



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TOMOGRFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA
EN EL CAMPUS IXTACZOQUITLÁN DE LA
UNIVERSIDAD VERACRUZANA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA GEOFÍSICA

PRESENTA:

AIDELIZ MARIMAR MONTIEL ÁLVAREZ

DIRECTOR DE TESIS:

M.C. GERARDO CIFUENTES NAVA

CODIRECTOR:

M.C. DAVID ESCOBEDO ZENIL



CIUDAD UNIVERSITARIA

2015

Dedicatoria

*"Porque de Él, y por Él, y para Él, son
todas las cosas" Rom 11:36*

A mis papás, por ser mis guías, por su incansable lucha e inmenso amor:

Papá, por darlo todo por mí, por ser la figura de honestidad, trabajo y entrega.

Mamá, por ser el mayor ejemplo de mujer fuerte y virtuosa. Por creer siempre en mí.

A mis hermanos, por la música y todas las risas. Porque con ustedes todo es mejor:

Dama, por hacer que los regresos a casa no significaran estar sola (aunque tuviéramos mucho trabajo), por los apapachos y las locuras.

Carlos, por hacer que las pijamadas estuvieran completas, por las pláticas y por más locuras.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por el orgullo de pertenecer a la Máxima casa de Estudios, por todo lo que brinda. Por ser hogar a lo largo de estos años.

A mi amada Facultad de Ingeniería, por todos los conocimientos, por hacerme sufrir y disfrutar al máximo, por las personas especiales que aquí conocí.

Al Instituto de Geofísica y, especialmente, al grupo de Exploración y Geomagnetismo por toda la experiencia adquirida, no pude llegar a mejor lugar ni a mejores manos.

A mis sinodales, por las aportaciones a la mejora de este trabajo. Por ser los grandes maestros que son y porque puedo decir también, muy orgullosamente, que son mis amigos:

M. C. Gerardo Cifuentes Nava, padre académico, gracias por contagiarme el amor a lo que haces, por la confianza que me diste, gracias por brindarme tus conocimientos sin reservas y por aquellas veces que me dejaste aprender sola. Gracias porque, a pesar de la distancia, te quedaste conmigo hasta el final.

M. C. David Escobedo Zenil, tutor y segundo padre, gracias por todo el tiempo que no tenías y, aun así, dedicaste a revisar mi trabajo, a corregirme y a enseñarme. Gracias por el impulso a seguir hacia adelante a pesar de las dificultades. Por las charlas, la calma y la alegría.

M. C. Esteban Hernández Quintero, tío académico, gracias por siempre estar al pendiente de mis avances e inquietudes, gracias por el conocimiento que compartiste y todas las aportaciones culturales. Por siempre tener palabras de ánimo y contagiarme tu alegría.

Ing. Alejandro García Serrano, gracias por compartir tantas salidas a campo, gracias por enseñarme de tu humildad, por tu confianza en mí, las pláticas de vida compartidas y por tus palabras de ánimo.

Dr. Andrés Tejero Andrade, gracias por compartir su extenso conocimiento, porque en un desayuno puede despejar las dudas existenciales de las teorías que no entendemos.

Al Departamento de Geofísica de la FI y al programa de Prácticas Profesionales del semestre 2013-2 por llevar a cabo este proyecto. Gracias a todas las personas que participaron, a todos los profesores por su conocimiento y experiencia, a los ayudantes por la organización y trabajo, y al grupo de compañeros que hicieron el trabajo rudo.

A toda mi familia por sus oraciones y apoyo en muchos sentidos. Muy especialmente a mis tías Gely, Guille y Maty, por su amor y por hacer de sus casas un hogar cercano para mí. También especialmente a mi tía Ruth y abue Rosario, por su amor y por siempre estar al pendiente de mí.

A José, por estar a lo largo del camino. Por todas las enseñanzas, por todo lo compartido. Por haber sido amor, apoyo y motivo.

A mis amigos del cubo, desde los que me apadrinaron de peque: Mari, Reno y Pablo, por ser culpables de que acabara en este grupo; hasta mis hermanitos de época: Anita, Bivi, Diego, Héctor y Diana, por las experiencias en campo, por los chismes y las risas. Los quiero.

A todos mis amigos, nombrar a cada uno sería muy extenso pero sé que se saben aludidos. De la carrera, Ketz, Betty, Ceci, Esteban, Geo y los que me faltan, por tantas tareas, desveladas, prácticas, juegos y risas. Del coro, Flor y Oscar, por la música y las palabras. Y a los de toda la vida, por siempre estar a pesar de la distancia, por sus oraciones, por las llamadas, las pláticas, cafés, pelis y demás.

Gracias a todos por ser parte de mí.

Agradezco también a las autoridades de la Universidad Veracruzana, especialmente a la Dra. Beatriz Rodríguez Villafuerte, vice rectora de la zona Orizaba-Córdoba, y al maestro Francisco Arredondo Álvarez, jefe del Departamento de Conservación y Desarrollo de Áreas Verdes, por ser el enlace para que este proyecto se llevara a cabo y por las facilidades otorgadas en el desarrollo del mismo.

Finalmente, se agradece el apoyo otorgado al Proyecto FOMIX CONACYT No. 188908: “Estudios geofísicos y geológicos para detectar y caracterizar inestabilidades en el subsuelo de la 1ra Sección del Bosque”, el cual sirvió para el desarrollo de la metodología de adquisición de datos de este mismo proyecto.

ÍNDICE

RESUMEN	I
1. INTRODUCCIÓN	2
2. ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO	3
2.1 Localización	3
2.2 Geología	5
2.3 Hidrogeología	9
2.3.1 Ejemplos de Zonas Kársticas en la región	11
2.4 Problemática del Sitio	11
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	14
3.1 Teoría Fundamental	15
3.1.1 Fuente Puntual	16
3.1.2 Resistividad Aparente	18
3.1.3 Configuraciones	19
3.2 Tomografía de Resistividad Eléctrica	24
3.3 Teoría Básica de Inversión	25
3.3.1 Método de Elementos Finitos	28

4. METODOLOGÍA	30
4.1 Equipo	30
4.2 Diseño de Adquisición	31
4.3 Adquisición de Datos	32
5. INVERSIÓN 2D Y 3D DE DATOS	36
5.1 Inversión 2D	36
5.1.1 Modelo Directo	39
5.1.2 Modelo Inverso	39
5.1.3 Medición de Error	39
5.2 Inversión 3D	40
5.2.1 Modelo Directo	43
6. RESULTADOS	44
6.1 Perfiles 2D	44
6.1.1 Observaciones y comentarios	49
6.2 Modelo pseudo3D	54
6.2.1 Observaciones y comentarios	55
6.3 Modelo 3D	56
6.4 Integración de resultados	62
7. CONCLUSIONES	65
REFERENCIAS	66

RESUMEN

Se reporta el estudio de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) 2D y 3D realizado en el campus Ixtac de la Universidad Veracruzana, que presenta problemas en las obras civiles existentes, con el fin de analizar la distribución y comportamiento de materiales en el terreno y, con esto, ayudar en la planeación de futuras construcciones.

La geología del lugar está constituida por una capa superficial de depósitos recientes, específicamente un lahar areno-arcilloso, y un basamento de calizas correspondientes a la Formación Orizaba del Cretácico Medio.

En los resultados de la inversión de los datos de TRE2D y TRE3D se observó una concordancia entre las capas geoeléctricas definidas y la geología conocida, y también entre las anomalías de baja resistividad con el patrón hidrológico esperado.

En este trabajo se recomienda una zona para futuras construcciones, que corresponde al área más estable en cuanto a competencia de los materiales.

ABSTRACT

Report of the 2D and 3D Electric Resistivity Tomography (ERT) applied at the Ixtac campus of the Universidad Veracruzana, which presented several problems in the existing civil works, in order to analyze the behavior and distribution of the materials in the ground for a better planning of upcoming building works.

The geological features of the place consist of a shallow layer of recent deposits mainly of a sandy-clay lahar, and a limestone basing belonging to the Orizaba Formation from the Middle Cretaceous.

The 2D ERT and 3D ERT showed concordance between the geoelectric layers defined and the known geology, and between the low resistivity anomalies and the expected hydrological pattern.

The conclusions of the work suggested a new construction area for building according to the stability in terms of competition of the materials in the area.

I. INTRODUCCIÓN

El campus Ixtac de la Universidad Veracruzana (UV) empezó a construirse en mayo del 2004, en un terreno de 50 ha dentro del ejido de Sumidero, donado por la administración del municipio de Ixtaczoquitlán. Esta zona tiene un suelo de tipo acrisol que es constituido principalmente de arcillas. La precipitación pluvial media anual en el municipio es de 1,800 mm, que es muy alta respecto a la precipitación media del país. Está ubicado en la parte central montañosa del Estado, por lo que gran parte del drenaje de las montañas fluye y se concentra en esta área.

Debido a la ganancia y pérdida de humedad, las arcillas se encuentran en constante expansión y contracción, lo que representa una gran inestabilidad en el terreno. Poco tiempo después de la inauguración del campus, los edificios construidos presentaron daños estructurales, tales como agrietamientos, filtraciones de agua, daños en las instalaciones eléctricas subterráneas e incluso deformación de tinacos colocados bajo tierra gracias a la gran presión ejercida por el agua.

Se tienen planes de seguir construyendo en el terreno, sin embargo, las autoridades de la UV decidieron solicitar los estudios necesarios para determinar si es factible seguir construyendo, antes de poner los planes en marcha. El problema a resolver radica en conocer los patrones del flujo de agua en el subsuelo y localizar, si las hay, zonas estables que permitan la construcción. Con esta información, las autoridades correspondientes podrán tomar las mejores decisiones sobre el futuro de los edificios y hacer una reconsideración de los planes que se tienen sobre construir más edificios.

En los últimos treinta años los métodos eléctricos clásicos han desarrollado grandes cambios, reemplazando los sondeos tradicionales de una dimensión por modelos 2D y, más recientemente, también 3D, ampliando el desarrollo y dando a conocer estos métodos autores como Dahlin (2002), Loke (2010), entre otros. Las mediciones que antes se hacían manualmente punto a punto, ahora se realizan por sistemas automáticos con arreglos multielectrónicos, lo cual ha incrementado la calidad de los datos obtenidos (Aizebeokhai, 2010) y, por lo tanto, también el uso de éstos en distintos estudios de hidrogeología, minería y geotecnia.

Para alcanzar el objetivo de este trabajo en la zona norte del Campus Ixtaczoquitlán, se planeó realizar un levantamiento de líneas de Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D. Se eligió la prospección eléctrica por el gran desarrollo mencionado de la técnica, que ha dado muy buenos resultados en la detección de zonas saturadas, estructuras y diferenciación de materiales.

2. ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 Localización

El Estado de Veracruz se encuentra al este de la República Mexicana, con un territorio que abarca 74,420 km². En la zona centro del Estado se encuentra el municipio de Ixtaczoquitlán que limita al norte con Atzacan; al este con Fortín de las Flores y Naranjal; al sur con Tequila y Magdalena, y al oeste con Tlilapan, Rafael Delgado, Orizaba y Atzacan (Fig. 2.1.1).

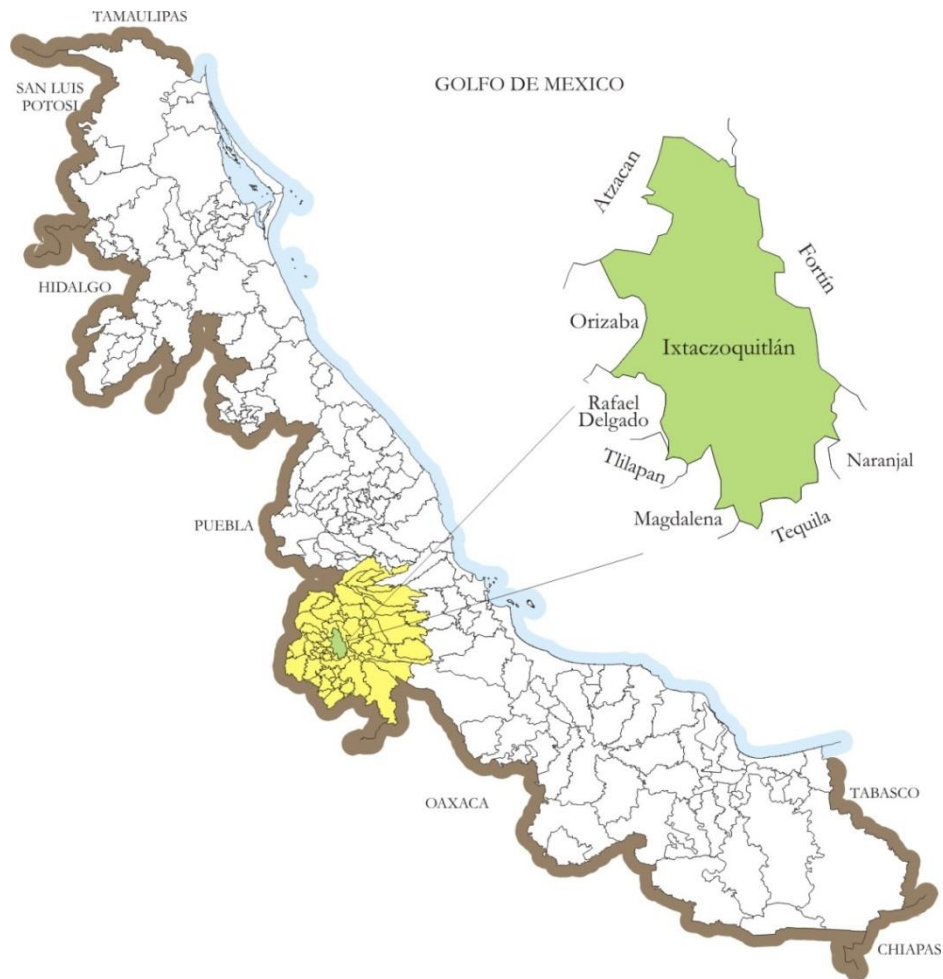


Figura 2.1.1 Mapa del Estado de Veracruz con acercamiento al municipio de Ixtaczoquitlán (Municipio de Ixtaczoquitlán, Ver., 2007).

