adquisición como son: el número de electrodos (48), la distancia entre electrodos (5 m), la configuración de medida (Dipolo-Dipolo) y el número de medidas a realizar (968), dichas variables se

transfieren al dispositivo para que el mismo realice una medición automática de toda la secuencia. Una vez adquirida la información almacenada se transferirá a la computadora que mediante el software estos datos serán procesados. (Solana, 2014)

3.5. Procesamiento de Datos.

El resultado obtenido de la toma de medidas en campo es dispuesto en forma de pseudosección de resistividad aparente en forma de una malla de discretización de dos dimensiones (2D). Esta pseudosección son curvas de isoreisitividades que reflejan cuantitativamente la variación espacial en 2D de resistividades aparentes del perfil investigado. Estos datos se ingresan al software Res2dinv que efectúa la inversión completa en 2D de perfiles eléctricos de superficie. (Capilla, 2014)

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de la zona de estudio.

El acuífero del río Chambo (Figura 8) se encuentra ubicado en el centro del Ecuador, el área de este es de 290,143 m², la superficie está distribuida entre los cantones Riobamba, Guano y Chambo (Mendoza, 2015).

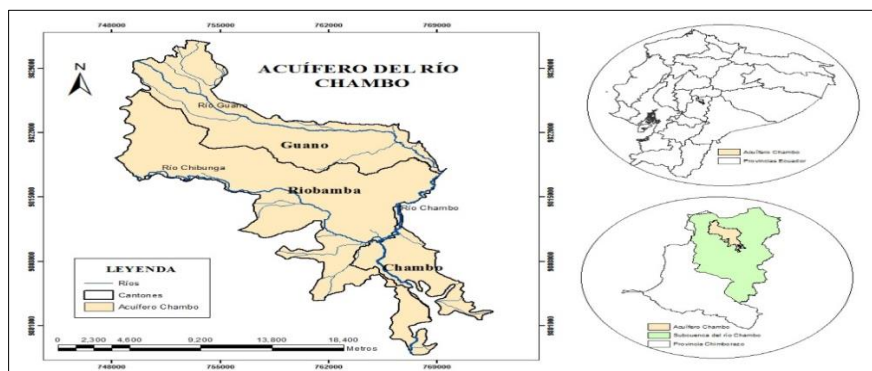


Figura 8. Mapa de Ubicación del acuífero del río Chambo.

Fuente: (Mendoza, 2015).

4.1.1. Descripción geológica del acuífero

La descripción geológica del acuífero (figura 9) presenta depósitos de avalancha, estos están caracterizados por dos facies sedimentarias: una facie de bloque que consiste de un depósito clástico mono-litológico, con poca matriz, las litologías más abundantes de los clastos son: andesitas con piroxenos, andesitas y dacitas con hornblenda. Por otra parte, la facie de matriz consiste de una variedad de litologías volcánicas mezcladas en una matriz limo-arenosa (Mendoza, 2015). El detalle de las formaciones que están presentes en el acuífero se detalla a continuación:

La Formación Yaruquíes (OMt) (Terciario). - En su base este se encuentra compuesta por areniscas finas de un color amarillento rojizo, conglomerados de andesitas y cuarcitas con intercalaciones de areniscas. Se lo encuentra hacia el sur de la zona de Yaruquíes. (Sosa & Guevara, 1973).

La Formación Riobamba (PR & PR') (Pleistoceno). - Aflora entre los ríos Guano y Chibunga, constituye la fase volcánica laharítica del Chimborazo, integrada por gravas redondeadas y angulosas; en algunos sectores presenta estratificación; su potencia no sobrepasa los 100m. (Sosa & Guevara, 1973).

Sedimentos del río Chambo (PCH) (Pleistoceno). - Aflora entre las poblaciones de Licto, Chambo, y Punín, y comprende conglomerados, areniscas y arcillas finas, con bancos de ceniza fina localmente interestratificados (Naranjo, 2013).

La Formación Apagua (PcEa) (Paleoceno - Eoceno). - Aflora en las faldas del Chimborazo, debido a su ubicación, no existen prácticamente pozos perforados sobre esta formación. Es de gran interés hidrogeológico y comprende areniscas de grano fino, en estratos finos a medios, intercaladas con limolitas negras silicificadas, y areniscas de grano más grueso. (Naranjo, 2013).

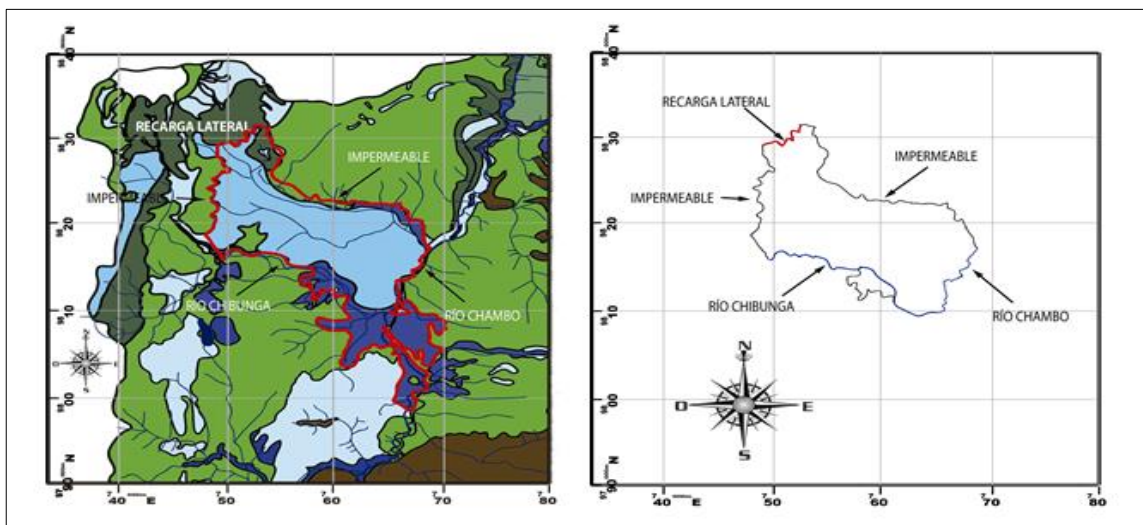


Figura 9. Descripción geológica del acuífero del río Chambo.

Fuente: (Mendoza, 2015).

4.1.2. Hidrogeología del acuífero

La descripción hidrogeológica del acuífero (figura 10) presenta las siguientes condiciones: lavas de los volcanes Chimborazo, Carihuairazo, Altar, Sangay, estas unidades de origen volcánico presentan hidrogeológicamente un comportamiento similar; generalmente comprenden mantos de lavas, aglomerados y materiales piroclásticos de grano fino. Este tipo de materiales tiene una permeabilidad secundaria de tipo superficial por fisuración y fracturación. Estas unidades están asociadas con las zonas de recarga, permitiendo la infiltración a través de sus discontinuidades. El agua subterránea en estas unidades es observada en forma de manantiales (Naranjo, 2013).

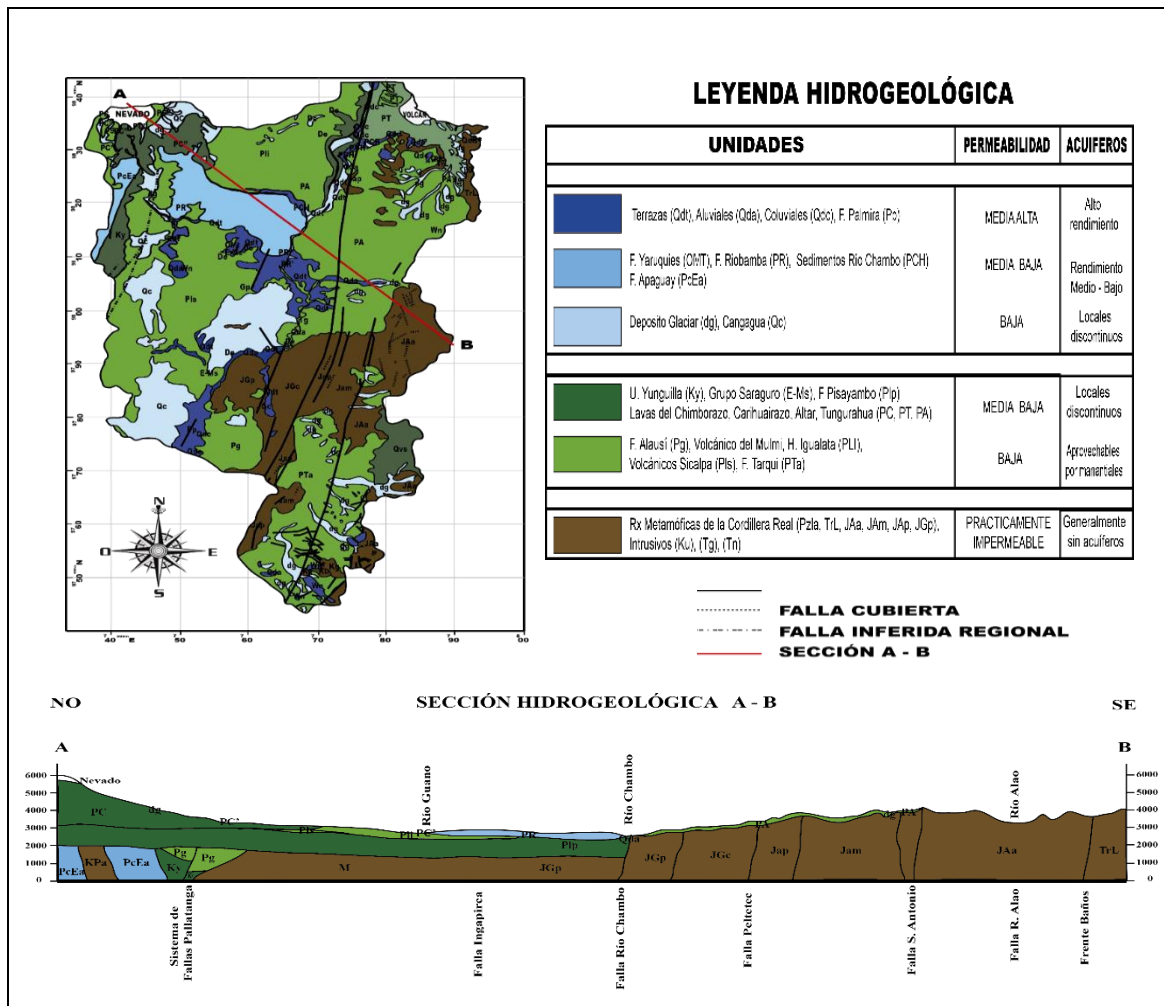


Figura 10. Mapa Geológico de la subcuenca del río Chambo y sección Geológica del acuífero del Chambo.

Fuente: (Naranjo, 2013)

4.2.Zona de Estudio.