La Unidad de Servicios Bibliotecarios y de Información (USBI) pertenece a este municipio, se encuentra ubicada en las coordenadas 18°54'53.2" de latitud norte y 97°01'41.4" de longitud oeste, a 1,093 metros sobre el nivel del mar (Fig. 2.1.2).



Figura 2.1.2 Vista de los edificios del campus USBI Ixtac con coordenadas (Global Mapper).

El campus consta de un terreno de casi 50 ha, que fue donado por el Gobierno del Estado de Veracruz a la Universidad Veracruzana en el cual se planea construir más edificios para trasladar sus facultades a este lugar. La delimitación de dicho terreno y los edificios actuales pueden verse en la figura 2.1.3, realizada en el *software* Global Mapper.



Figura 2.1.3 Se muestra el terreno total perteneciente a la UV (Global Mapper).

2.2 Geología

Dentro del Estado de Veracruz hay una gran variedad de rocas y sedimentos con características, edades y composiciones diferentes. Rodríguez Elizarrarás (2011) da una descripción geológica importante del Estado de Veracruz y, en particular, de la zona que nos interesa, trabajo del cual se tomó gran parte de la información presentada a continuación.

En los alrededores de Altotonga, en la región central del Estado de Veracruz, se encuentran afloramientos de rocas del Paleozoico Superior que consisten de una secuencia de filitas y esquistos de biotita. Éstos constituyen el basamento de la secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas que se formaron en el Mesozoico y Cenozoico.

Durante el Cretácico se desarrollaron grandes espesores de depósitos calcáreos que fueron depositados en mares someros; algunas reconstrucciones paleográficas definieron lo que se conoce como la Plataforma de Córdoba. Estos depósitos formaron importantes bancos de calizas que afloran predominantemente en la zona central del Estado, entre Tlapacoyan y la región de Orizaba. Algunas de las formaciones más importantes durante ese periodo son las nombradas Formación Orizaba, Caliza Maltrata y Formación Guzmantla.

Durante el Terciario Inferior y Medio se inició una regresión marina hacia el este; como consecuencia de esto se depositó un espesor de más de 3,000 m de sedimentos terrígenos sobre la plataforma mesozoica de Córdoba, definidos bajo el nombre de formaciones Chicotepec-Velasco, Aragón, Guayabal, Chapopote, Horcones y La Laja. Unidades litoestratigráficas que están constituidas por series alternantes de lutitas y areniscas.

La región de Orizaba pertenece a la provincia geológica de la sierra Madre Oriental, constituida por calizas y lutitas estratificadas, las cuales conforman el basamento pre-volcánico de la zona. Su dirección de orientación es NW-SE y existe un patrón de fracturamiento perpendicular a esta dirección (NE-SW), el cual condiciona la red de drenaje en las calizas.

La Formación Orizaba es de edad Cretácico Medio, la unidad litoestratigráfica consta de estratos de calizas de color blanco a gris con espesores de entre 2 y 4 metros, formadas de corales, rudistas y gasterópodos, de ambiente de plataforma y arrecifal. El suelo está constituido principalmente de arcillas, es un suelo pobre en nutrientes y susceptible a la erosión. En el mapa geológico del municipio (Fig. 2.2.1) puede verse la distribución de materiales en el suelo, que consta de rocas sedimentarias y depósitos recientes, éstos últimos cubriendo en su totalidad, el área de interés.

Los depósitos relacionados con eventos de tipo lahar y flujos de lodo y escombros, ocurridos en el pasado, son abundantes en la zona y están asociados con erupciones volcánicas o con lluvias torrenciales durante la historia del volcán Citlaltépetl. En algunos sitios cubren discordantemente las rocas calcáreas del Cretácico, sirviendo toda la red del drenaje como cauce para el emplazamiento de los flujos piroclásticos y lahares.

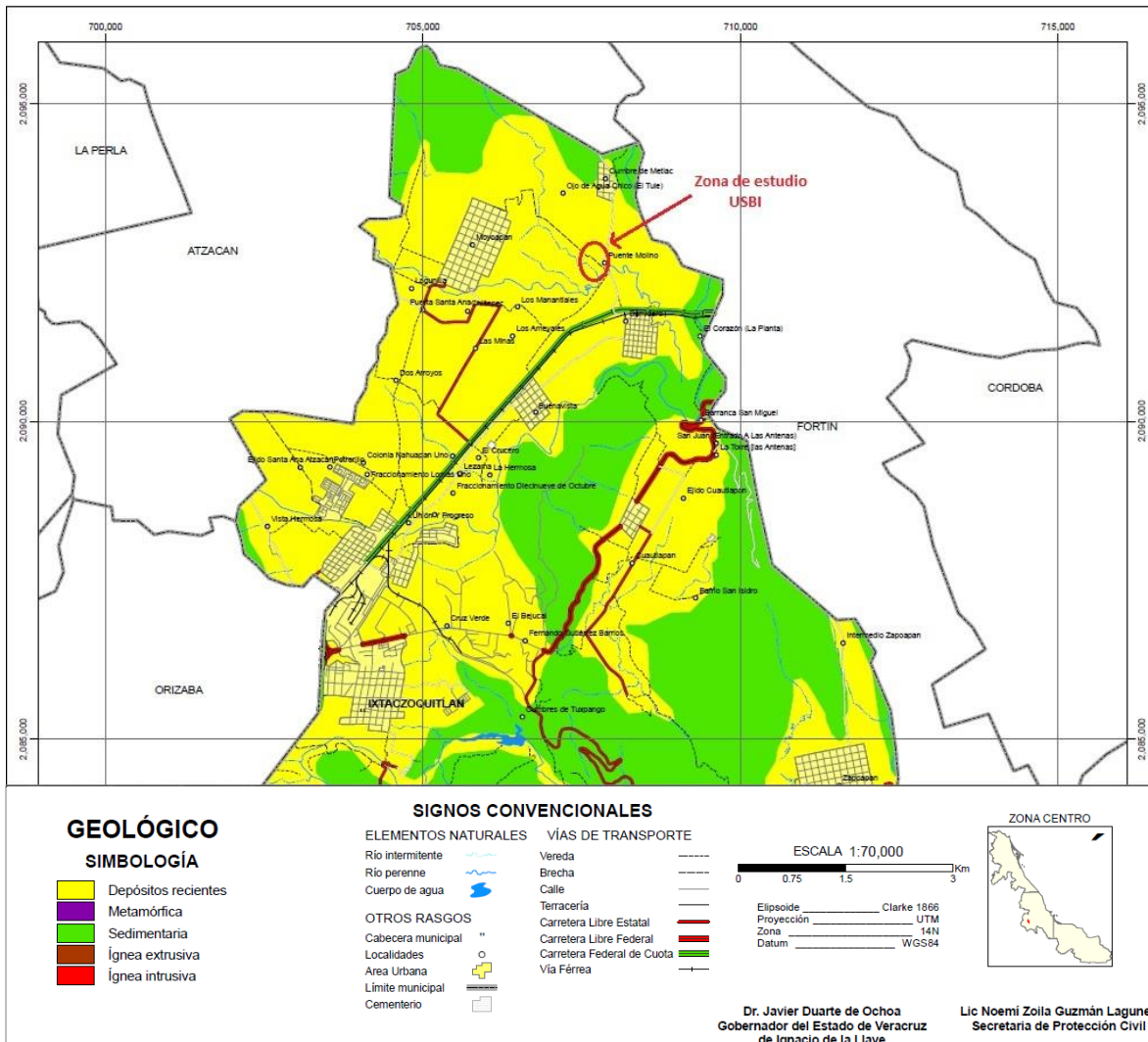
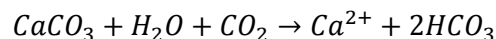


Figura 2.2.1 Mapa geológico de Ixtaczoquitlán (Modificada de Atlas Municipal de Ixtaczoquitlán, 2011).

La caliza es una de las rocas sedimentarias más abundantes en la naturaleza, cuyo mineral principal constituyente es la calcita (CaCO_3). Este mineral es disuelto en la naturaleza, por un proceso de intemperismo químico llamado hidrólisis, que es parte del ciclo hidrológico y consiste en que el agua, al absorber el bióxido de carbono (CO_2) contenido en la atmósfera y en los suelos, tiende a formar un ácido relativamente débil conocido como ácido carbónico, que produce una reacción química reversible, expresada como:



La disolución de las calizas está controlada principalmente por la adición o pérdida de bióxido de carbono y la existencia de grandes cantidades de agua en el subsuelo. Además de la presencia de CO_2 en la atmósfera, la actividad biológica de la vegetación es uno de los grandes productores de este compuesto; por lo tanto, en las regiones con una densa

cobertura vegetal, especialmente a nivel de raíces, la reacción química antes mencionada tiende a acelerarse.

Desde un punto de vista geomorfológico, se utiliza el término de sistema kárstico o karst para referirse a una región con abundantes manifestaciones de disolución en rocas carbonatadas. Las expresiones superficiales de los hundimientos kársticos se conocen como dolinas, que son depresiones generalmente de forma circular o elíptica, resultantes del alineamiento de varias formas circulares con un claro control estructural asociado a fallas y fracturas en las rocas. La expresión subterránea de la disolución kárstica es la formación de cavernas y ríos subterráneos.

Las arcillas son minerales pertenecientes al grupo de filosilicatos, formados a partir de la alteración de silicatos hidratados, cuyas partículas son de tamaño menor a $2\ \mu\text{m}$. Su estructura en capas es característica, constituida por dos capas unidas por oxígenos comunes, una está formada por tetraedros que se enlazan con los tres oxígenos de los vértices, otra por octaedros unidos entre sí por aristas comunes. El centro de los tetraedros está ocupado por Si^{4+} frecuentemente sustituidos por Al^{3+} o, menos común, por Fe^{3+} ; mientras el centro de los octaedros está ocupado normalmente por Al^{3+} , Mg^{2+} y Fe^{2+} , otras veces por Fe^{3+} , Li^{+} y otros elementos de transición (González de Vallejo, L., 2002).

Las propiedades físico-químicas de los minerales de arcilla se relacionan con los procesos de intercambio en la región interlamina y con el tamaño de los cristales y agregados de las partículas arcillosas. La carga eléctrica es una de las propiedades más importantes que intervienen en la interacción entre las arcillas, las láminas de éstas no son eléctricamente neutras pues se dan sustituciones de cationes por otros con distinta carga, lo cual hace que las fuerzas que unen las láminas sean menores que las fuerzas existentes entre iones de una misma lámina (García Romero, E., Suárez Barrios, M., s.f.).

Las arcillas son materiales geotécnicamente problemáticos pues las propiedades tales como la plasticidad, resistencia, compresibilidad y cambio de volumen dependen de la composición mineral y de las condiciones geoquímicas y ambientales del medio. La capacidad de absorción de las arcillas está relacionada con la capacidad de cambio catiónico y con la superficie específica. Las moléculas de agua se unen a la superficie de las partículas por enlaces dipolares que favorecen la agrupación de las partículas rodeándolas de una película de agua. Dos procesos que generalmente se dan juntos son la absorción, cuando son procesos físicos como retención por capilaridad; y la adsorción, que involucra una interacción química entre la arcilla y el fluido (González de Vallejo, L., 2002).

Existe un fenómeno llamado tubificación que se da principalmente en suelos granulares. Las fuerzas de filtración pueden arrastrar partículas de suelo y este arrastre puede dejar ductos o cavidades; si el proceso evoluciona, pueden hacerse ductos continuos a lo largo de líneas de corriente del flujo de agua, causando erosiones de gran magnitud (Xiangyue Li y Víctor Arroyo, 2011).

2.3 Hidrogeología

En el país se tiene una precipitación media anual de 770 mm; en el Estado de Veracruz ronda los 1,400 mm por año, que es casi el doble (Atlas Digital del Agua México, 2012). Mientras que en el municipio de Ixtaczoquitlán, que es el de nuestro interés, el valor de la precipitación media anual está alrededor de los 1,800 mm.

Ixtaczoquitlán se encuentra en la Región hidrológica Papaloapan en la cual se registra una precipitación media anual de 1,460 mm, ocupando el tercer lugar en el país, y un escurrimiento natural medio superficial interno de 48,176 hm³/año ocupando el segundo lugar en este aspecto de las 37 Regiones Hidrológicas en el país (Atlas Digital del Agua México, 2012).

Esta Región se divide en 18 Cuencas Hidrológicas, Ixtaczoquitlán está ubicado en la llamada Cuenca del río Papaloapan. El sistema fluvial de esta cuenca ocupa el segundo lugar en importancia del país por su gran caudal. Con un escurrimiento medio anual de 47,000 millones de m³, vertiendo sus aguas al Golfo de México, a través de la Laguna de Alvarado (Pereyra Díaz, D., Pérez Sesma, J y Salas Ortega, M., 2010).

A su vez, ésta se divide en 12 subcuencas siendo de nuestro interés la del río Blanco (Fig. 2.3.1) que nace en la Sierra de Zongolica y Faldas del Pico de Orizaba a una altura de 3,700 msnm. La cuenca recibe ese nombre pues el río Blanco es el rasgo físico más importante por ser el mayor afluente de la zona. Es una subcuenca moderadamente ramificada, con dirección NE-SW desde su nacimiento hasta llegar al municipio de Ciudad Mendoza donde toma una dirección W-E.

Una red de arroyos que baja de la montaña, riega el municipio de Ixtaczoquitlán y vierte sus aguas en el río Blanco. Dentro de los principales arroyos de esta red están los de Campo Chico, La Cotorra, Capoluca y Tuxpanguillo. El río Blanco y los arroyos mencionados, forman la Cascada de Tuxpango. Existen además los ríos: Zonzo, Tendido, Escamela y Cautlapan (Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México, s/f).

El arroyo Los Berros pasa, en su punto más cercano, a 50 m de uno de los edificios del campus de la Universidad uniéndose, a 200 m aproximadamente, al río Zonzo el cual se ha desbordado en algunas ocasiones, afectando a las viviendas aledañas.

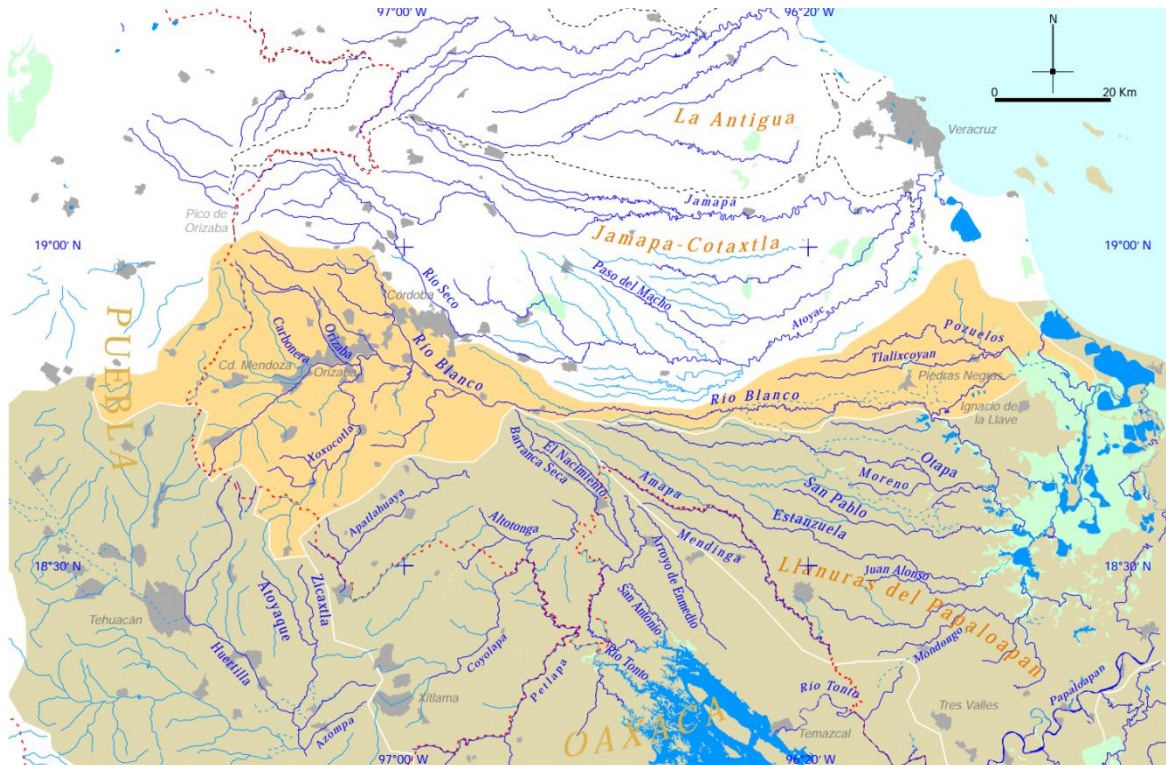


Figura 2.3.1 Subcuenca hidrográfica Río Blanco en color amarillo (Pereyra D., Pérez S., Salas O., 2010).

El agua es el fluido más comúnmente encontrado durante las construcciones de obras de ingeniería. Al paso del agua a través de la superficie del terreno se le da el nombre de infiltración, y a su movimiento hacia abajo hasta alcanzar la zona de saturación, se le denomina percolación. Los depósitos superficiales permiten la infiltración a través de sus poros; las cubiertas ricas en arcilla retardan la entrada del agua y tienen la característica de retener la humedad después de los periodos de lluvia (Blyth, F.G.H., de Freitas, M.H., 1998).

La vegetación protege la estructura porosa de muchos depósitos superficiales; los terrenos cubiertos por vegetación tienen una infiltración más uniforme que el terreno desnudo. La infiltración cesa una vez que los vacíos internos del terreno se llenan del agua que se mueve a distintas velocidades en el terreno, esta velocidad depende de la trayectoria del flujo: los flujos cercanos a la superficie se mueven con mayor rapidez y son los que normalmente alimentan a los manantiales.

Las investigaciones geohidrológicas que permiten hacer predicciones de la influencia del agua subterránea sobre las obras de ingeniería, o de su potencial como una fuente de suministro de agua, pueden seleccionarse para valorar lo siguiente (Blyth, F.G.H., de Freitas, M.H., 1998):

- Localización y espesor de los horizontes o zonas acuíferas, su confinamiento y sus límites geohidrológicos.
- Los niveles del agua en el terreno, su variación en un área determinada y su fluctuación con el tiempo.
- El almacenaje y carácter transmisivo del terreno.
- La calidad del agua subterránea.

2.3.1 Ejemplos de Zonas Kársticas en la región

1. En la región Orizaba-Córdoba es común la ocurrencia de fenómenos de caída de bloques y detritos derivados de los cerros que rodean a estas ciudades. La geología predominante en esta región está conformada por calizas y lutitas del Cretácico Medio y forma parte de la provincia geológica del Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas, de acuerdo con la clasificación de Ortega Gutiérrez et al, 1992 (Citado por Rodríguez E., 2011).
2. El Cerro del Borrego ubicado en la ciudad de Orizaba está constituido por calizas estratificadas, plegadas e intensamente fracturadas con evidentes signos de disolución kárstica.
3. La región de Súciles y Tezonapa, ubicado al sureste de la ciudad de Córdoba, consiste de potentes espesores de rocas calcáreas, lutitas y areniscas del Mesozoico. Una de las características más importante de esta zona es la marcada presencia de topografía kárstica con abundante formación de dolinas. Esto ha generado la existencia de un complejo sistema de drenaje subterráneo que acelera de disolución de las rocas carbonatadas y favorece la ocurrencia de hundimientos y colapsos de terreno en ciertas áreas (Rodríguez E., 2011).

2.4 Problemática del Sitio

Previo al inicio de la construcción de los edificios existentes actualmente, los ingenieros de la Universidad Veracruzana realizaron análisis de pendientes y escurrimientos naturales del terreno.

Al establecer el contacto con el equipo de Geofísica e Ingeniería de la UNAM para la realización del presente estudio, las autoridades de la UV proporcionaron algunas imágenes de los mapas que realizaron y de fotografías tomadas en el proceso de construcción. En este apartado se mostrarán algunas de ellas para esclarecer la problemática en el sitio.

En la figura 2.4.1 se muestra un mapa de drenado natural, donde se observa que la dirección del escurrimiento por el terreno es hacia la zona de construcción y, ahí, hay otra dirección que va a través de ella. Se puede observar el arroyo Los Berros, muy cercano, a la izquierda del área de edificios y su unión a un río más caudaloso, llamado río Zonzo.



Figura 2.4.1 Mapa de drenado natural, con la zona de construcción dentro del recuadro rojo (Modificada de Francisco Arredondo, Universidad Veracruzana).

Con el fin de observar el comportamiento del suelo hicieron algunos cortes de poca profundidad y encontraron sitios en los que el agua fluye libremente, no entre las partículas de las arcillas sino ya por cavidades más grandes correspondientes al fenómeno de tubificación (izq. Fig. 2.4.2). Sin embargo, notaron también que en época de secas, el suelo empieza a agrietarse fuertemente a causa de la contracción que sufren las arcillas por la pérdida de humedad (der. Fig. 2.4.2).

De acuerdo con el fenómeno presentado se puede clasificar a las arcillas de este sitio como expansivas, que son aquellas que presentan grandes cambios de volumen ante cambios en el grado de humedad. Cuando se humedecen presentan una gran expansión pero al perder tal humedad, se contraen considerablemente (Crespo Villalaz, C., 2004).



Figura 2.4.2. A la izquierda, se aprecia el agua fluyendo a través de las arcillas. A la derecha, arcillas agrietadas debido a la pérdida de humedad (Francisco Arredondo, Universidad Veracruzana).

También realizaron modificaciones hidráulicas en el terreno con el objeto de encauzar el agua subterránea; sin embargo, tales modificaciones no dieron los resultados esperados ya que al poco tiempo de terminar las construcciones, tuvieron problemas de inundación, infiltración y agrietamiento en los edificios, causado por la inestabilidad mencionada de las arcillas. Además, la gran cantidad de agua ejerce mucha presión en el subsuelo, lo que ha causado fallas en el cableado eléctrico subterráneo y pérdidas de tinacos enterrados, al ser aplastados por la misma razón.



Figura 2.4.3 Cimientos de la Biblioteca con inundación en el interior de la estructura (Francisco Arredondo, Universidad Veracruzana).

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los métodos eléctricos y magnéticos están gobernados por las Ecuaciones de Maxwell, por lo que se requiere un conocimiento de las propiedades electromagnéticas de las rocas y minerales. Estas propiedades son la resistividad eléctrica ρ (o su inverso, la conductividad σ), la permitividad eléctrica ϵ y la permeabilidad magnética μ .

El objetivo de los sondeos eléctricos es determinar la distribución de resistividad ρ en el subsuelo haciendo mediciones en la superficie, a partir de las cuales puede estimarse la resistividad real.

Cada tipo de roca tiene rangos de valores de resistividad, que depende de las condiciones en que se encuentre, como del porcentaje de saturación, entre otras (Tabla 3.1).

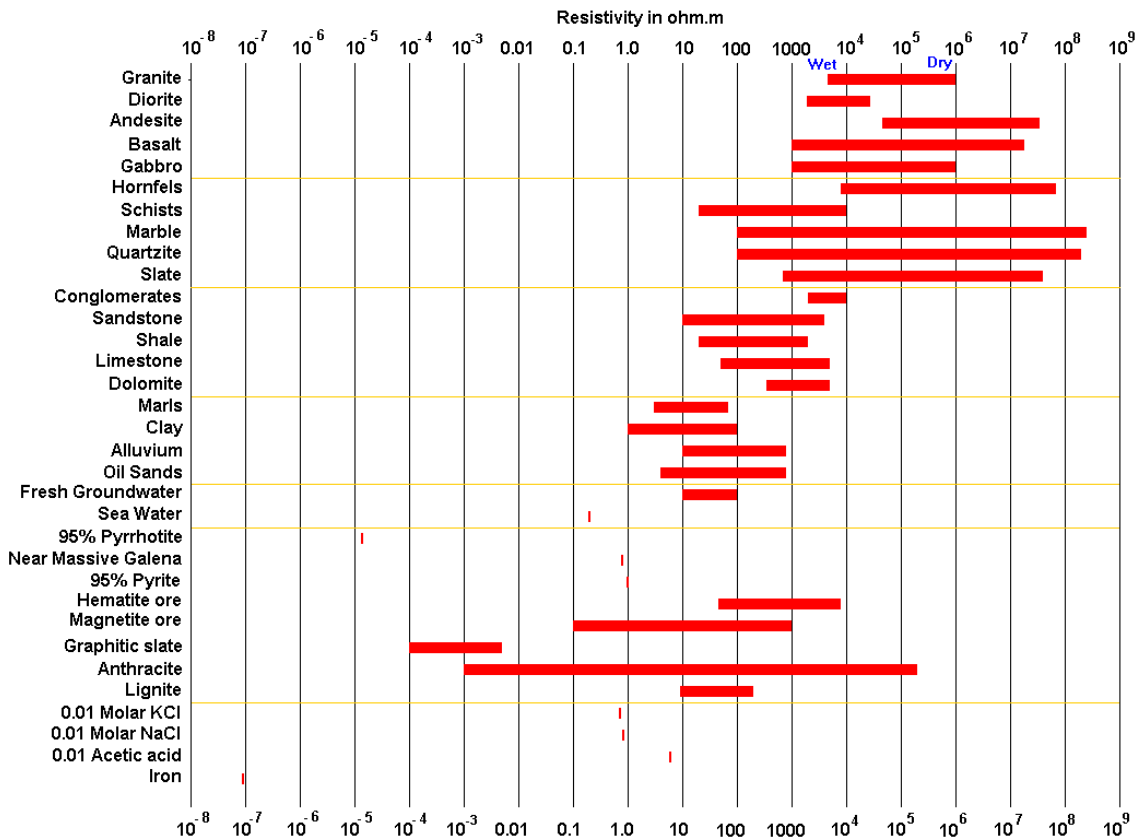


Tabla 3.1 Tabla de resistividades de algunas rocas, minerales y soluciones (Loke, 2010).

3.1 Teoría Fundamental

Las Ecuaciones de Maxwell se expresan como:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.1.1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.1.2)$$

En este caso tenemos una corriente estacionaria, por lo que las ecuaciones se reducen a la forma:

$$\nabla \times E = 0 \quad (3.1.3)$$

$$\nabla \times H = J \quad (3.1.4)$$

Para el método eléctrico en corriente directa (DC) la ecuación (3.1.3) es la de interés y nos dice que el campo eléctrico E es conservativo, derivando un potencial escalar U . Si consideramos una fuente puntual, las ecuaciones que rigen al campo eléctrico son (Cifuentes, 1994):

$$\nabla \times E = 0$$

$$\nabla \cdot E = I\rho\delta \quad (3.1.5)$$

$$E = -\nabla U \quad (3.1.6)$$

$$\nabla^2 U = -I\rho\delta \quad (3.1.7)$$

Para un medio homogéneo e isotrópico, la densidad de corriente J en un punto tiene la misma dirección y sentido que el campo eléctrico en el mismo punto (Orellana, 1982)

$$J = \sigma E \quad (3.1.8)$$

También debe cumplirse la ecuación de continuidad sin la parte temporal

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (3.1.9)$$

Si combinamos (3.1.8) y (3.1.9) tenemos que:

$$\nabla \cdot J = \nabla \cdot (\sigma E) = 0 \quad (3.1.10)$$

Desarrollando (3.1.10):

$$\nabla \cdot (\sigma E) = \sigma \nabla \cdot E + E \nabla \sigma = -\sigma \nabla \cdot \nabla U + E \nabla \sigma = -\nabla^2 U + E \nabla \sigma = 0 \quad (3.1.11)$$

Al ser un medio isotrópico y homogéneo, la conductividad será uniforme, entonces:

$$\nabla \sigma = 0 \quad (3.1.12)$$

y, por lo tanto, el potencial satisface la ecuación:

$$\nabla^2 U = 0 \quad (3.1.13)$$

que es la Ecuación de Laplace para una región donde no existe fuente.