El trabajo se realizó en el sector de Llio, en donde se encuentra implementado un campo de bombeo de agua subterránea para dotar de agua potable a la ciudad de Riobamba. El área de estudio se encuentra en la parroquia San Andrés, cantón Guano. Respecto a la geología presentada, el trabajo se realizó en la parte alta del acuífero, por lo que está sobre lavas jóvenes del volcán Chimborazo (figura 11).

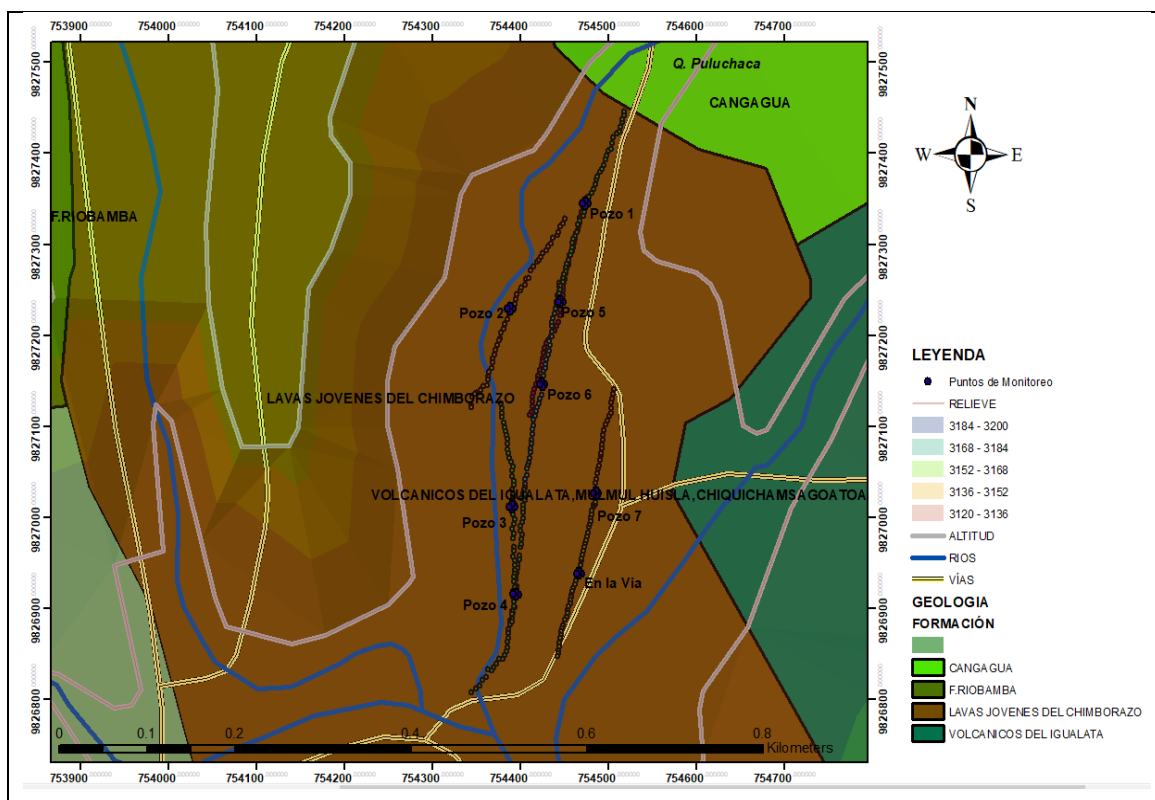


Figura 11. Mapa de identificación de puntos de monitoreo.

Fuente: Elaboración del Autor.

A continuación, se presenta en la (tabla 2) las coordenadas UTM de los pozos (punto central de las tomografías), además de un punto central realizado en la vía que conduce hacia fuera de las instalaciones.

Tabla 2. Coordenadas UTM de los pozos (punto central de las tomografías).

Número de pozo	Longitud (X)	Latitud (Y)
Pozo 1	754474	9827345
Pozo 2	754389	9827229
Pozo 3	754391	9827011
Pozo 4	754395	9826915
Pozo 5	754446	9827237
Pozo 6	754425	9827146
Pozo 7	754486	9827026
En la vía	754467	9826938

Fuente: Elaboración del Autor.

4.3.El estudio de las tomografías realizadas en Llio se muestra a continuación:

La tomografía eléctrica realizada en el pozo 1 (figura 12.a) presenta un rango de resistividades eléctricas entre 16.9 y 91.8 Ohm*m, gráficamente se muestra en color azul, al comparar con la estratigrafía del pozo de referencia se observa zonas permeables y contenido de agua en sus poros de profundidad, esto a una profundidad de 5, 15, 35 y 65 m, ya que de acuerdo a la (figura 12.b) se observa perfiles litológicos de arena, gravas gruesas y piedras. Se observa además rangos de resistividades entre 214 y 500 Ohm*m en la gama de colores verdes, esto muestra zonas semipermeables compuestas en su mayoría por gravas, areniscas arcillosas y cuarcitas, esquistos sanos y granito alterados. En la parte superior, intermedia e inferior izquierda de la tomografía presenta un rango alto de resistividades de 1166, 2719 y 6343 Ohm*m, característico de zonas impermeables compuestas mayormente de lavas y granitos sanos.

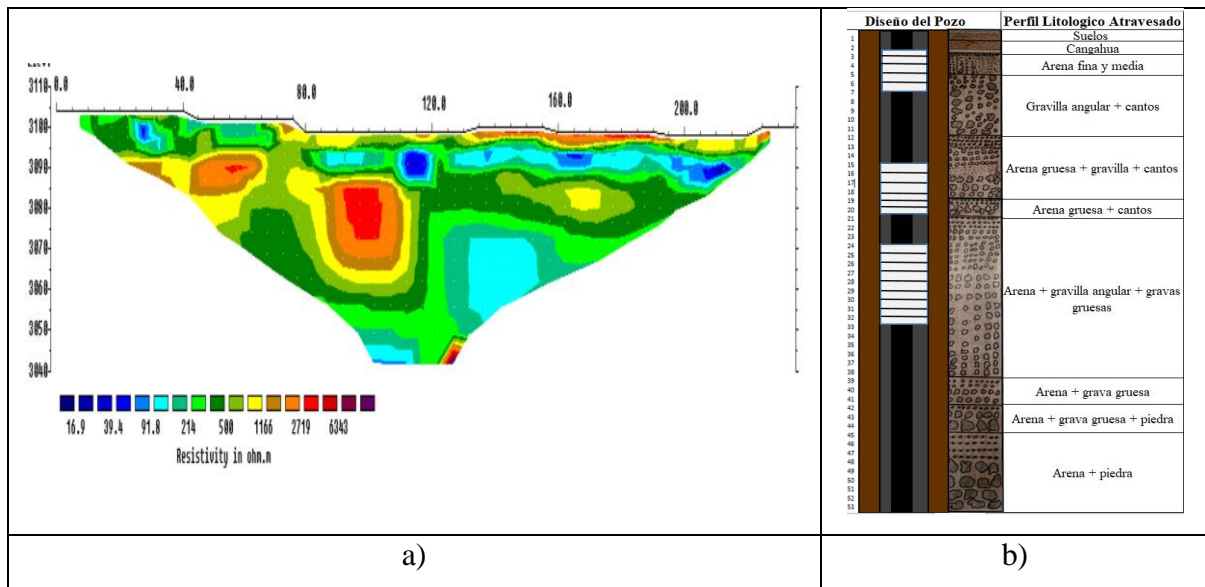


Figura 12. a) Tomografía Eléctrica Pozo 1, b) Estratigrafía pozo 1.

La tomografía eléctrica realizada en el pozo 2 (figura 13.a) presenta un rango de resistividades eléctricas entre 17.4, 44.8 y 115 Ohm*m en la escala de colores azules, a una profundidad de 6 a 10 m, esto muestra zonas permeables en donde fluye el agua subterránea. En la parte superior izquierda y central de la tomografía se obtuvo un rango de resistividades entre 115 y 296 Ohm*m se muestra colores turquesa y verde claro, esta zona es semipermeable porque está compuestas por areniscas arcillosas y cuarcitas, lavas y granito alterados. Existen zonas con resistividades entre 500 y 1100 Ohm*m mostrando presencia de gravas gruesas, granitos medianos, los rangos de resistividades entre 1156 y 7000 Ohm*m muestran zonas impermeables compuestas en su mayoría de lavas y granito sanos. El perfil estratigráfico del

pozo 2 (figura 13.b) permite completar la interpretación porque en las resistividades encontradas concuerdan con el material encontrado en esta.

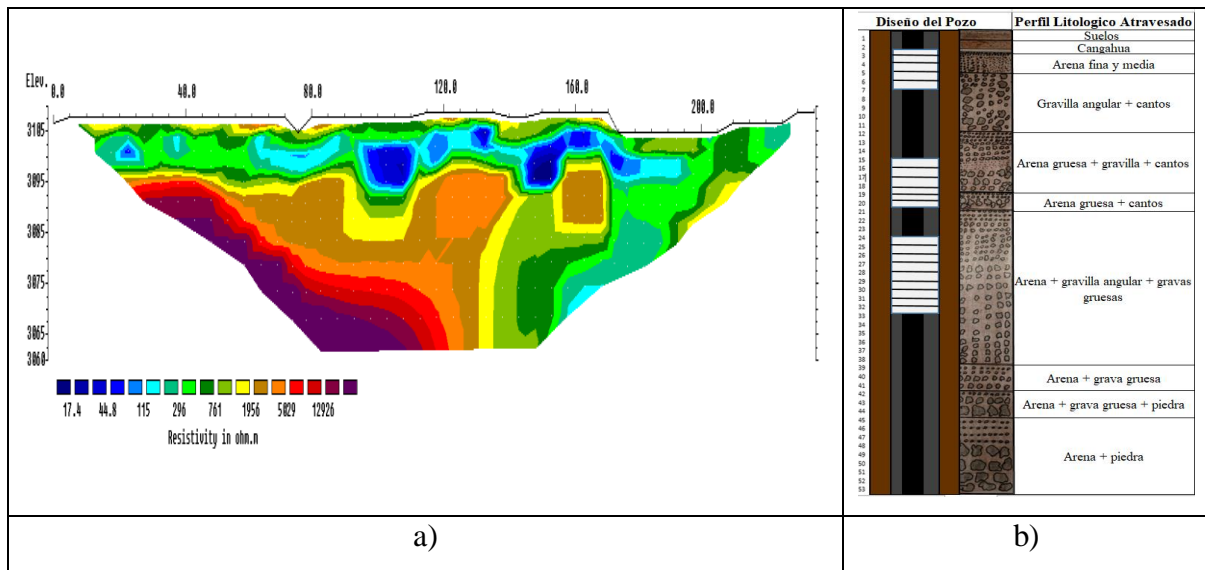


Figura 13. a) Tomografía Eléctrica Pozo 2, b) Estratigrafía pozo 2.