3.1.1 Fuente Puntual

El potencial producido por una fuente puntual en la frontera de un semiespacio de resistividad ρ y otro de resistividad infinita puede expresarse como la solución del siguiente problema (Cifuentes, 1994):

$$\nabla^2 U(\vec{r}) = -I\rho\delta(\vec{r}); \quad z > 0 \quad (3.1.14)$$

$$\frac{\partial U(\vec{r})}{\partial \eta} = 0; \quad z = 0 \quad (3.1.15)$$

$$\frac{\partial U(\vec{r})}{\partial \eta} = 0; \quad r \rightarrow \infty \quad (3.1.16)$$

Con las funciones de Green, la solución del problema se expresa como:

$$U(\vec{r}) = - \int_V G(\vec{r}, \vec{r}') \nabla^2 U(\vec{r}) dv + \int_S \left(G(\vec{r}, \vec{r}') \frac{\partial U(\vec{r})}{\partial \eta} - U(\vec{r}) \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}')}{\partial \eta} \right) ds \quad (3.1.17)$$

Donde la función de Green satisface:

$$\nabla^2 G(\vec{r}) = -\delta(\vec{r}, \vec{r}'); \quad z > 0 \quad (3.1.18)$$

$$\frac{\partial G(\vec{r})}{\partial \eta} = 0; \quad z = 0 \quad (3.1.19)$$

$$\frac{\partial G(\vec{r})}{\partial \eta} = 0; \quad r \rightarrow \infty \quad (3.1.20)$$

Y la función de Green para el problema planteado, que satisface las ecuaciones anteriores, es:

$$G(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}} + \dots \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}} \right) \quad (3.1.21)$$

Sustituyendo (3.1.14), (3.1.15) y (3.1.19) en (3.1.17), el potencial $U(\vec{r})$ queda:

$$U(\vec{r}) = I\rho \int_V G(\vec{r}, \vec{r}') \delta(\vec{r}') dv \quad (3.1.22)$$

Donde la integral, de acuerdo con las funciones impulsos, es:

$$\int_V G(\vec{r}, \vec{r}') \delta(\vec{r}') dv = G(\vec{r}, h) \quad (3.1.23)$$

donde $\delta(\vec{r}) = \delta(x', y', z' - h)$

Sustituyendo (3.1.23) en (3.1.22) se tiene que:

$$U(\vec{r}) = I\rho G(\vec{r}, h) \quad (3.1.24)$$

Y (3.1.21) en (3.1.23):

$$U(\vec{r}) = \frac{I\rho}{4\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2}} \right] \quad (3.1.25)$$

La fuente puntual se localiza en la interface, o sea que $h=0$, y por lo tanto el potencial:

$$U(\vec{r}) = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r} \quad (3.1.26)$$

donde $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ (distancia del electrodo a cualquier punto en el medio).

En la práctica se utilizan dos electrodos de corriente, una positiva $+I$ y otra negativa $-I$. El potencial en un punto a partir un par de electrodos de corriente, según la ecuación 3.1.26 es (Aizebeokhai, 2010):

$$U(\vec{r}) = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{C1}} - \frac{1}{r_{C2}} \right) \quad (3.1.27)$$

3.1.2 Resistividad Aparente

Lo que se mide en los sondeos eléctricos es la diferencia de potencial entre dos puntos que, en teoría, debe medirse con los electrodos que inyectan la corriente; sin embargo, no se sabe la influencia real de las resistencias entre el subsuelo y los electrodos de corriente (Cheng et al, 1990 citado por Aizebeokhai, 2010). Entonces lo que se hace generalmente es utilizar cuatro electrodos, los dos de corriente, que podemos llamar A y B, y dos para medir la diferencia de potencial, que llamaremos M y N. La diferencia de potencial para un arreglo típico con estos cuatro electrodos puede medirse en un semiespacio homogéneo con la ecuación:

$$\Delta V = U_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (3.1.28)$$

Ahora bien, si se tiene una superficie equipotencial, en la cual la corriente fluye radialmente (Fig. 3.1.1), y se realizan mediciones del potencial en ese medio homogéneo de resistividad ρ , el valor calculado de la misma sería verdadero en cualquier punto. Pero en la realidad, los medios son heterogéneos, por lo que el valor de la resistividad cambiará según el punto en que se mida, obteniendo una resistividad aparente del semiespacio (Cifuentes, 1994).

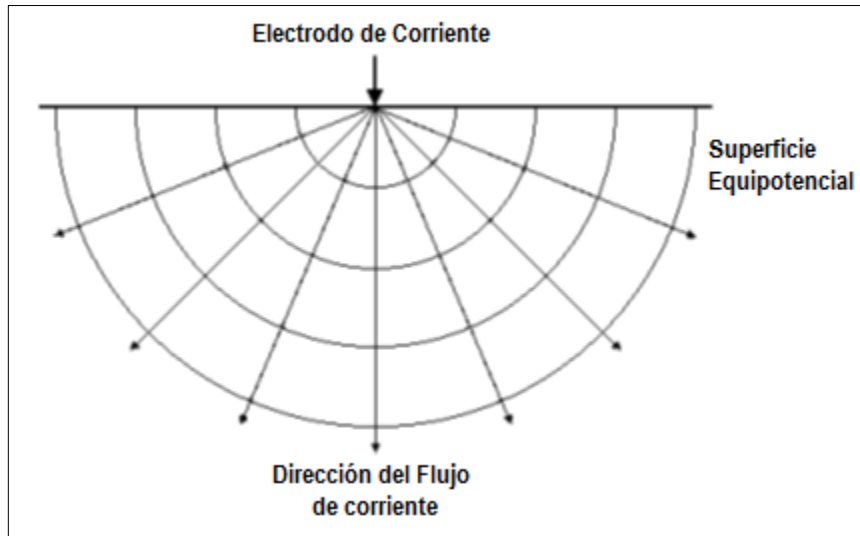


Figura 3.1.1 Distribución del flujo de corriente en una superficie equipotencial (Modificada de Loke, 2010).

Entonces la resistividad aparente depende de la configuración electródica, es decir, de la posición de los electrodos y las distancias entre éstos, así como de la intensidad de corriente y de la diferencia de potencial, lo cual queda expresado con la ecuación siguiente:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3.1.29)$$

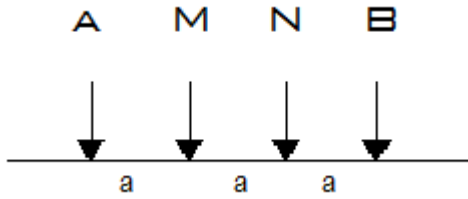
Donde K es el factor geométrico que depende del arreglo electródico que se utilice.

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (3.1.30)$$

3.1.3 Configuraciones

Dependiendo de la disposición de los electrodos pueden definirse diferentes arreglos. Los más comunes son Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo, polo-polo, polo-dipolo y recientemente, Wenner-Schlumberger. Elegir uno u otro arreglo depende del objetivo que se tenga; existen varios factores a considerar como el tipo de estructuras geológicas que se esperan, la profundidad de investigación deseada, la sensibilidad del arreglo y la fuerza de la señal del mismo.

Wenner

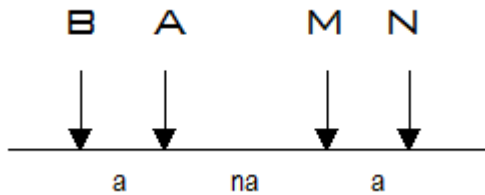


Factor Geométrico:

$$K = 2\pi a$$

Este arreglo conserva el mismo espaciamiento entre electrodos, es sensitivo a cambios verticales de resistividad debajo del centro del arreglo y menos sensitivo a cambios horizontales, esto quiere decir que es bueno para detectar estructuras horizontales y pobre para las estructuras verticales. La profundidad media de investigación es aproximadamente 0.5 veces el espaciamiento 'a'. La fuerza de la señal es inversamente proporcional al factor geométrico por lo que el arreglo Wenner tiene la señal más fuerte de los arreglos comunes.

Dipolo - dipolo

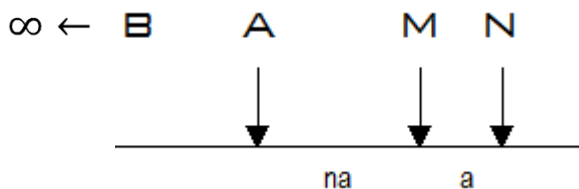


Factor Geométrico:

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

Es ampliamente utilizado debido al bajo acoplamiento electromagnético. Es un arreglo muy sensitivo a los cambios horizontales, por lo que es bueno para detectar estructuras como diques, pero poco sensitivo para los cambios verticales de resistividad. La profundidad media de investigación ronda entre el 20% y el 30% de la longitud total del arreglo. La desventaja es que la fuerza de la señal es muy baja.

Polo - dipolo



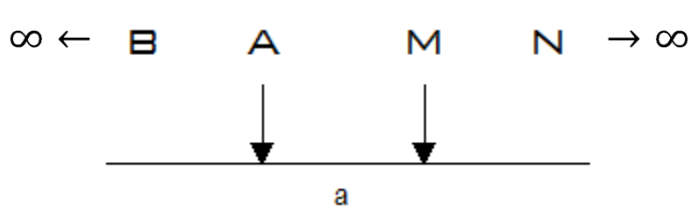
Factor Geométrico:

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

El arreglo polo-dipolo tiene relativamente buena cobertura horizontal y una fuerza de señal ligeramente más grande que la del dipolo-dipolo. Las anomalías que se producen son

asimétricas debido a la configuración del arreglo, para evitar este efecto puede hacerse el mismo levantamiento pero en sentido contrario.

Polo – polo

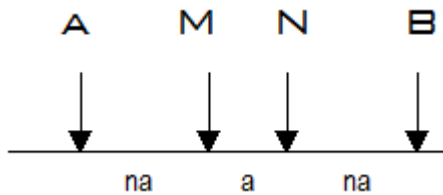


Factor Geométrico:

$$K = 2\pi a$$

Este arreglo utiliza únicamente un electrodo de corriente y uno de potencial; sin embargo, este arreglo ideal no existe en la práctica, así que los electrodos de corriente y potencial B y N, se deben colocar a una distancia mínima de 20 veces la separación máxima de 'a' para asumir el infinito. Este arreglo tiene una amplia cobertura horizontal y la profundidad de investigación es grande pero es el arreglo con más baja resolución.

Wenner – Schlumberger

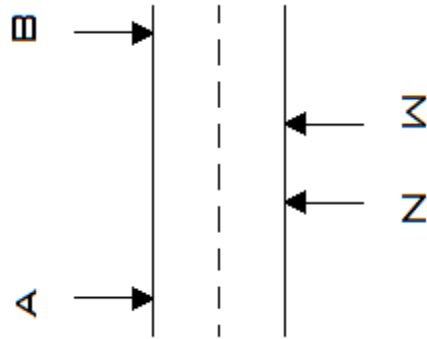


Factor Geométrico

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

El arreglo utilizado en este trabajo fue el Wenner-Schlumberger que, como se supone del nombre, es un híbrido de los arreglos Wenner y Schlumberger. Es moderadamente sensitivo tanto a estructuras verticales como a horizontales, útil en donde se esperan cuerpos con extensión en ambas direcciones; la fuerza de la señal es inversamente proporcional al cuadrado de n . La profundidad de investigación aproximada para este arreglo es la quinta parte de la longitud total del tendido.

Equatorial Wenner-Schlumberger



Este arreglo consiste en tener dos líneas paralelas de igual número de electrodos y mismo espaciamiento entre éstos, se toman los electrodos de corriente siempre de una misma línea y para los de potencial se usan únicamente los de la otra línea. Como el punto de atribución se coloca en el centro geométrico, se obtienen datos en un plano justo entre las dos líneas de tendido (línea punteada en la figura).

Existen muchos arreglos no convencionales que han sido desarrollados y estudiados, tales como el arreglo de Gradiente Múltiple en el que se van cambiando de posición los electrodos de potencial mientras los de corriente se mantienen fijos.

Cada dato medido se coloca geoméricamente en el espacio, que puede visualizarse como un pequeño punto, el cual se conoce como Punto de Atribución. Éste se ubica en el centro geométrico del arreglo por lo que al final de la adquisición se tiene un área del subsuelo cubierto por muchos puntos de atribución. Según el arreglo que se utilice, cambia ligeramente la disposición de estos puntos así como la profundidad de investigación; los detalles sobre este tema en particular se encuentran en el trabajo de Edwards (1977). Para el arreglo Wenner-Schlumberger utilizado en este trabajo se muestra en la figura 3.1.2 la disposición de los puntos de atribución para un tendido de 48 electrodos espaciados a 10 metros, alcanzando una profundidad de investigación de 90 metros aproximadamente.