Los resultados de la tomografía eléctrica realizada en el pozo 3 (figura 14.a) presenta valores de resistividades eléctricas entre 28.1 y 164 Ohm*m en la escala de colores azules, esto muestra zonas permeables con altas cantidades de agua que fluyen en el subsuelo de 5 y 60 m de profundidad; al comparar con la estratigrafía del pozo (figura 14.b) se observa en esta zona la presencia de arena fina y media, grava angular y cantos. Las zonas semipermeables están representadas por resistividades entre 396 y 957 Ohm*m en la gama de colores verdes, aquí encontramos gravilla angular, cantos, arena y gravas gruesas. Por otra parte, en la parte inferior izquierda y derecha se presenta valores altos de resistividades de 2311 y 7000 Ohm*m, representando zonas impermeables compuestas por lavas y granito sanos.

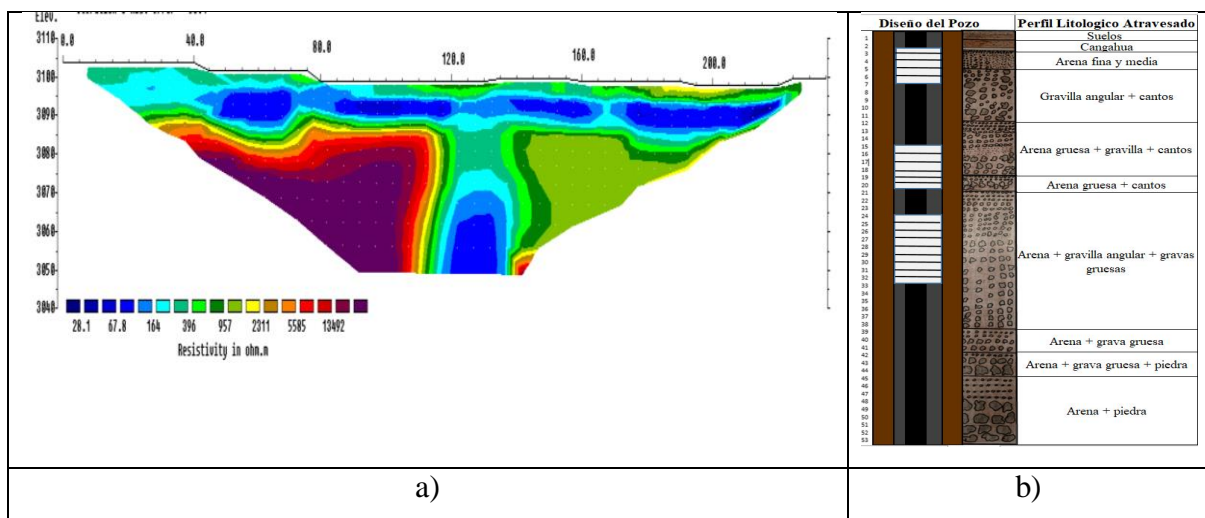


Figura 14. a) Tomografía Eléctrica Pozo 3, b) Estratigrafía pozo 3.

En el pozo 4 se obtuvieron rangos de resistividades eléctricas entre 26.1 y 169 Ohm*m como se muestra en (figura 15.a), la escala de colores azules muestra la presencia de arena fina y media, gravilla angular y granitos (figura 15.b), propios de una zona con buena permeabilidad. Por otra parte, existen zonas semipermeables distribuidas en la mayor parte de la tomografía tanto de la parte superior e inferior, estas presentan rangos de resistividades entre 170 y 1088 Ohm*m en la gama de colores verdes, y la presencia de granito grueso y piedras. Además, en esta tomografía se aprecia un rango de resistividades altas entre 2762 y 7000 Ohm*m, característico de zonas impermeables compuestas en su mayoría por lavas, y granitos sanos.

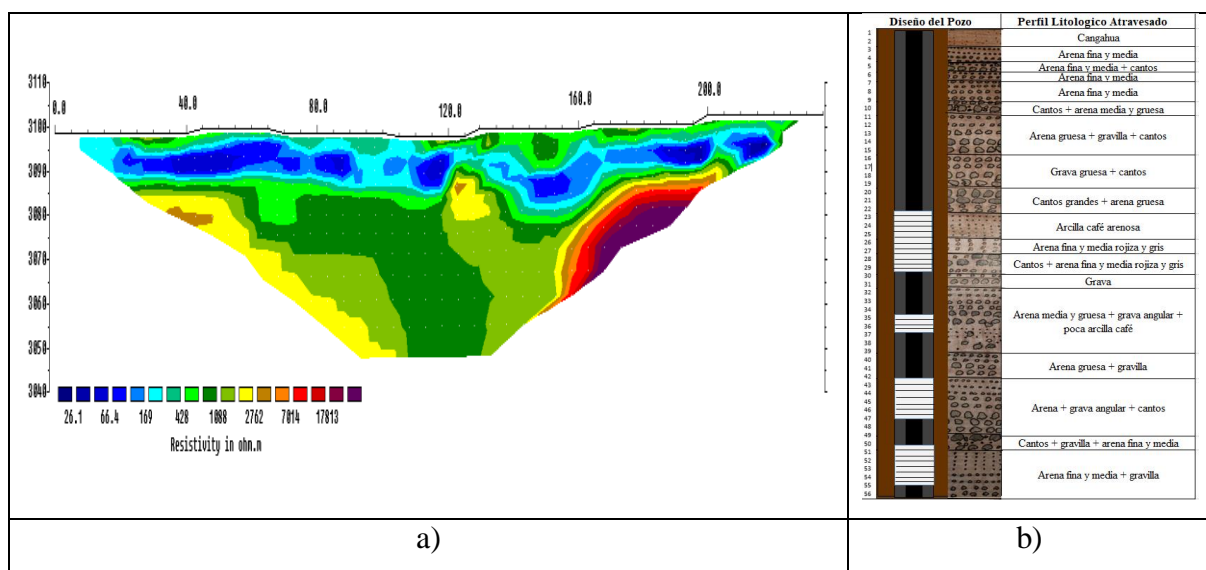


Figura 15. a) Tomografía Eléctrica Pozo 4, b) Estratigrafía pozo 4.

La figura (16.a) muestra zonas permeables con rangos de resistividades eléctricas entre 18.2 y 72,8 Ohm*m en la escala de colores azules, además la estratigrafía del pozo 5 (figura 16.b) muestra arena fina y media, arena media y gruesa, cantos, grava gruesa y arcilla café arenosa. Las zonas semipermeables distribuidas en la tomografía presentan rangos de resistividades entre 146 y 291 Ohm*m en la gama de colores verdes, están compuestas por arenas y gravas, areniscas arcillosas y granito alterado. Por otra parte, se encuentran resistividades altas entre 582 y 2325 Ohm*m, característico de zonas impermeables compuestas en su mayoría de lavas, granitos sanos.

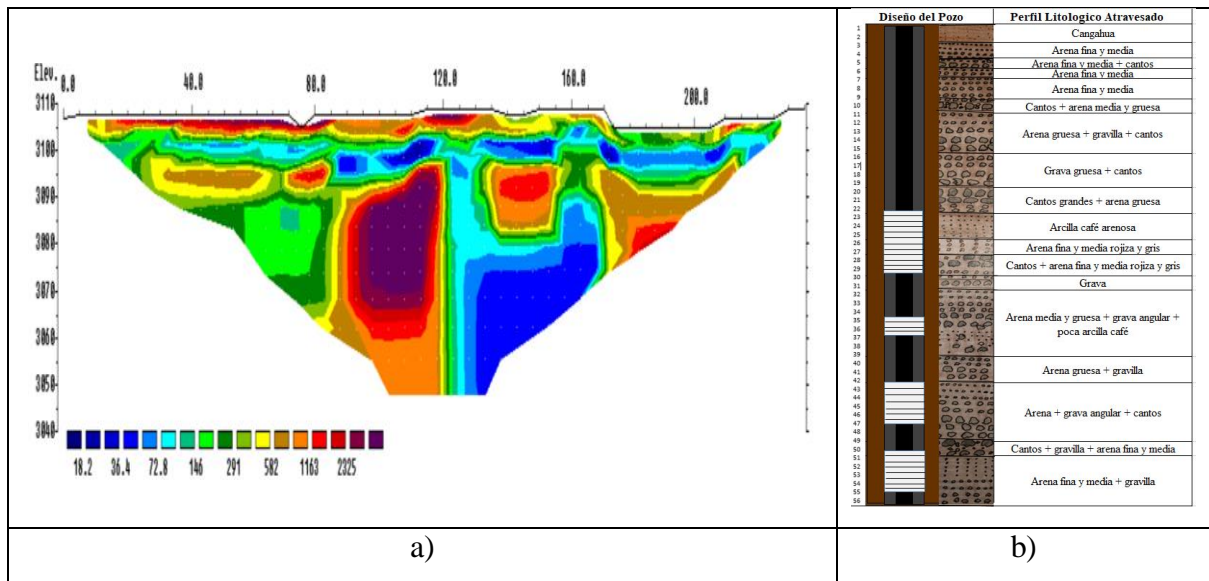


Figura 16. a) Tomografía Eléctrica Pozo 5, b) Estratigrafía pozo 5.

La tomografía eléctrica realizada en el pozo 6 (figura 17.a) presenta un rango de resistividad eléctrica entre 13.7 y 76.8 Ohm*m en la escala de colores azules, esto muestra zonas permeables con presencia (figura 17.b) de arena fina y media, cantos, grava gruesa y arcilla café arenosa. Por otra parte, el rango de resistividad que va desde 182 hasta 432 Ohm*m en la gama de colores verdes, muestra zonas semipermeables compuestas por arenas y gravas, esquistos arcillosos o alterados, y granito alterado. Además, las resistividades registradas entre 1026 y 5774 Ohm*m son de zonas impermeables compuesta en su mayoría de lava y granitos sanos.

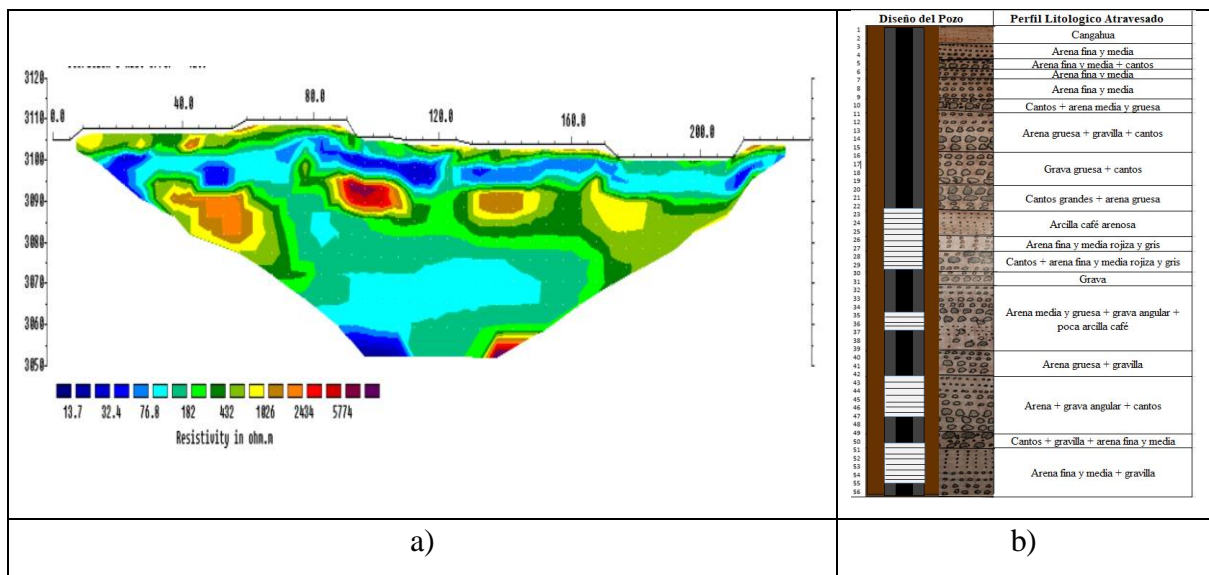


Figura 17. a) Tomografía Eléctrica Pozo 6, b) Estratigrafía pozo 6.

La variación de la resistividad eléctrica en la tomografía realizada en el pozo 7 (figura 18.a) presenta secciones con resistividades eléctricas entre 30 y 107 Ohm*m en la escala de colores azules, como lo describe la estratigrafía (figura 18.b) muestra zonas permeables con presencia de arena media y gruesa, cantos, grava gruesa y arcilla café arenosa. La zona semipermeable está representada por la gama de colores verdes con rango de resistividades 201 y 380 Ohm*m, estas zonas están compuestas por arenas y gravas, areniscas arcillosas y cuarcitas. En menor proporción se encuentra resistividades altas entre 716 y 2544 Ohm*m, característico de zonas impermeables compuestas por lavas, granitos sanos.

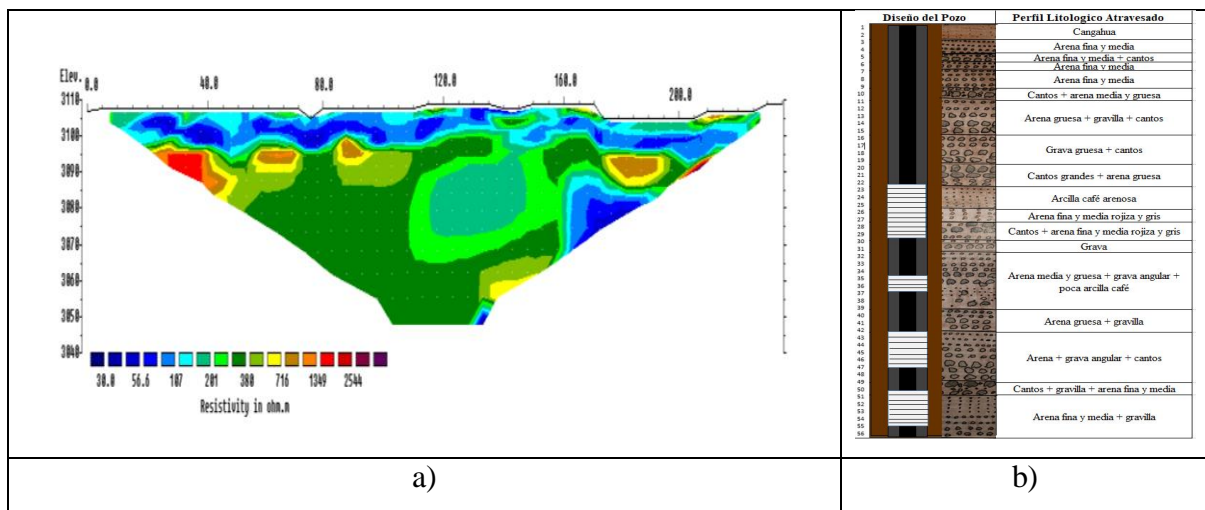


Figura 18. a) Tomografía Eléctrica Pozo 7, b) Estratigrafía pozo 7.

La tomografía eléctrica realizada en una sección de la vía, dentro del campo de bombeo (figura 19) presenta resistividades eléctricas entre 9.84 y 137 Ohm*m en la escala de colores azules a verdes, estas resistividades muestran zonas permeables con presencia de arena media y gruesa, cantos, grava gruesa y arcilla café arenosa, además se muestran resistividades entre 265 y 991 Ohm*m en la escala de colores amarillo y rojo, lo que representa arenas y gravas, areniscas arcillosas y cuarcitas.

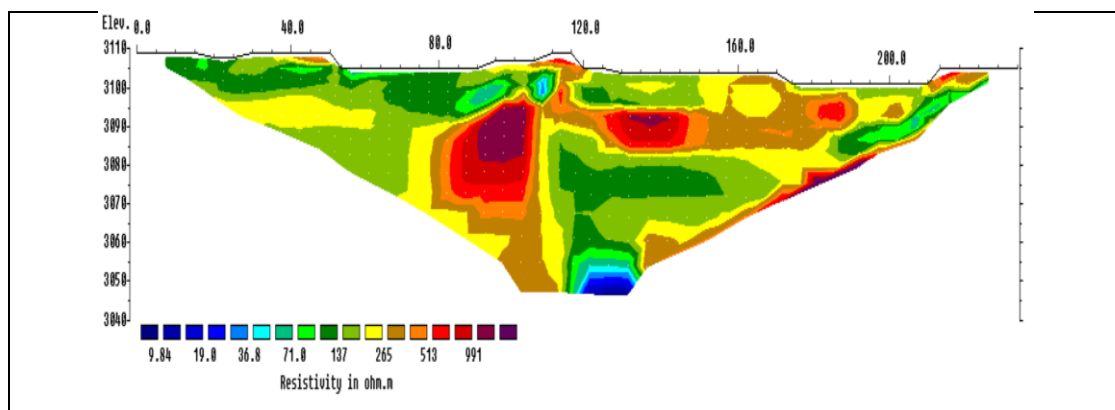


Figura 19. Tomografía Eléctrica sección de la vía, dentro del campo de bombeo.

Como se observa en las tomografías realizadas para este trabajo al comparar con la tomografía de referencia realizada por Tenelema (2017), muestra similitud en los resultados de las mediciones, como se muestra en la (figura 20), en donde se presentaron resistividades eléctricas entre 3 y 116 Ohm*m en la escala de colores azules, verdes y amarillos, esta zona es de características permeables porque presentan arenas, grabas y areniscas arcillosas. Además, las resistividades eléctricas entre 116 y 485 Ohm*m son características de zonas semipermeables compuestas por rocas ígneas y metamórficas, calizas, esquistos arcillosos, granitos, y en menor proporción tobas.

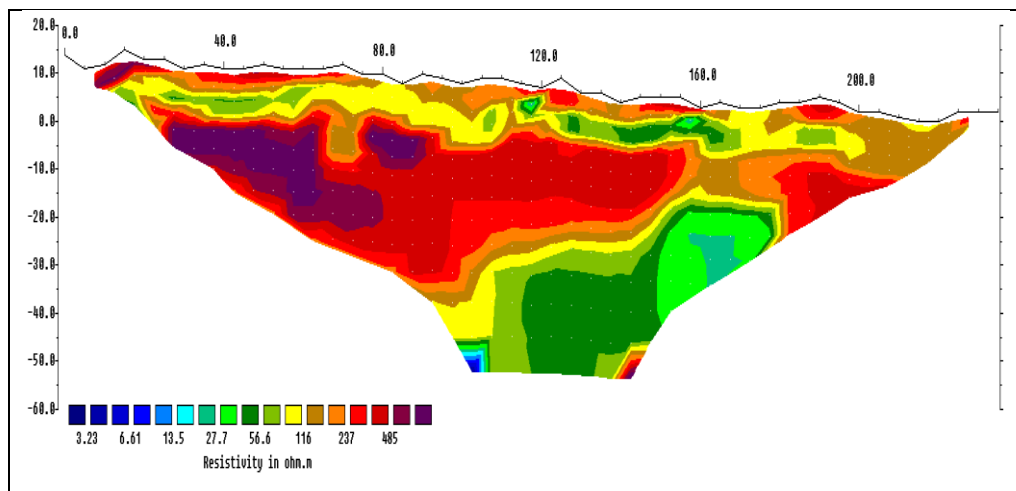
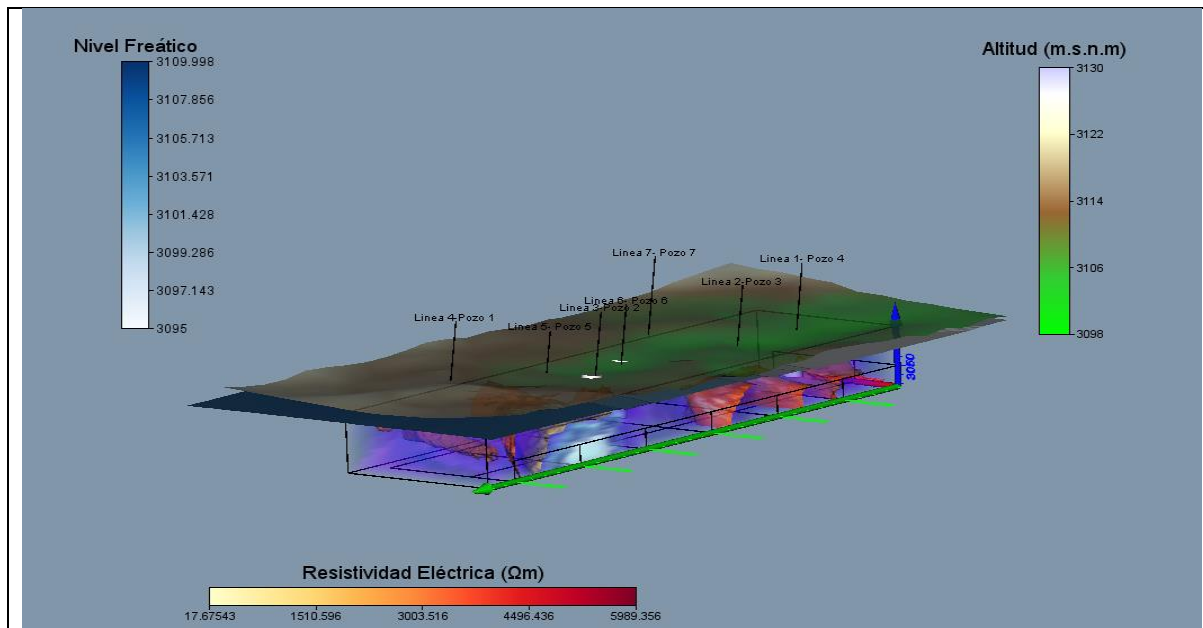