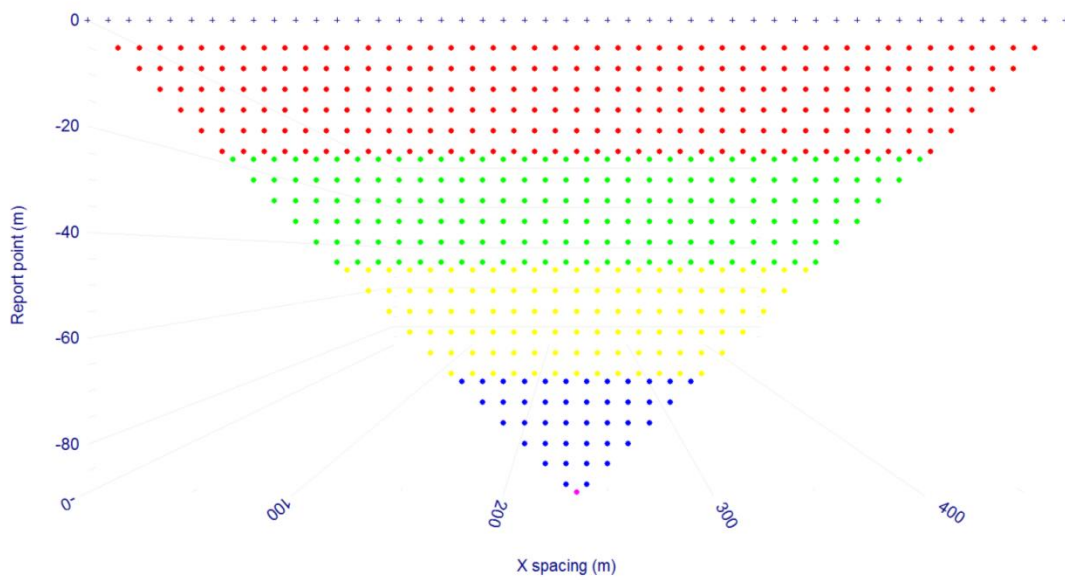


Figura 3.1.2 Puntos de atribución para un arreglo Wenner-Schlumberger.

El primer nivel de datos tomados con un arreglo equatorial queda ligeramente más profundo que el de datos adquiridos con el arreglo convencional. Pero el número de niveles es el mismo, así como el total de quadripolos que se miden (Fig. 3.1.3).

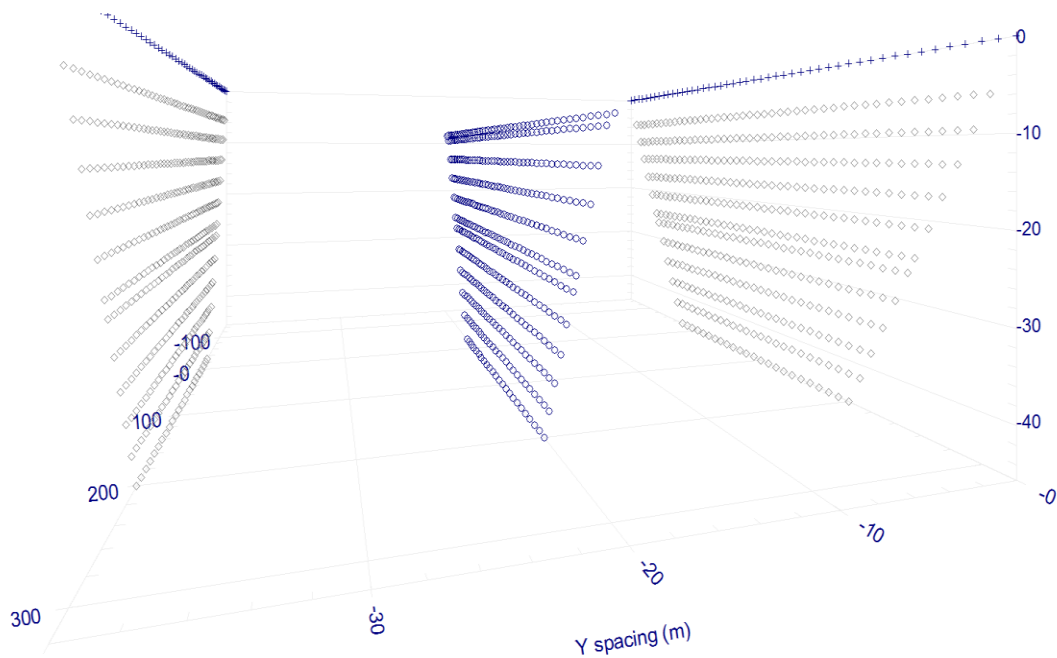


Figura 3.1.3 Puntos de atribución para un arreglo equatorial en color azul, donde los electrodos se observan representados con pequeñas cruces azules en la parte superior de los perfiles extremos.

3.2 Tomografía de Resistividad Eléctrica

Los Sondeos Eléctricos tienen una gran desventaja al considerar los cambios de resistividad en una sola dirección. Es por esto que en la década de los 80 empezó a desarrollarse el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), que es una combinación del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y el Perfilaje Eléctrico, es decir, que toma en cuenta la variación de resistividad tanto en la vertical como los cambios horizontales debajo de la línea del tendido pero constantes en la dirección perpendicular a la línea del tendido. El resultado, al ser en dos dimensiones, es un modelo más preciso del medio, siendo el objetivo de la TRE obtener la distribución de la resistividad en el subsuelo.

La base del método parte de los 4 electrodos mencionados anteriormente, dos de corriente y dos de potencial. En los inicios de esta técnica, los electrodos tenían que ser cambiados de posición punto a punto lo cual resolvía problemas de precisión del modelo y cantidad de ruido pero no lograba reducir el tiempo de adquisición. Esto implicaba generar modelos 1D los cuales, posteriormente, se interpolaban entre sí para generar un mapa de pseudo resistividades.

Gracias a la automatización de los sistemas, ahora es posible colocar varios electrodos con el mismo espaciamiento sobre una línea; generalmente se utilizan más de 20 electrodos pero pueden ser menos; entonces el sistema elige automáticamente los 4 electrodos que usará en cada punto, lo cual permite realizar los levantamientos hasta 10 veces más rápido de lo que se hacía antes. Además, los errores se reducen considerablemente, tales como resistencias de contacto muy altas o mala transcripción de los valores medidos, entre otros.

Los electrodos son conectados a un cable *multi-core* y éste, a su vez, a un sistema integrado por un resistivímetro con un *switch* electrónico. La secuencia de medición se realiza previamente desde una computadora y es cargada después al equipo, que selecciona automáticamente los cuadripolos para cada medición.

Para lugares en los cuales se requiere una gran cobertura horizontal se puede utilizar la técnica del *roll along* que consiste en pasar electrodos del inicio al final del tendido para no perder información a profundidad. Pueden hacerse del 25%, 50% o 75% según el objetivo de estudio. Al realizar la adquisición de los datos, los puntos de atribución que se tomaron en el primer tendido no se toman nuevamente.

Los efectos de estructuras tridimensionales son más pronunciados en investigaciones ambientales donde la geología es altamente heterogénea, muchas veces los resultados de datos adquiridos con TRE2D presentan características alteradas por efectos 3D que no son tomados en cuenta. Por esta razón se dio paso a las técnicas de adquisición 3D que toman en cuenta las variaciones de resistividad en todas las direcciones y que, por lo tanto, deben dar resultados más precisos y confiables del medio estudiado (Aizebeokhai, 2010).

Idealmente, para realizar un levantamiento 3D debe medirse en todas las direcciones posibles; sin embargo, esto lo hace totalmente impráctico y eleva los costos y el tiempo de adquisición en campo. Se han propuesto diversas formas para reducir este problema, como mediciones en el eje Y, eje X y a 45 grados entre estos (Loke and Barker, 2006).

La técnica del *roll along* utilizada en levantamientos 2D puede extenderse a 3D para evitar las limitaciones de tiempo y equipo que implica un 3D completo. Este consiste en varios perfiles paralelos 2D, idealmente la separación entre líneas debe ser la misma que la electródica pero para la práctica es aceptado que el espaciado interlineal sea hasta cuatro veces la separación electródica utilizada, con el fin de asegurar una buena calidad en la inversión de los datos.

3.3 Teoría Básica de Inversión

En general, los métodos de prospección geofísica están basados en un sistema que tiene tres componentes principales: una entrada, que es la fuente de energía, ésta puede ser natural o artificial según el método que se esté utilizando; un filtro, que es la Tierra, en donde están contenidas propiedades físicas; y la salida, que son los datos que medimos (Fig. 3.3.1).



Figura 3.3.1 Sistema básico de los métodos de prospección geofísica.

Teniendo este sistema en mente, es necesario establecer la diferencia entre el problema directo y el problema inverso.

El problema directo puede definirse como aquel proceso que trata de predecir resultados de mediciones, partiendo de un modelo que contiene el conocimiento de las propiedades físicas de la Tierra y estableciendo las condiciones iniciales.

Estimar parámetros del modelo → Modelo Cuantitativo → Predicción de datos

Mientras un problema inverso es aquel en el que se parte de una respuesta de la Tierra, es decir, los datos medidos, generando un modelo inicial a partir del cual se obtienen los parámetros del mismo (Menke, 1989).

Observaciones de datos → Modelo Cuantitativo → Estimar parámetros del modelo

En la mayoría de los problemas inversos los datos son simplemente una lista de valores numéricos. Si N mediciones se llevan a cabo en un experimento en particular, se consideran estos números como los elementos de un vector d de longitud N (Menke, 2012).

Los parámetros del modelo son elegidos para capturar el carácter esencial del proceso que será estudiado. Estos parámetros pueden representarse como los elementos de un vector m cuya longitud es M .

Datos:
$$d = [d_1, d_2, d_3, d_4, \dots, d_N]^T$$

Parámetros del modelo:
$$m = [m_1, m_2, m_3, m_4, \dots, m_M]^T$$

En un problema inverso, estos parámetros están relacionados de alguna manera con los datos. Lo más común es que esa relación sea complicada, por lo que los encontramos relacionados por una o más ecuaciones implícitas tales como:

$$\begin{aligned} f_1(d, m) &= 0 \\ f_2(d, m) &= 0 \\ &\vdots \\ f_L(d, m) &= 0 \end{aligned} \tag{3.3.1}$$

Estas ecuaciones implícitas pueden escribirse también como la ecuación vector:

$$f(d, m) = 0 \tag{3.3.2}$$

En ésta se resume lo que se conoce sobre la relación de los datos medidos y los parámetros desconocidos del modelo. El propósito de la inversión es resolver o “invertir” estas ecuaciones para los parámetros del modelo.

Los problemas de inversión más simples y mejor entendidos son aquellos que pueden ser representados por la ecuación lineal explícita $Gm = d$, la cual es el fundamento del estudio de la teoría de inversión discreta, que puede expresarse como:

$$d_i = \sum_{j=1}^M G_{ij} m_j \quad (3.3.3)$$

donde tanto el modelo m como los datos d son tratados como parámetros discretos.

La teoría de inversión es entonces, un conjunto de técnicas matemáticas para obtener conocimiento del mundo físico transformando los datos en cantidades físicas más fáciles de interpretar (Gubbins, 2006).

Podemos establecer algunos pasos básicos para obtener un modelo inverso:

1. Obtener el modelo directo
2. Resolver problema inverso
3. Calcular error entre los modelos directo e inverso
4. Actualizar el modelo inicial

Estos pasos se repetirán hasta que el criterio de error sea satisfecho.

Tanto en el modelo directo como en el inverso, el modelo matemático es un sistema de ecuaciones; sin embargo, la forma de resolverlo es distinta y más compleja para el problema inverso. Dos métodos muy utilizados para la solución del problema directo son Diferencias Finitas y Elementos Finitos.

Existen también muchas formas de solucionar el problema inverso, Menke (2012) menciona algunas técnicas:

- Estimados de los parámetros del modelo
- Valores de frontera
- Funciones densidad de probabilidad
- Conjuntos de realización de parámetros del modelo
- Promedios pesados de parámetros del modelo

Los valores calculados no pueden ser idénticos a los reales o medidos, esto es a causa de dos razones importantes: incertidumbre experimental y errores de modelado (Tarantola, 1987). Debido a esto, la medición del error tiene un carácter muy importante en la inversión de los datos. Para este objetivo, también existen distintos métodos tales como el Error Cuadrático Medio, la Norma L1, Norma L2, Norma L^∞ , entre otros.

3.3.1 Método de Elementos Finitos

Este método permite que el problema sea planteado como una serie de ecuaciones algebraicas simultáneas. Para esto el problema debe ser discretizado, lo que ocasiona que los valores arrojados sean aproximados en un número finito de puntos en el cuerpo, que dependen del número de elementos usados para la discretización.

Con este método, en lugar de intentar resolver el problema como un todo en una sola operación, se divide el cuerpo en un número finito de elementos, que se resuelven simultáneamente. Estos elementos quedan unidos por nodos, sobre los cuales se materializan las incógnitas fundamentales del problema; los nodos tienen ciertos grados de libertad que son el mismo número de incógnitas que desean conocerse (Carnicero, A., 2003).

Hay tres elementos que conforman a este tipo de problemas:

- Dominio (Ω): espacio a analizar.
- Condiciones de entorno: variables conocidas que condicionan el cambio de sistema.
- Incógnitas: lo que deseamos conocer después de que las condiciones actúen.

El mallado o triangulación T_h del dominio es el primer aspecto básico del método; el dominio $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ es subdividido en E elementos llamados elementos finitos, tal que:

$$\bar{\Omega} = \bigcup_{e=1}^E \bar{\Omega}_e \quad (3.3.4)$$

donde cada $\Omega_e \in T_h$ es un polígono con interior no vacío ($\Omega_e \neq \emptyset$) y conexo.

Una vez que la triangulación del dominio se realizó, se procede a construir las funciones base que utiliza el método, las cuales deben satisfacer ciertas propiedades:

- Son acotadas y continuas.
- Existen ℓ funciones base por cada nodo del polígono Ω_e y cada función ϕ_i es no cero solo en los elementos contiguos conectados por el nodo i .
- $\phi_i = 1$ en cada nodo i del polígono, y cero en los otros nodos.

Con estas funciones base se resuelven las ecuaciones que representan al modelo directo obteniendo la solución al sistema (Carrillo L., A., Herrera R., I., Yates S., R., 2008).

El método que se ha utilizado ampliamente en los últimos años tanto para resolver problemas inversos de datos eléctricos 2D como 3D, es el método de Suavizado Restringido (Smoothness - constrained), que parte de la ecuación:

$$(J_i^T J_i + \lambda_i C^T C) p_i = J_i^T g_i$$

(3.3.5)

donde:

i es el número de iteración.