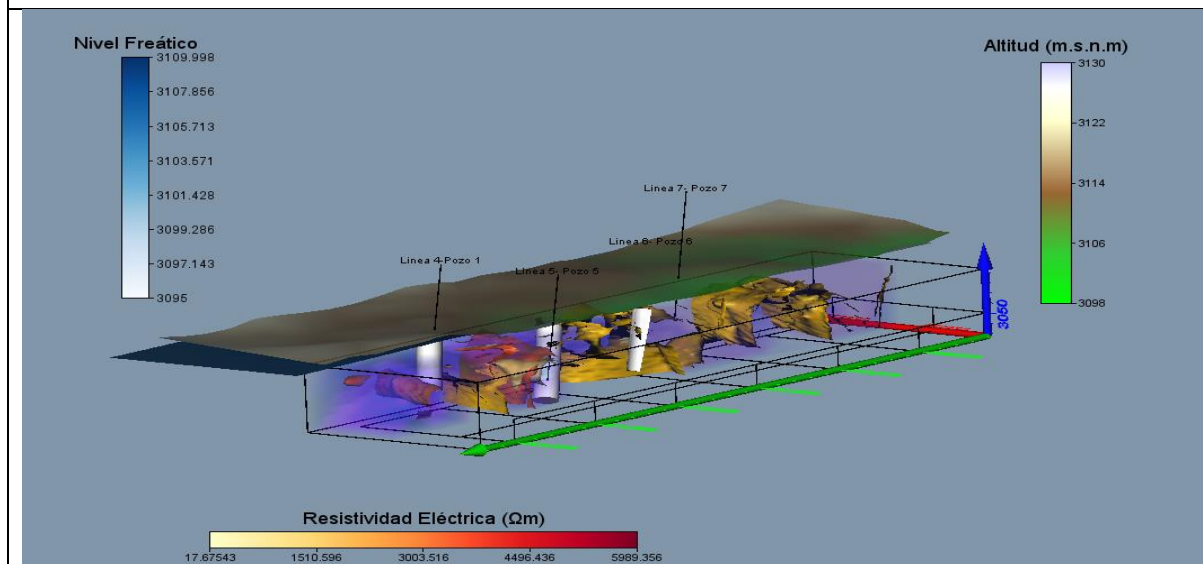
Figura 20. Tomografía Eléctrica Pozos EMAPAR (Tenelema, 2017).

4.4.Reconstrucción Estratigráfica en 3-D.

La reconstrucción en 3D (figura 21) utilizando las tomografías eléctricas en cada pozo, muestran de mejor manera la presencia de los diferentes materiales presentes en la zona de estudio, principalmente se puede evidenciar las resistividades altas en la gama de colores desde amarillo, naranja y rojo, que representan las resistividades de 300, 1000 y mayores a 1000 Ohm*m, el resto de la estructura 3D, representada por el color violeta muestra la presencia de arenas, grabas, arcillas que envuelven estas estructuras y forman el medio poroso dando la permeabilidad de acuerdo a la disposición de estos materiales. Además, se puede ver la presencia del nivel freático medido en los pozos que es de aproximadamente 3098 m.s.n.m.



a)



b)

Figura 21. Reconstrucción 3D a) Zona completa de estudio b) Corte zona de estudio.

- Estudiar los sondeos eléctricos verticales y la estratigrafía de los pozos asentados en el sistema de bombeo de Llio.
- Realizar tomografías eléctricas de resistividad, para determinar las características estratigráficas de la zona de estudio.
- Reconstruir la estratigrafía de Llio mediante un modelo en 3D.
- Correlacionar e Interpretar la estratigráfica del modelo 3D de la zona con los datos de los pozos.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El acuífero del pozo de Llio presenta un relieve relativamente plano, en donde emergen lavas jóvenes del Chimborazo, la superficie del suelo está ocupada por materiales de porosidad intergranular e internamente los estratos están formados por arenas, gravas, gravilla, mantos de lavas, cenizas y tobas volcánicas aglomerados y materiales piroclásticos de grano fino, este tipo de materiales presentan zonas semipermeables por donde pasa el agua subterránea.
- La reconstrucción en 2D permitió conocer que en la parte superficial entre los 3110 y 3080 m.s.n.m. se encuentra claramente representado la sección permeable de la zona de estudio porque existen valores de resistividad eléctrica entre 10 y 130 Ohm*m, valores que al ser contrastados con la estratigrafía de los pozos, concuerdan en la presencia de arenas, grabas y arcillas (cangagua), es aquí donde se muestra el nivel freático medio en los 7 pozos es de 3098 m.s.n.m., por lo que corrobora que el nivel de mayor concentración de agua está en la parte más superficial de la zona de estudio, hacia abajo desde los 3098 hasta 3050 m.s.n.m se encuentran zonas semipermeables con presencia de incrustaciones de granitos y lavas.

5.2. Recomendaciones

- Para obtener una mejor resolución estratigráfica en la zona de estudio del subsuelo es necesario el uso de más cables y electrodos en el equipo, de esta manera al momento de realizar las tomografías eléctricas se las pueda apreciar de mejor forma.
- Esta investigación es muy importante porque por medio de softwares permite obtener datos suficientes para el conocimiento de cualquier acuífero y poder realizar estrategias de aquellas zonas que no fueron estudiadas con claridad, así poder confirmar una gestión integral de los acuíferos.
- Una modelación de la estratigrafía dentro de un acuífero es importante porque se encarga de brindar información suficiente de cómo se encuentra conformada el subsuelo o identificar si el suelo es permeable, semipermeable o impermeable, y reconocer si se encuentra o no fuentes de agua subterránea con respecto a su posicionamiento.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

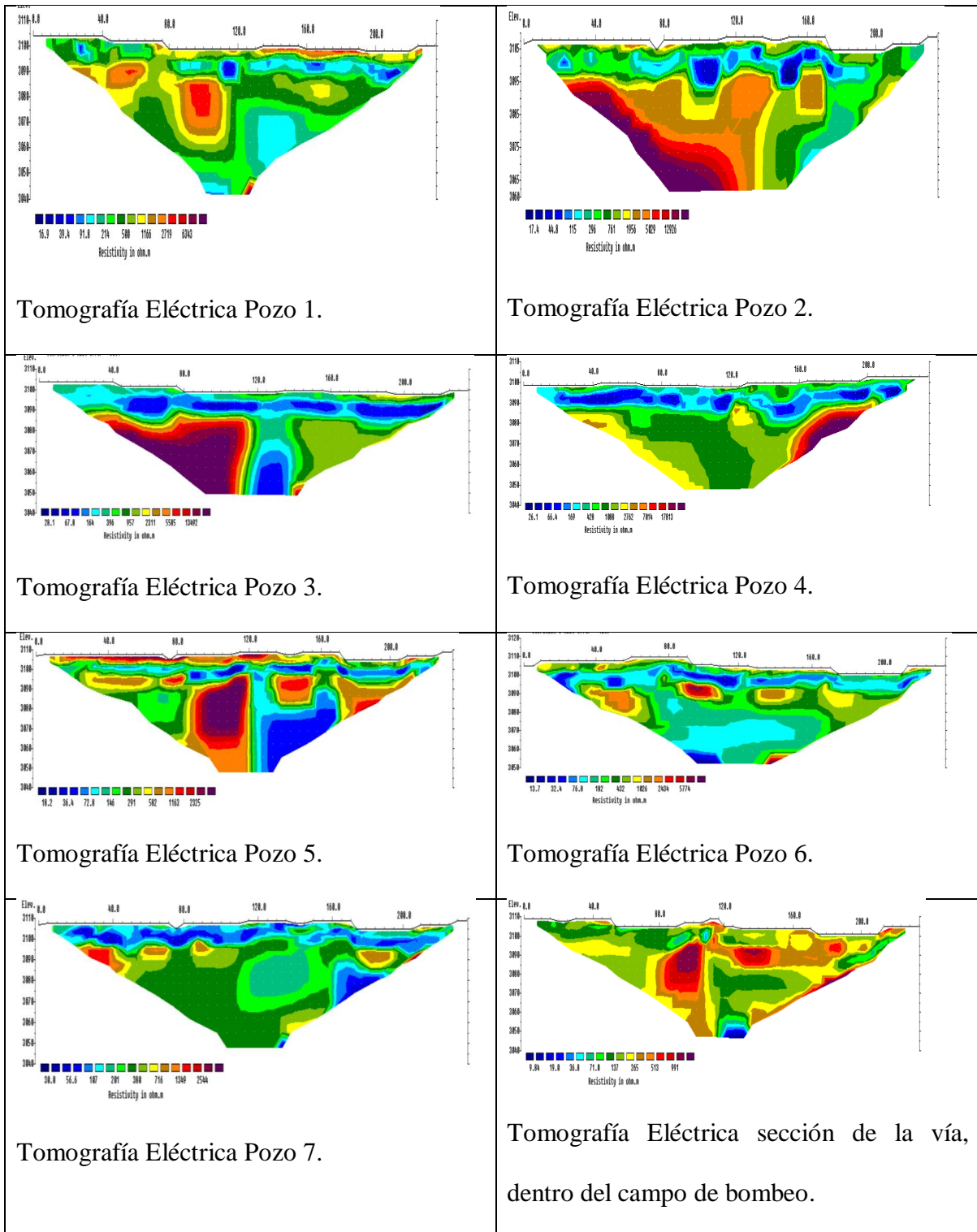
- Altonar, L. (2019). Manual para un caso de datos Grávímétricos. *Voxler4*, 4.
- Arias, E., Ramirez, O., & Patiño, F. (2011). Exploración Geotécnica-Relaciones Geoeléctricas. *Univesidad Nacional de Colombia*.
- Bravo, J. (2012). Caracterización Geológica - Geotécnica de los movimientos de ladera de los sectores El plateado y San Cayetano Bajo, con aplicación de tomografía eléctrica y técnicas GPS. *Universidad Técnica Particular de Loja*.
- Burbano, N., Becerra, S., & Efrén Pasquel. (2015). Introducción a la Hidrogeología del Ecuador 2da.Edición. *INAMHI*, 2-16.
- Capilla, M. (2014). Comparación de técnicas geofísicas para determinación de contaminación de suelos agrícolas. *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía*.
- Castillo, J. (2015). Tiempo Geológico y Significado de Fósiles. *Geología*.
- GEOTEM. (2016). Caracterización Geofísica-Litológica Detallada del Subsuelo. *Ingeniería S.A de C.V. Todos los derechos reservados*.
- Giraldo, H., & Sendoya, D. (2012). Diseño y contruccion de quipo para realizar prosprección Geofisica Aplicando el Método VDE Tomgrafía Eléctrica. *Universidad Nacional Abierta y a Distancia-UNAD, Neica, Colombia*, 73-74.
- Jaimes, J. (2011). Metodos geofisicos aplicados a la caracterizacion de los suelos. *Universidad Industrial de Santander- Facultad de Físicomecánicas.*, 28.
- Martinez, J., & Romero, E. (2011). Metodo de Analisis de mediciones de reistividad del suelo segun Normativa IEEE-81-1983. *Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)- Ingeniería Eléctrica*, 14-18.
- Mendoza. (2015). CHARACTERIZATION OF REAL AQUIFERS USING HYDROGEOPHYSICAL MEASUREMENTS. AN APPLICATION TO THE CHAMBO AQUIFER (ECUADOR). *UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA, ITALIA*, 195.