J_i es la matriz Jacobiana de derivadas parciales.

g_i vector discrepancia que contiene las diferencias entre los logaritmos de los valores de resistividad aparente medidos y calculados.

λ_i factor de amortiguamiento.

p_i vector de perturbación para los parámetros del modelo.

C es el filtro de rugosidad el cual tiene como finalidad hacer el ajuste suavizado de modo que no haya soluciones inestables o extremas.

Este método ha probado ser robusto y de convergencia rápida. Loke y Barker (1996) utilizan un semiespacio homogéneo como modelo inicial, evitando así el problema de calcular cada elemento de la matriz Jacobiana J y disminuyendo el tiempo y espacio requeridos por la memoria.

4. METODOLOGÍA

4.1 Equipo

El equipo utilizado fue un resistivímetro SYSCAL PRO Switch (Fig. 4.1.1) que es un sistema multicanal de resistividades con 48 canales. Las especificaciones de transmisión se encuentran en la Tabla 4.1. La capacidad del equipo es de hasta 96 electrodos con separación máxima de 10 metros en una línea, utilizando pequeñas cajas auxiliares para la conexión de los cables *multi-core* necesarios; también es posible conectar más líneas paralelas con la ayuda de cajas *Switch Pro*, que funcionan como nuevos controladores de la corriente.



Figura 4.1.1 Consola SYSCAL PRO y cable *multi-core*.

Se utilizaron 96 electrodos de cobre, 8 cables *multi-core* para transmitir las señales entre el equipo y los electrodos, los cuales se conectan a los puentes del *multi-core* mediante pequeños cables de cobre con caimanes en los extremos.

Como material auxiliar se llevaron marros para clavar mejor los electrodos, bidones con agua y sulfato de cobre para bajar las resistencias de contacto (en caso de ser necesario), sombrilla para cubrir la consola, pues puede afectarse con el sol o la lluvia, y guantes de carnaza.

Además se utilizó un nivel Leica NA724, un tripié de aluminio con tornillo central para colocar el nivel y un estadal de 4 m, equipo con el que se realizó la nivelación topográfica del sitio.

Especificaciones del Transmisor	
Variables Eléctricas	Valor
Corriente máxima	2.5 [A]
Voltaje máximo (switch)	800 [V]
(manual)	1000 [V]
Potencia máxima	250 [W]
(con batería externa)	12 [V]
Tiempo de inyección	(0.15, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0) [s]

Tabla 4.1 Especificaciones de transmisión del resistímetro SYSCAL PRO (Iris Instruments).

4.2 Diseño de Adquisición

La zona de interés para este trabajo es la parte norte del campus que, en su mayoría, es terreno sin construcciones. Se planeó utilizar el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D (TRE2D) con el tendido de 15 perfiles paralelos con longitud variable, adaptada a las dimensiones que el terreno permitiera, el cual presenta un perímetro no regular debido a los terrenos privados en la periferia y a las construcciones propias del campus. El diseño del tendido contempló utilizar el arreglo *equatorial* para obtener datos entre los perfiles, correspondientes a la TRE3D.

La distribución diseñada quedó como se muestra en la figura 4.2.1, donde la dirección observada de los perfiles se decidió de tal manera que fuera perpendicular a la pendiente del terreno y, por lo tanto, al escurrimiento natural.

El arreglo que se decidió utilizar fue el Wenner-Schlumberger, por su buena resolución para detectar estructuras tanto en dirección vertical como horizontal. La separación electródica de 10 m en todos los casos, para abarcar la mayor longitud posible en el terreno. La separación entre líneas se eligió de 40 m ya que, para obtener datos con el arreglo equatorial y con vistas a aplicar una inversión 3D de forma válida, la distancia entre líneas debe ser de máximo cuatro veces la separación electródica.

Las secuencias de adquisición pueden realizarse en el *software* Electre-Pro que pertenece a Iris Instruments o, como se hizo para este proyecto, realizarse directamente en una hoja de cálculo para la cual debe considerarse el número de electrodos, la separación entre ellos, es decir, la posición; y la forma en que medirá, que puede ser por niveles o en diagonal.

4.3 Adquisición de Datos

La adquisición de los datos fue realizada en el mes de junio, a inicios de la temporada de lluvias, en un período de 6 días; cada día se hicieron entre 2 y 3 líneas, según su longitud, y los ecuatoriales correspondientes. Por cuestión de practicidad, se hicieron ligeros cambios en la adquisición, quedando la disposición final de las líneas como se muestra en la figura 4.3.1.

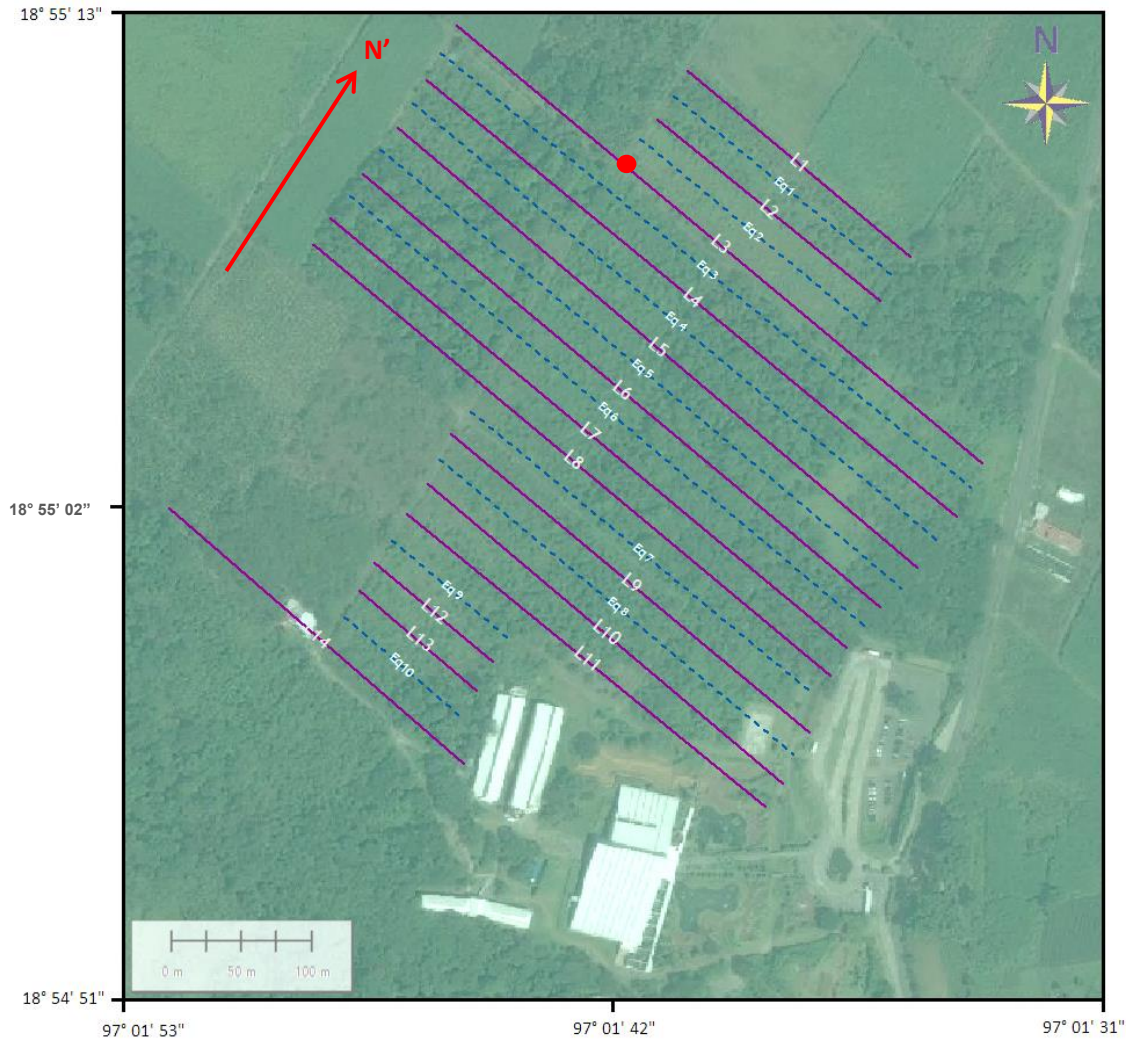


Figura 4.3.1 Modelo final de adquisición, donde las líneas continuas representan las adquiridas con arreglo W-S y las líneas punteadas son adquisición equatorial (Global Mapper).

Se decidió utilizar un norte relativo (N'), indicado en la figura 4.3.1 con una flecha en color rojo, para una mejor ubicación en campo. Se eligió también un origen (0,0) para referenciar cada perfil en términos de distancia, el cual se encuentra indicado con un punto rojo en la misma imagen.

Para todas las líneas se utilizó un arreglo Wenner-Schlumberger con una separación eléctrica de 10 m. Las líneas de mayor longitud fueron de 470 m utilizando 48 electrodos y las más pequeñas de 110 m. El equipo se configuró para medir los primeros 12 niveles, profundizando hasta 50 m aproximadamente. En las dos líneas de 110 m se alcanzan únicamente 5 niveles, profundizando alrededor de 20 m.

Los cambios en el diseño inicial consistieron en variar la separación entre líneas, disminuyéndola a 20 m en tres casos. Para la adquisición 3D se utilizó el arreglo *equatorial* Wenner-Schlumberger, con el que se tomaron datos entre los perfiles 2D separados a 40 m.

Se realizó también el levantamiento topográfico electrodo a electrodo de todas las líneas para hacer la corrección correspondiente. Esto se debe realizar siempre para una mejor inversión de los datos y en esta área era muy necesario porque algunas zonas presentaban cambios abruptos de elevación entre un electrodo y otro, sobre todo en la zona este del tendido.

Se realizaron archivos individuales de topografía por cada línea para la inversión de los perfiles 2D y a partir de estos datos se obtuvo un mapa de las variaciones de altitud en el terreno, mostrado en la figura 4.3.2, en el cual se observa la posición de cada electrodo, indicados con puntos azules, y la posición de los ecuatoriales, indicados con líneas continuas.

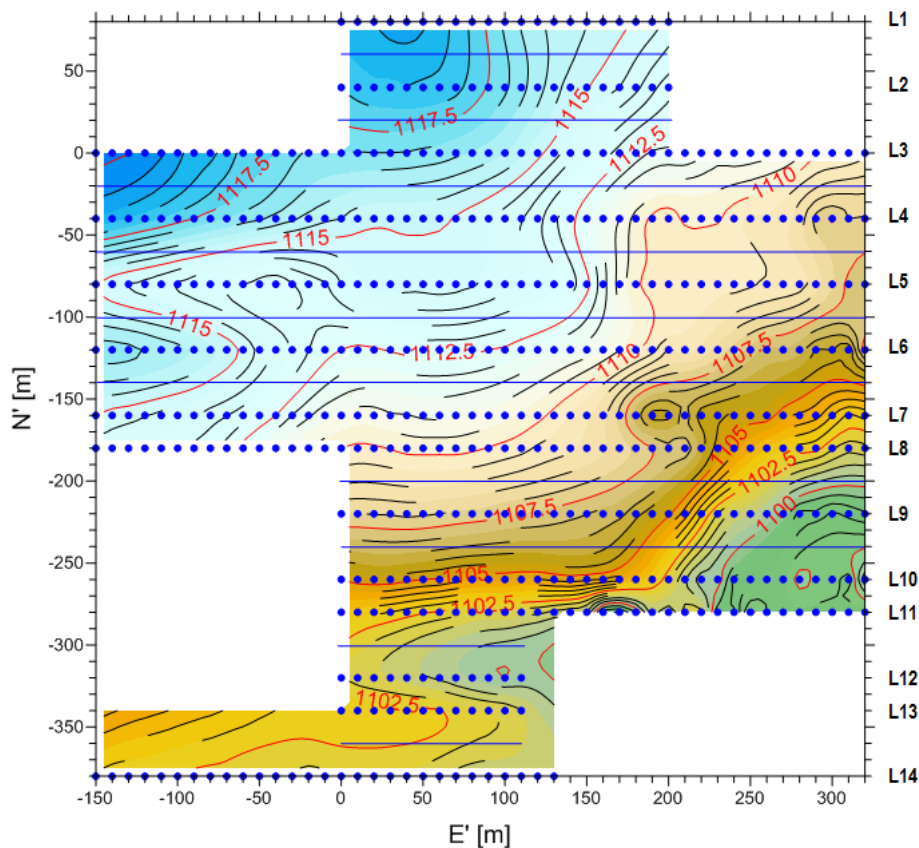


Figura 4.3.2 Mapa topográfico que muestra la posición de electrodos en el terreno.

También fue necesario hacer un archivo general con los datos de nivelación para la posterior inversión en 3D. Todo quedó referenciado al nivel del mar, a partir de un dato medido con GPS y con el cual se hizo el amarre de valores. El modelo topográfico en tres dimensiones se muestra en la figura 4.3.3 en la que puede observarse una variación de 20 m entre el punto más alto y el más bajo.