- Moreno, M. (2010). Caracterización de un sitio contaminado por hidrocarburos usando tomografía de Resistividad Eléctrica. *Universidad Autónoma de Mexico*.
- Naranjo, L. F. (2013). CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CHAMBO. *UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA, MINAS, PETRÓLEOS Y AMBIENTAL*.
- ONU. (19 de Mayo de 2019). El daño ambiental aumenta en todo el planeta, pero aún hay tiempo para revertir el peor impacto si los gobiernos actúan ahora: PNUMA. *El daño ambiental aumenta en todo el planeta, pero aún hay tiempo para revertir el peor impacto si los gobiernos actúan ahora: PNUMA*.
- Ordoñez, J. (2011). Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión integral de recurso hidrico. *Sociedad Geográfica de Lima*, 10.
- Palacios, I. (2016). Diseño e implementación de un sistema por telemetría para la medición de la resistividad del suelo. *Universidad de Cuenca- Facultad de Ingeniería-Escuela de Electronica y Telecomunicaciones.*, 11-14.
- S.G.M. (2017). Estratigrafía. *Gobierno de México*.
- Sendo, J. (2013). Estudio de las Aguas Subterráneas de la ciudad de Riobamba y su zonas de influencia: Lineas Base. *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo-Escuela de Ingeniería Química*, 25.
- SGM. (2017). Geofísica. *Gobierno de Mexico*.
- Solana. (2014). Comparación de Técnicas Geofísicas para Determinación de contaminates en los suelos agricolas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Minas. *Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Minas*.
- Tenelema, V. (2017). Estudio Estratigráfico del acuífero de Río Chambo mediante Tomografías Eléctricas y Técnicas Geoestadísticas. *Universidad Nacional de Chimborazo*.

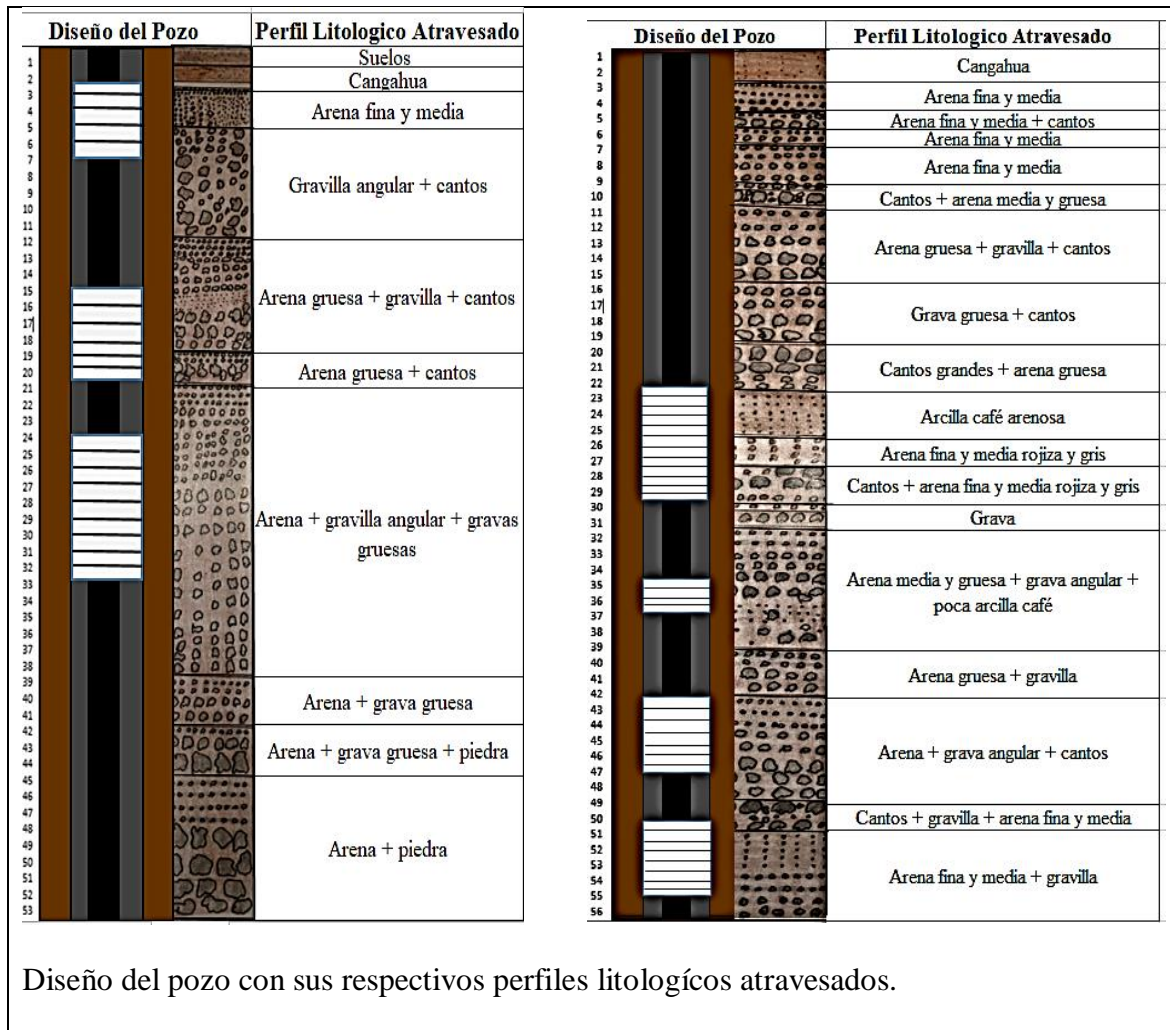
- UNESCO. (2015). Agua para un mundo sostenible datos y cifras. *The United Nations World Water Development Report*.
- Uvidia, J. (2015). Comportamiento de la Resistividad Eléctrica de los suelos ante variaciones de humedad y grado de compactación. *Universidad de Cuenca- Facultad de Ingeniería- Escuela de Ingeniería Civil*, 30.
- Vera, J. (2014). Aguas Subterráneas. *Universidad Nacional del Altiplano-Puno*, 1.
- Villa, M. (2010). Criterios de la seguridad en aplicación de Puesta a Tierra en instalaciones eléctricas de edificios. *Escuela Superior Politécnica del Litoral*, 9-14.

7. APÉNDICES O ANEXOS

Anexo 1. Modelación 2D de tomografías eléctricas de los Pozos de Llio.



Anexo 2. Fotografías de las Estratigrafías.



Anexo 3. Fotografías del proceso investigativo



Equipo Syscal.



Sus elementos.



Tendido de cables.

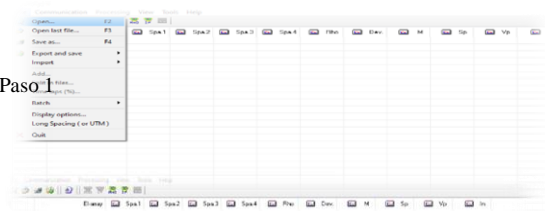


Introducción de electrodos en el suelo.

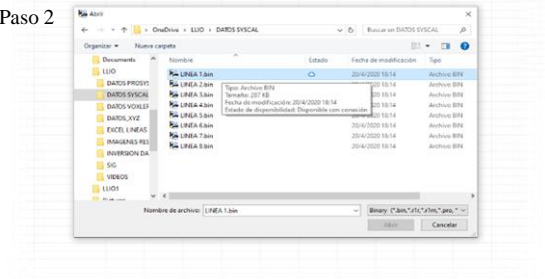


Toma de datos de Resistividad.

Paso 1



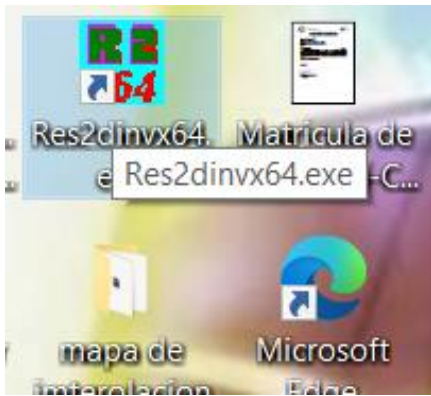
Paso 2



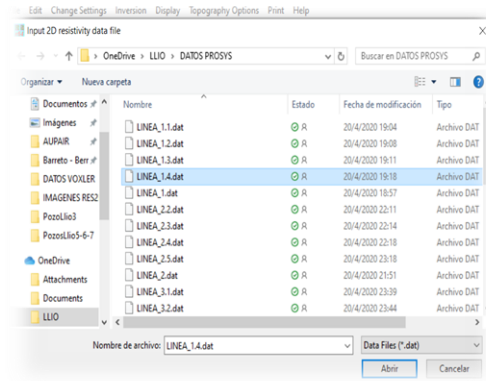
Descarga de Datos en el software PROXY

II.

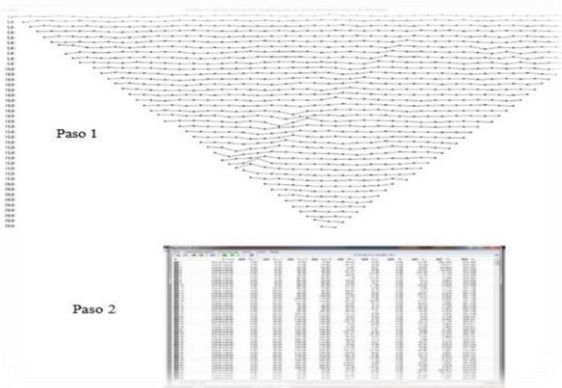
Anexo 4. Pasos para la obtención de imágenes 2D en el Programa RES2DINV.



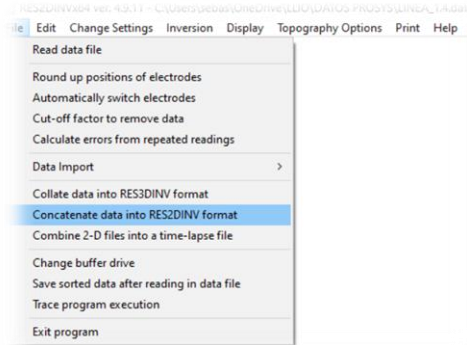
Paso 1. Se abrió el programa RES2DINV.



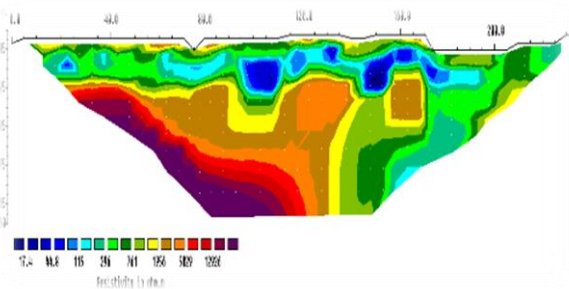
Paso 2. Se abrió el Archivo respectivo.



Paso 4. Corrección de datos erróneos.

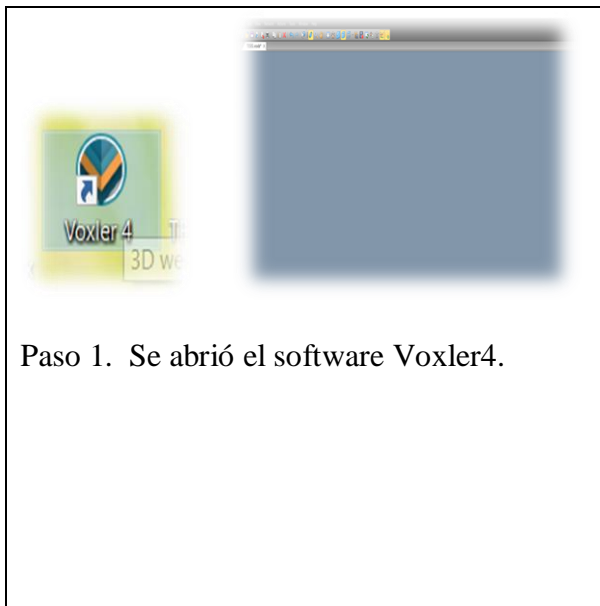


Paso 5. Se abrió la tomografía eléctrica en 2D.

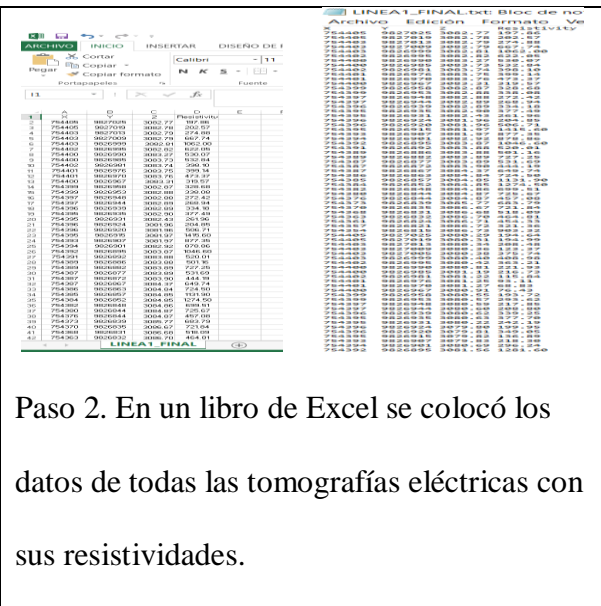


Paso 6. Se obtuvo la Imagen en 2D del pozo 2 hacemos los mismos pasos.

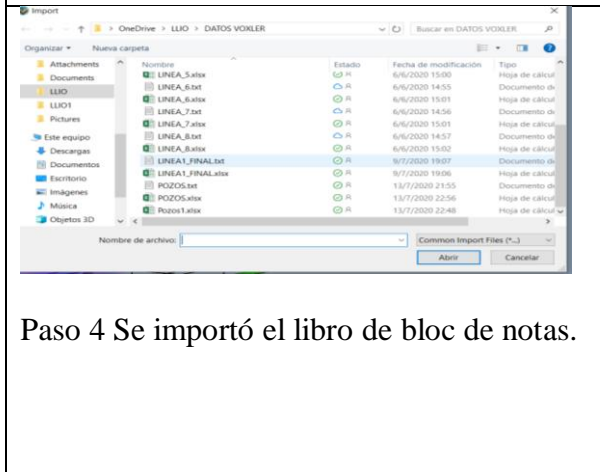
Anexo 5. Pasos para la obtención del modelo 3D en el programa Voxler4.



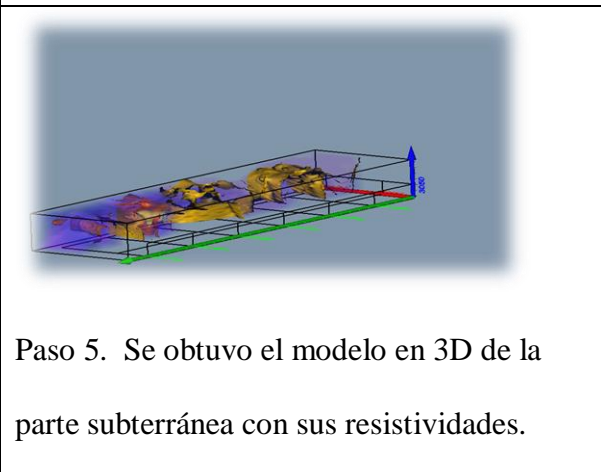
Paso 1. Se abrió el software Voxler4.



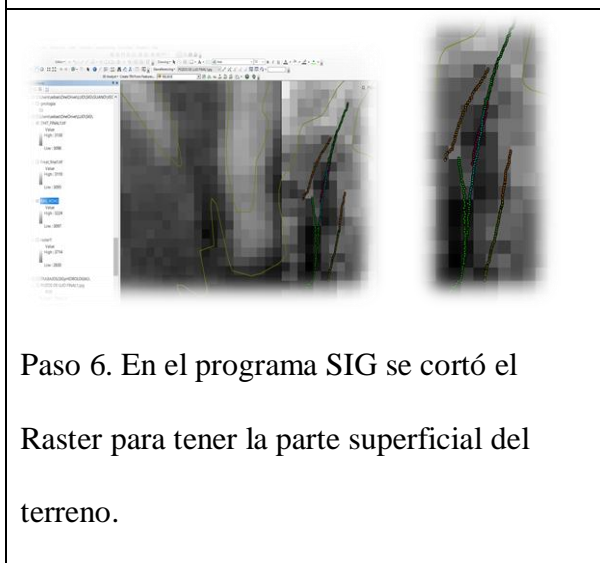
Paso 2. En un libro de Excel se colocó los datos de todas las tomografías eléctricas con sus resistividades.



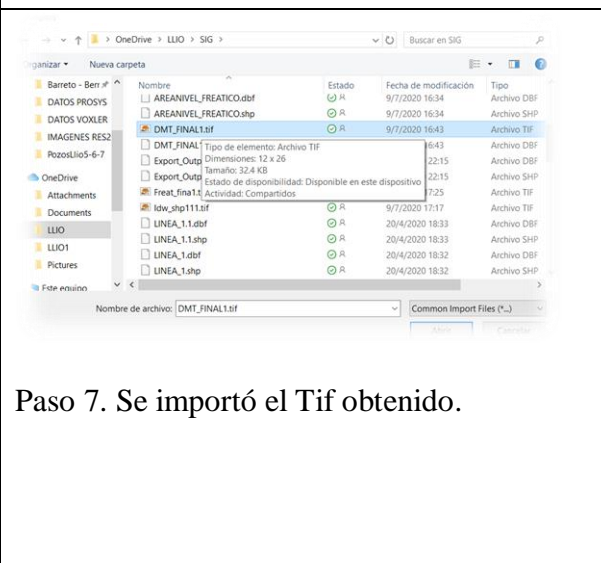
Paso 4 Se importó el libro de bloc de notas.



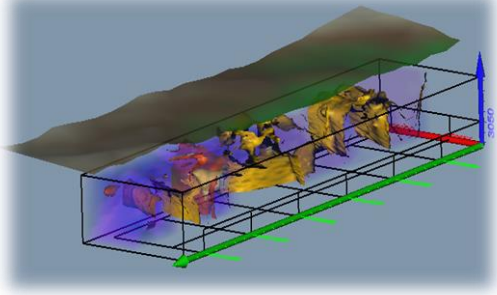
Paso 5. Se obtuvo el modelo en 3D de la parte subterránea con sus resistividades.



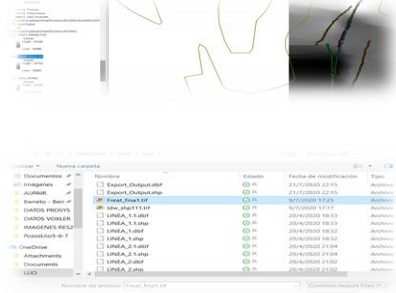
Paso 6. En el programa SIG se cortó el Raster para tener la parte superficial del terreno.



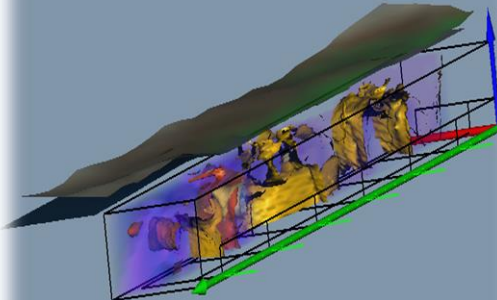
Paso 7. Se importó el Tif obtenido.



Paso 8. Se obtuvo la superficie del terreno en 3D.



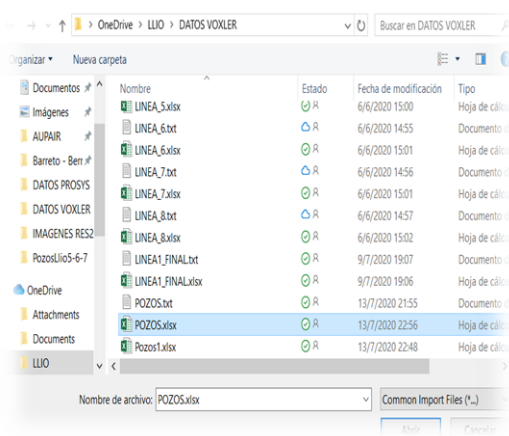
Paso 9. Se importó el nivel freático obtenido por interpolación en IDW en el Programa de Voxler.



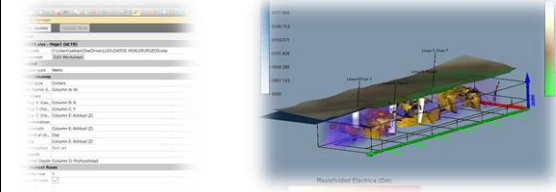
Paso 10. Se obtuvo el modelo con su nivel freático en 3D.