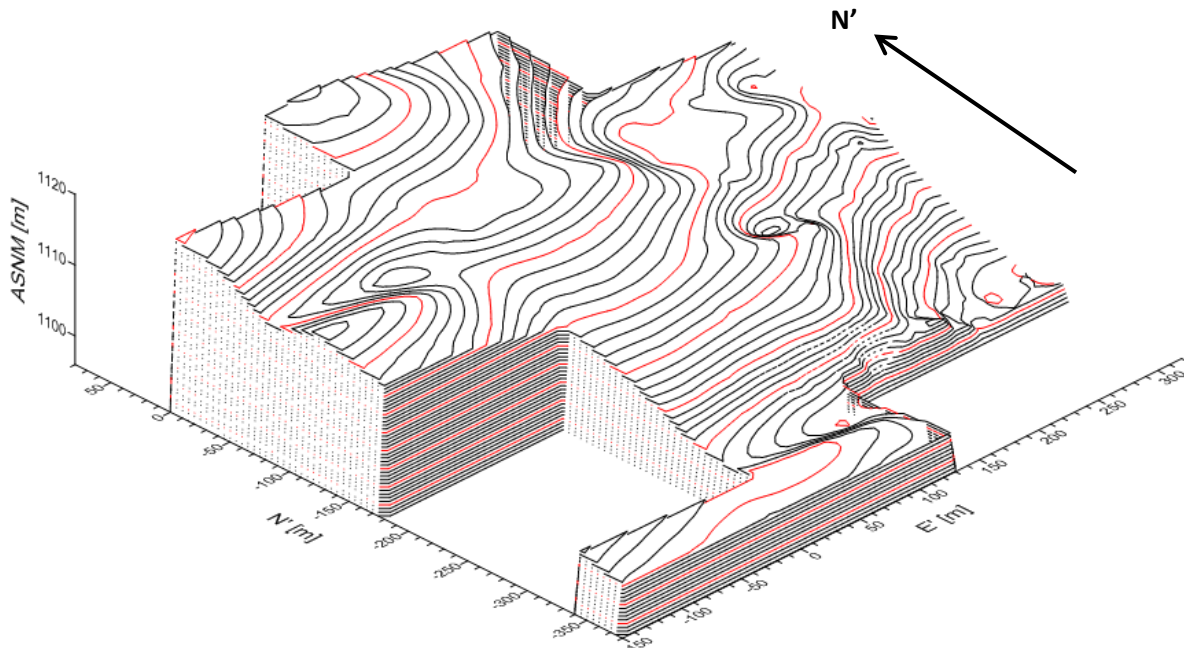


Figura 4.3.3 Modelo topográfico 3D del terreno de estudio.

Un par de problemas se presentó durante la campaña: una zona del terreno estaba cubierta por hojarasca, la cual impedía un buen contacto de los electrodos con el suelo, pero logró solucionarse moviendo los electrodos algunos centímetros a zonas más despejadas y enterrándolos tanto como fue posible; las resistencias de contacto siempre estuvieron dentro del rango aceptable, que es hasta 2 [kOhm]. Otra parte del terreno presentaba vegetación muy cerrada que impedía el paso con el equipo, motivo por el cual no se realizó el levantamiento de tres líneas que se tenían planeadas en la parte suroeste del área de estudio; a pesar de esto, se logró cubrir la mayor parte del área de forma exitosa.

En la figura 4.3.4 se puede ver la distribución de los puntos de atribución en el levantamiento de una línea de 48 electrodos espaciados a 10 m y cortada en el nivel 12 con el arreglo Wenner-Schlumberger.

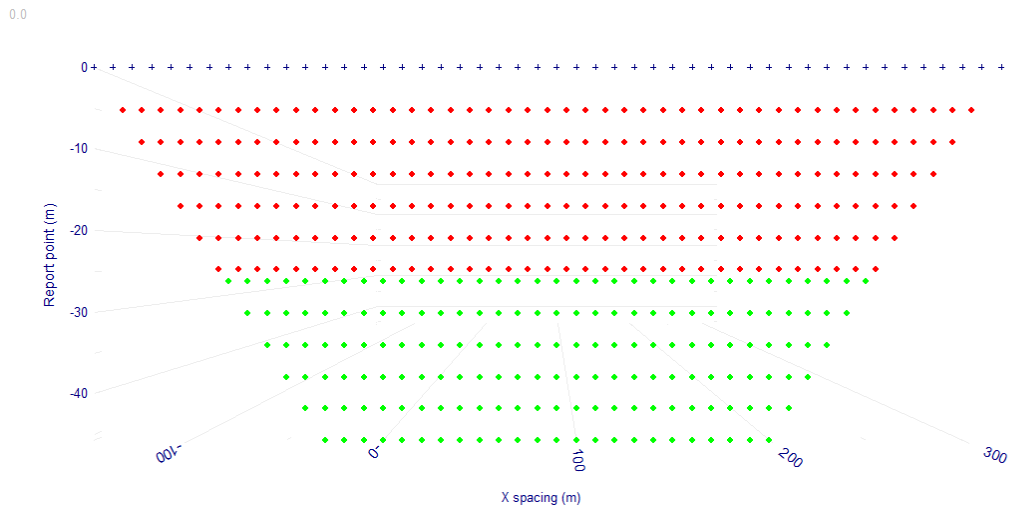


Figura 4.3.4 Puntos de atribución en una línea de 48 electrodos espaciados a 10 m.

Se realizó, en total, el levantamiento de 14 líneas y 10 ecuatoriales intercalados a 20 m entre ellos, cubriendo 15 hectáreas del terreno con un total de 6,207 quadripolos. Exceptuando los dos perfiles de 210 m de longitud, todos los demás fueron cortados en el nivel 12. Puede verse en la figura 4.3.5 el total de los puntos de atribución adquiridos de todas las líneas.

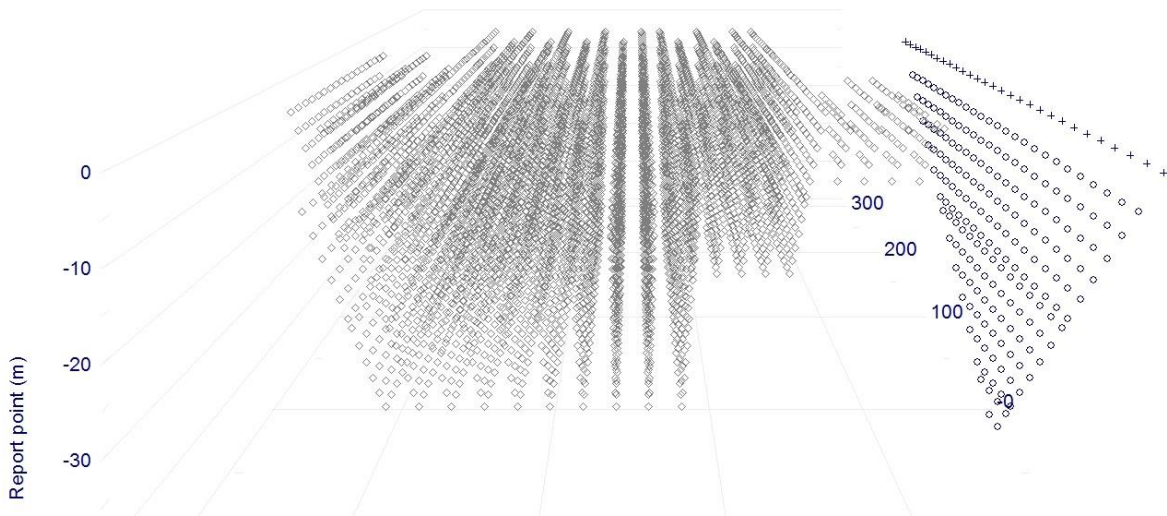


Figura 4.3.5 Disposición de los puntos de atribución medidos en 14 líneas y 10 equatoriales.

5. INVERSIÓN 2D Y 3D DE DATOS

La relación de resistividad aparente y resistividad real es, como se mencionó antes, una relación compleja que requiere la aplicación de métodos de inversión. Gracias al avance en el ámbito computacional, ahora contamos con *software* que nos permite realizar las inversiones de manera más rápida y obtener imágenes representativas de los datos resultantes.

5.1 Inversión 2D

El *software* utilizado para realizar la inversión de los perfiles fue el EarthImager 2D de AGI (Advanced Geosciences, Inc.), el cual te da opciones iniciales tales como quitar picos, quitar resistividades negativas o trabajar con todos los datos. Se debe elegir entre el método de Diferencias Finitas y el de Elementos Finitos para resolver el problema directo, un método para generar el modelo inverso, entre otros parámetros que se requieren para la inversión de los datos. Lo que se obtiene finalmente es un perfil de resistividad verdadera del subsuelo.

Para que el *software* pueda leer la información que se obtiene de la medición en campo, se debe realizar un formato llamado URF que se observa en la figura 5.1.1. En la primera parte de este formato se debe indicar la posición que ocupa cada electrodo en distancia (referenciados de la forma que se desee) y se le da un número que lo identificará (ID), siendo éste un número entero y continuo para cada electrodo, iniciando en 1.

En el segundo bloque del formato se ubican los electrodos utilizados, para corriente y para potencial, con el ID dado en el bloque anterior. Se coloca también el valor del cociente V/I , la corriente I utilizada y el porcentaje de error en la medición del dato. Estos datos se guardan en el archivo de salida que se descarga de la consola, al finalizar la medición y únicamente deben acomodarse en el orden observado en la imagen.

Unit: meters							
:Geometry							
;ID	x	y	z				
1	0	0	0				
2	5	0	0				
3	10	0	0				
4	15	0	0				
5	20	0	0				
6	25	0	0				
7	30	0	0				
.							
.							
.							
:Measurements							
;A	B	M	N	V/I(Ohm)	I(mA)	E(%)	
1	4	2	3	1.10955624	179.15	0.1	
1	6	3	4	0.24203319	592.27	3.6	
1	8	4	5	0.15911183	808.18	0.2	
1	10	5	6	0.08629941	811.79	0.6	
1	12	6	7	0.04039323	777.16	0	
1	14	7	8	0.01715877	757.63	0	
1	15	7	9	0.03908601	778.13	0	
1	17	8	10	0.03330407	808.79	0	
1	19	9	11	0.02812864	841.74	0	
1	21	10	12	0.02036715	873.76	0	
1	23	11	13	0.00913074	842.21	0	

Figura 5.1.1 Ejemplo de formato URF para la lectura de los datos en el *software* EarthImager.

Como se mencionó antes, la corrección por topografía es muy importante para realizar la inversión de los datos, ya que ocasiona dispersión localizada y enfoca la distribución de la corriente cerca de la superficie causando anomalías artificiales, inducidas, conductivas y resistivas (Tsourlos, 1999). Para cargar los valores de la topografía en el *software*, también se hace un formato de tipo .trn que puede verse en la figura 5.1.2, donde la primera columna es la posición del electrodo y la segunda el valor de altitud, que puede ser dando un valor relativo al primer electrodo y amarrar los siguientes valores o, como en este caso, referenciando al nivel del mar.

;TRN File	
unit=meters	
0	1638
5	1638.648
10	1639.244
15	1639.714
20	1640.159
25	1640.662
30	1641.236
35	1641.649
40	1642.229
45	1642.691
50	1643.232
55	1643.815

Figura 5.1.2 Ejemplo de formato .trn para cargar los valores de topografía.

Los parámetros utilizados por el *software* fueron elegidos de acuerdo con las indicaciones del manual así como al conocimiento de la adquisición en campo; se hicieron distintas pruebas realizando pequeñas variaciones en algunos parámetros; los presentados en la Tabla 5.1 son los finales debido a que mostraron mejores resultados.

Parámetros de Inversión	
Ajustes Iniciales	
Criterio para Remover Datos	
Mín. voltaje (mV)	0.2
Mín. $ V/I $ (Ohm)	0.0005
Error Máx. de Repetición (%)	3
Mín. Resist. Aparente (Ohm·m)	1
Máx. Resist. Aparente (Ohm·m)	200
Método de inversión	
Modelo Suave	
Modelo Directo	
Método Modelo Directo	
Método de Elementos Finitos	
Solución directa de Ecuación	
Cholesky	
Condición de Límite	
Número de divisiones de malla	3
Inversión de Resistividad	
Criterio para detener	
Número de Iteraciones	8
Número de Iteraciones internas	10
Factor de Suavizado	10
Factor de Amortiguamiento	100
Mín. Resist. Aparente (Ohm·m)	1
Máx. Resist. Aparente (Ohm·m)	200
Razón Rugosidad H/V	1

Tabla 5.1 Parámetros utilizados en inversión 2D.

El *software* trabaja con algunas ecuaciones específicas para la resolución del problema directo o la medición del error, las cuales se exponen a continuación, tomadas del Manual EarthImager 2D (AGI, 2009).

5.1.1 Modelo Directo

Tratamos con un problema 2.5D porque es un modelo de la tierra 2D pero un campo eléctrico 3D debido a una fuente puntual. Hay que resolver un problema directo de resistividad 2.5D usando métodos numéricos por discretización del dominio de investigación.

En este *software*, la ecuación diferencial parcial 3D es transformada con Fourier a una ecuación 2D para reducir el tiempo de cómputo. La solución directa puede ser obtenida resolviendo la ecuación en el dominio de la Transformada de Fourier:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) - k^2 \sigma V = -I \cdot \delta(x) \cdot \delta(z) \quad (5.1.1)$$

Donde V es el potencial eléctrico escalar en el dominio de Fourier, I es la corriente eléctrica, k es el número de onda en el dominio de la transformada. σ la conductividad eléctrica como función de (x,z). Para esto se eligió el Método de Elementos Finitos, aunque también puede utilizarse el de Diferencias Finitas.

5.1.2 Modelo Inverso

El modelo elegido para realizar la inversión fue el Suave, también conocido como inversión de Occam, el cual encuentra el modelo más suave posible que ajuste los datos y asume una distribución Guassiana de los errores. Así, la función objetivo para este modelo está dada por la ecuación:

$$S(m) = (d_{obs} - g(m))^T W_d (d_{obs} - g(m)) + \alpha \cdot m^T R m \quad (5.1.2)$$

Donde α es un multiplicador de Lagrange y un factor de suavizado. R es un operador de rugosidad.

5.1.3 Medición de Error

Uno de los objetivos de la inversión de resistividad es encontrar un modelo cuya respuesta (datos pronosticados) ajuste mejor a los datos medidos. El mejor de los ajustes puede ser caracterizado por el error RMS (root mean squared) en porcentaje:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i^{pred} - d_i^{med}}{d_i^{med}} \right)^2}{N}} \times 100\% \quad (5.1.3)$$

Donde N es el número total de mediciones, d_{pred} el dato predicho y d_{med} el dato medido.