Linea 1-Pozo 4	754295	982695	0	300	Linea 4-Pozo 1	754474	9827345	20	300
Linea 1-Pozo 4	754295	982695	5	300	Linea 4-Pozo 1	754474	9827345	40	300
Linea 1-Pozo 4	754395	982695	10	300	Linea 4-Pozo 1	754474	9827345	45	300
Linea 1-Pozo 4	754395	982695	15	300	Linea 4-Pozo 1	754474	9827345	50	300
Linea 1-Pozo 4	754395	982695	20	300	Linea 4-Pozo 1	754474	9827345	54	300
Linea 1-Pozo 4	754395	982695	25	300	Linea 5-Pozo 5	754448	9827227	0	300
Linea 1-Pozo 4	754395	982695	30	300	Linea 5-Pozo 5	754448	9827227	5	300
Linea 1-Pozo 4	754395	982695	35	300	Linea 5-Pozo 5	754448	9827227	10	300
Linea 1-Pozo 4	754395	982695	40	300	Linea 5-Pozo 5	754448	9827227	15	300
Linea 1-Pozo 4	754395	982695	45	300	Linea 5-Pozo 5	754448	9827227	20	300
Linea 1-Pozo 4	754395	982695	48	300	Linea 5-Pozo 5	754448	9827227	25	300
Linea 2-Pozo 3	754391	982701	0	300	Linea 5-Pozo 5	754448	9827227	30	300
Linea 2-Pozo 3	754391	982701	5	300	Linea 5-Pozo 5	754448	9827227	35	300
Linea 2-Pozo 3	754391	982701	10	300	Linea 5-Pozo 5	754448	9827227	40	300
Linea 2-Pozo 3	754391	982701	15	300	Linea 5-Pozo 5	754448	9827227	45	300
Linea 2-Pozo 3	754391	982701	20	300	Linea 5-Pozo 5	754448	9827227	50	300
Linea 2-Pozo 3	754391	982701	25	300	Linea 5-Pozo 5	754448	9827227	55	300
Linea 2-Pozo 3	754391	982701	30	300	Linea 5-Pozo 5	754448	9827227	60	300
Linea 2-Pozo 3	754391	982701	35	300	Linea 5-Pozo 5	754448	9827227	65	300
Linea 2-Pozo 3	754391	982701	40	300	Linea 5-Pozo 5	754448	9827227	70	300
Linea 2-Pozo 3	754391	982701	45	300	Linea 5-Pozo 5	754448	9827227	75	300
Linea 2-Pozo 3	754391	982701	50	300	Linea 6-Pozo 6	754425	9827146	0	300
Linea 2-Pozo 3	754391	982701	55	300	Linea 6-Pozo 6	754425	9827146	5	300
Linea 2-Pozo 2	754389	9827229	0	300	Linea 6-Pozo 6	754425	9827146	10	300
Linea 2-Pozo 2	754389	9827229	5	300	Linea 6-Pozo 6	754425	9827146	15	300
Linea 2-Pozo 2	754389	9827229	10	300	Linea 6-Pozo 6	754425	9827146	20	300
Linea 2-Pozo 2	754389	9827229	15	300	Linea 6-Pozo 6	754425	9827146	25	300
Linea 2-Pozo 2	754389	9827229	20	300	Linea 6-Pozo 6	754425	9827146	30	300
Linea 2-Pozo 2	754389	9827229	25	300	Linea 6-Pozo 6	754425	9827146	35	300
Linea 2-Pozo 2	754389	9827229	30	300	Linea 6-Pozo 6	754425	9827146	40	300
Linea 2-Pozo 2	754389	9827229	35	300	Linea 6-Pozo 6	754425	9827146	45	300
Linea 2-Pozo 2	754389	9827229	40	300	Linea 6-Pozo 6	754425	9827146	50	300
Linea 2-Pozo 2	754389	9827229	45	300	Linea 6-Pozo 6	754425	9827146	55	300
Linea 2-Pozo 2	754389	9827229	50	300	Linea 6-Pozo 6	754425	9827146	60	300
Linea 2-Pozo 2	754389	9827229	55	300	Linea 6-Pozo 6	754425	9827146	65	300
Linea 4-Pozo 1	754474	9827345	0	300	Linea 6-Pozo 6	754425	9827146	70	300
Linea 4-Pozo 1	754474	9827345	5	300	Linea 6-Pozo 6	754425	9827146	75	300
Linea 4-Pozo 1	754474	9827345	10	300	Linea 7-Pozo 7	754488	9827026	0	300
Linea 4-Pozo 1	754474	9827345	15	300	Linea 7-Pozo 7	754488	9827026	5	300
Linea 4-Pozo 1	754474	9827345	20	300	Linea 7-Pozo 7	754488	9827026	10	300
					Linea 7-Pozo 7	754488	9827026	15	300
					Linea 7-Pozo 7	754488	9827026	20	300

Paso 11. En una tabla de excel se puso las coordenadas del punto central de los pozos y colocamos la profundidad respectiva de cada pozo a 5 m.



Paso 12. Se importo este archivo de excel en el software Voxler4.

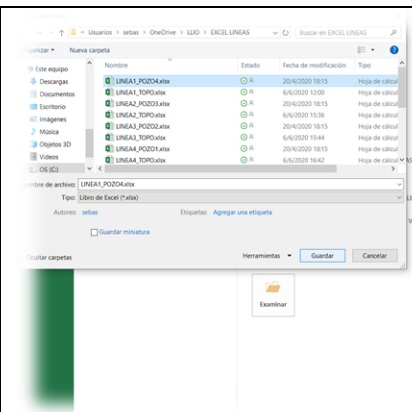


Paso 13. En property manager se realizó las respectivas modificaciones donde se obtuvo el modelo final en 3D con sus respectivos pozos.

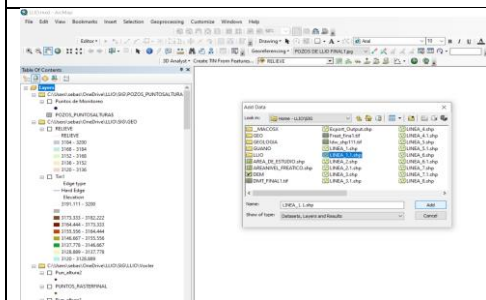
Anexo 6. Mapa de Identificación de Puntos de Monitoreo.

A	B	C	D	E	F
754395	9826915				
754396	9826920				
754396	9826924				
754395	9826931		1-24 DERECHA		
754395	9826935				
754396	9826939				
754397	9826944				
754397	9826948				
754399	9826953				
754399	9826958				
754400	9826967				
754401	9826970				
754401	9826976				
754402	9826981				
754400	9826985				
754400	9826990				
754402	9826995				
754403	9827000				
754403	9827005				
754403	9827009				
754403	9827013				
754405	9827019				
754405	9827025				
754404	9827030				
754393	9826907		25-48 IZQUIERDA		
754394	9826901				
754397	9826905				

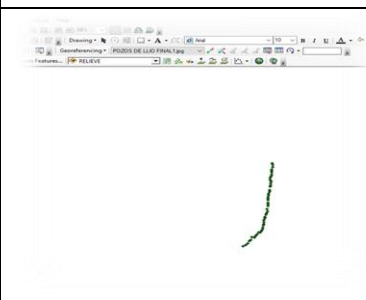
Paso 1. En una hoja de Excel se colocó los puntos de ubicación de las tomografías eléctricas de cada Pozo que se realizó en campo.



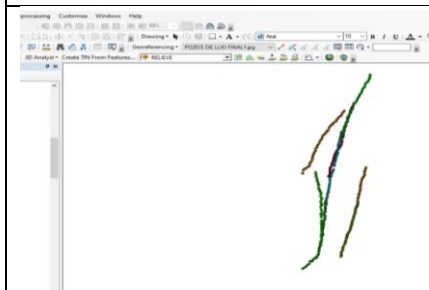
Paso 2. Se guardó en una hoja de Excel para poder importar en el programa SIG.



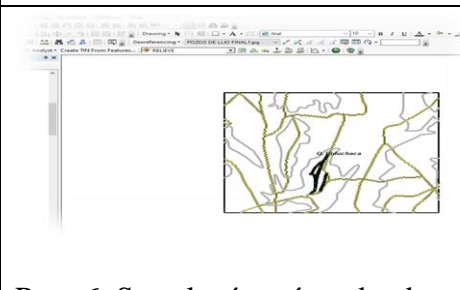
Paso 3. Se importó la carpeta los Puntos en el programa SIG.



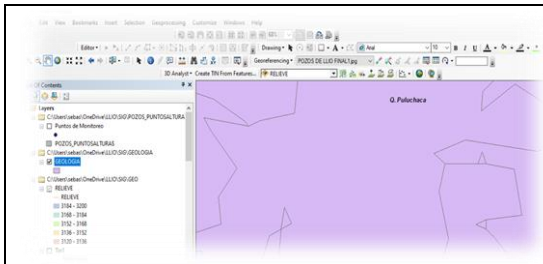
Paso 4. Se obtuvo las líneas o los puntos respectivos de la tomografía eléctrica que se realizó en campo.



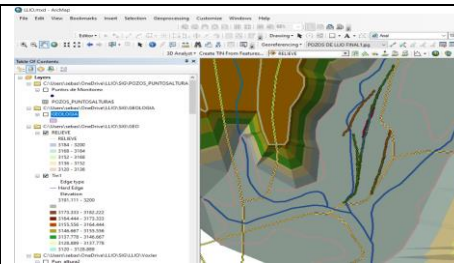
Paso 5. Se realizó los mismos pasos anteriores para cada tomografía.



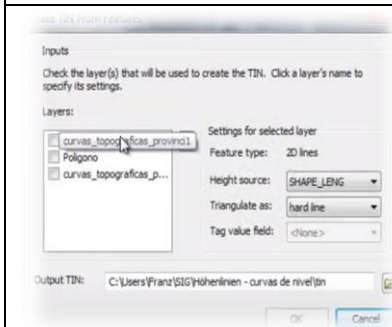
Paso 6. Se colocó un área donde se realizó un clip junto con los shapes de vías, altitud o curvas de nivel y ríos.



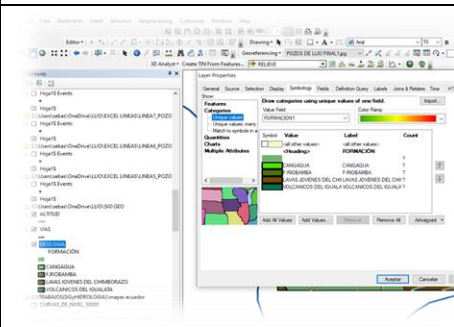
Paso 7. Se abrió un shape de Geología.



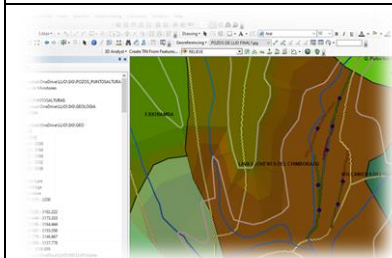
Paso 8. Se creó un Tin de la zona de estudio junto con el shape geología.



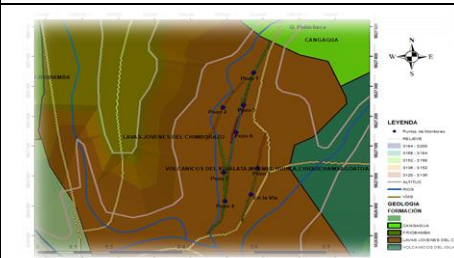
Paso 9. Se creó un Tin from freatures para obtener el relieve.



Paso 10. En propiedades y en simbología se selecciona formacion1 para apreciar los materiales litológicos de la zona de estudios.



Paso 11. Se obtuvo la zona geológica con sus respectivos nombres.



Paso 12. Con unas pequeñas modificaciones se obtuvo el Mapa de ubicación de los Pozos de Llio.