Un error RMS alto es resultado de:

- Datos ruidosos
- Error del modelado numérico
- Imposibilidad de modelar objetos 3D con un programa de modelado 2D
- Ajustes de inversión pobres

Otra medida del error en los datos es la Norma L2 que se define como la suma de los errores ponderados al cuadrado:

$$Norma\ L2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i^{calc} - d_i^{med}}{W_i} \right)^2 \quad (5.1.4)$$

Donde W_i es el peso del dato y d_{calc} es el dato calculado.

Para la visualización de los perfiles se utilizó como *software* auxiliar el Surfer 9, en el cual se introdujeron los datos arrojados del EarthImager 2D. Se utilizó este *software* para poder dar una mejor presentación a los perfiles, colocando la escala correcta de distancia y profundidad a los ejes y una escala logarítmica de colores que la resultante del *software* de inversión.

5.2 Inversión 3D

Para la inversión 3D se utilizó, de la misma compañía, el software EarthImager 3D. Se utiliza también el archivo URF para introducir los datos, pero como será una inversión en tres dimensiones que considera todos los datos como un mismo levantamiento, se requiere que sea una misma secuencia. Entonces los electrodos fueron renombrados, suponiendo que todas las líneas tenían 48 electrodos, colocados a cada 10 m con rango en X de [-150 a 320] y en Y de [80 a -380] a cada 40 ó 20 m. En la primera parte del URF se colocó esta secuencia, quedando registrados 672 electrodos con su respectiva posición (X, Y). En la segunda parte del URF, se puso la información de cada dato medido, incluyendo los que fueron tomados con el arreglo equatorial indicando los electrodos utilizados de dos líneas. En la figura 5.2.1 puede visualizarse la posición de los electrodos, el número correspondiente al renombramiento y cuáles fueron colocados realmente.

X Y	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320
80	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
60	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
40	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
20	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
0	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144
-20	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
-40	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192
-60	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
-80	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240
-100	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
-120	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288
-140	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
-160	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336
-180	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384
-200	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
-220	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432
-240	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
-260	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480
-280	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528
-300	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
-320	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576
-340	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624
-360	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
-380	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672

Figura 5.2.1 Disposición final de electrodos para realizar el archivo URF de la inversión 3D, resaltando en azul los utilizados realmente. Se muestra en los extremos superior e izquierdo los valores de X y Y que se tomaron con fines prácticos. En morado se muestran las líneas en que se obtuvieron datos con arreglo equatorial.

De igual forma se introdujo la topografía; el formato es el mismo, únicamente debe agregarse una columna, antes del valor de altitud, indicando la posición en Y (Fig. 5.2.2).

```

; Y de 80 a -380
units=meters
1
0      80    1118.5
10     80    1118.89
20     80    1118.99
30     80    1119.1
40     80    1119.22
...
40     40    1118.49
50     40    1118.35
60     40    1118.32
...
110    -380  1101.27
120    -380  1101.2
130    -380  1101.31
    
```

Figura 5.2.2 Ejemplo de archivo .trn para la inversión 3D.

Los parámetros para la inversión 3D son muy similares a los utilizados para la inversión de los datos 2D, únicamente se modificaron los marcados en la Tabla 5.2.

Parámetros de Inversión 3D	
Modelo Directo	
Método Modelo Directo	
Método de Elementos Finitos	
Solución directa de Ecuación	
Cholesky	
* Divisiones de malla	
X	2
Y	2
Z	2
Inversión de Resistividad	
Criterio para detener	
Número de Iteraciones	8
* Número de Iteraciones internas	3
* Modelo Inicial	
Homogéneo	

Tabla 5.2 Parámetros que se modificaron para la Inversión 3D, marcados con *.

En el caso 3D, el error es medido con las mismas técnicas presentadas para el caso 2D, por medio de las ecuaciones (5.1.3) y (5.1.4). También la función objetivo del Modelo Suave para obtener el modelo inverso es igual (Ec. 5.1.2). La ecuación que cambia es la relacionada al modelo directo.

5.2.1 Modelo Directo

Esta vez tratamos con un problema 3D, así que la ecuación a resolver es distinta a la presentada en la sección anterior, quedando expresada como (AGI, 2008):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) = I(x, y, z) \quad (5.2.1)$$

Donde $I(x,y,z)$ es el término para la fuente de corriente eléctrica.

Para la visualización del modelo 3D se utilizó el *software* Voxler, en el cual se introdujeron los datos arrojados de la inversión. Se crearon superficies de isovalores para analizar la distribución de zonas conductoras asociadas al flujo de agua y la de cuerpos resistivos para detectar zonas estables en la superficie; también se crearon planos ortogonales para ver el cambio de la resistividad en las tres direcciones.

6. RESULTADOS

6.1 Perfiles 2D

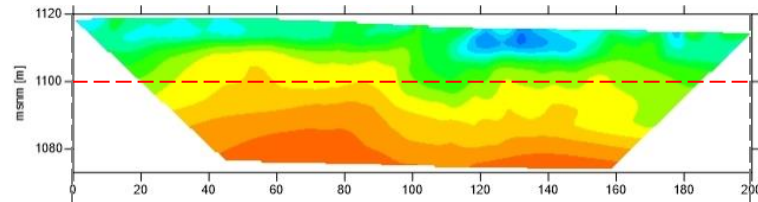
En total se realizó la adquisición de 14 perfiles con TRE2D, las imágenes resultantes de la inversión de estos datos se muestran con el indicador L1 hasta el L15, colocadas en el orden correspondiente a la figura 4.3.1. También se realiza una descripción de lo observado en cada perfil y la correlación entre ellos.

A modo de resumen, se presenta la Tabla 6.1 con los valores de resistividad para los materiales de interés: arcillas, calizas y agua dulce.

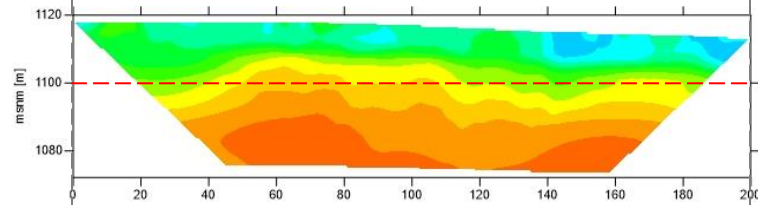
Resistividad de Materiales	
Material	Resistividad ($\Omega \cdot m$)
Arcillas	1 - 100
Calizas	~ 80 - ~ 8000
Agua dulce (superficial)	10 - 100

Tabla 6.1 Valores de resistividad para los materiales de interés (Loke, 2010 y Telford, 1990).

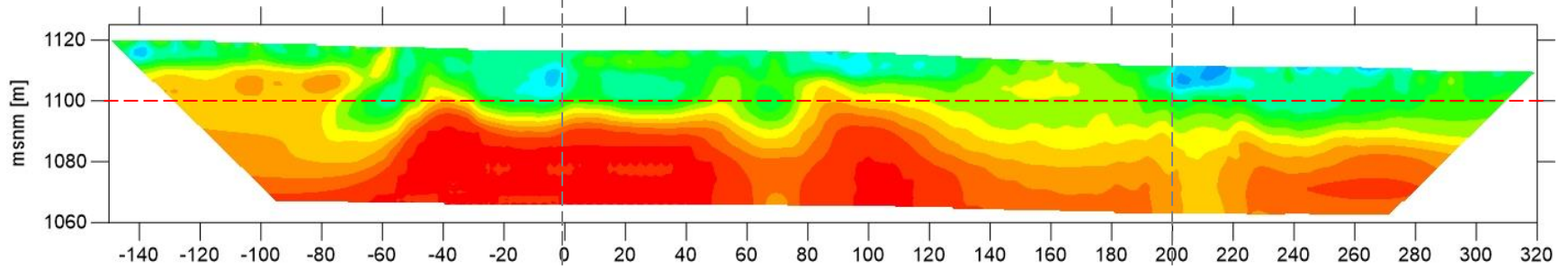
Es importante mencionar que los errores RMS de inversión en los perfiles siempre fueron menores al 3% gracias a que la calidad de los datos en la adquisición fue excelente. Muy pocos datos presentaron errores altos, principalmente por ocasiones en las que llegó a desconectarse algún electrodo; en cuyo caso se eliminaron los datos manualmente, antes de realizar la inversión, o se discriminaron directamente con los parámetros iniciales del *software*. En la Tabla 6.2 se muestran los valores del error RMS y la norma L2 para cada perfil.



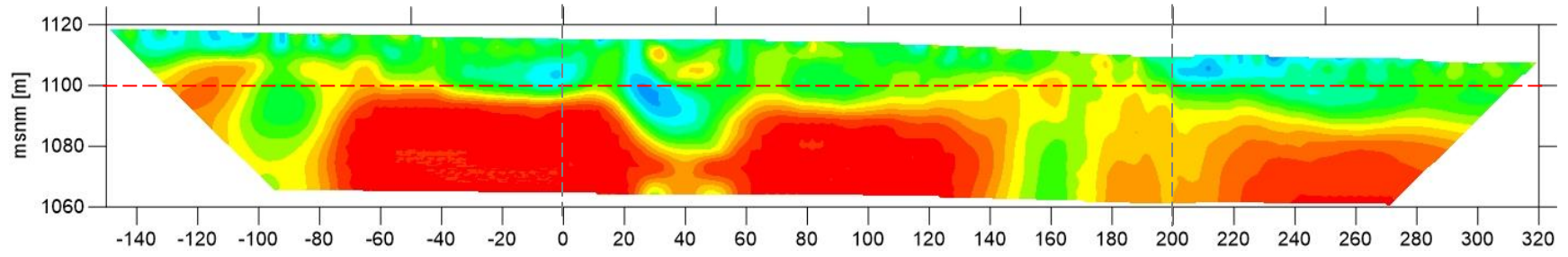
L1



L2



L3



L4

x [m]

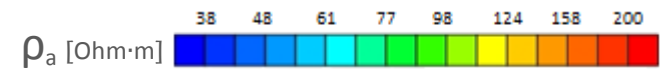


Figura 6.1.1 Resultados de la inversión de los perfiles L1, L2, L3 y L4.

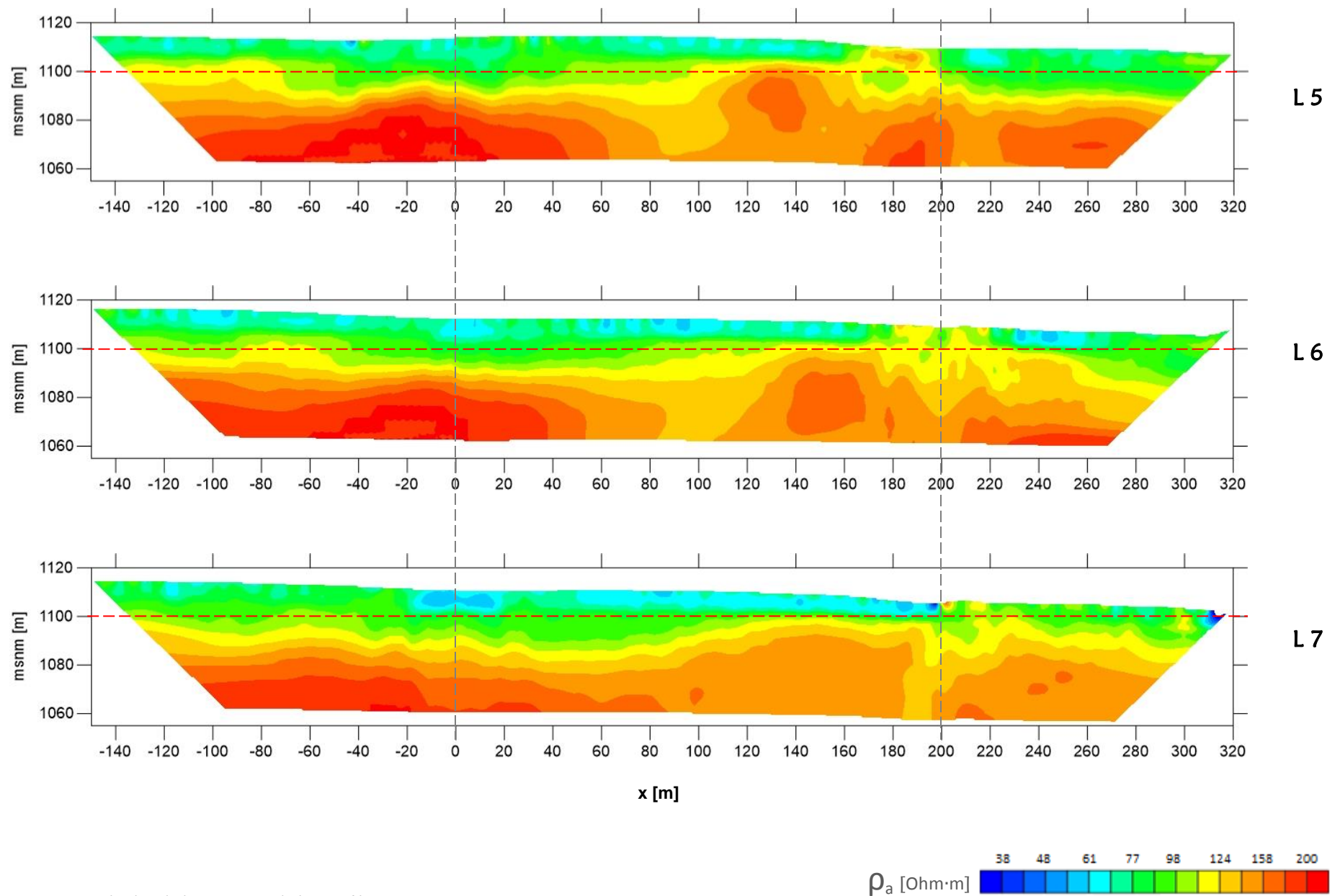


Figura 6.1.2 Resultados de la inversión de los perfiles L5, L6 y L7.

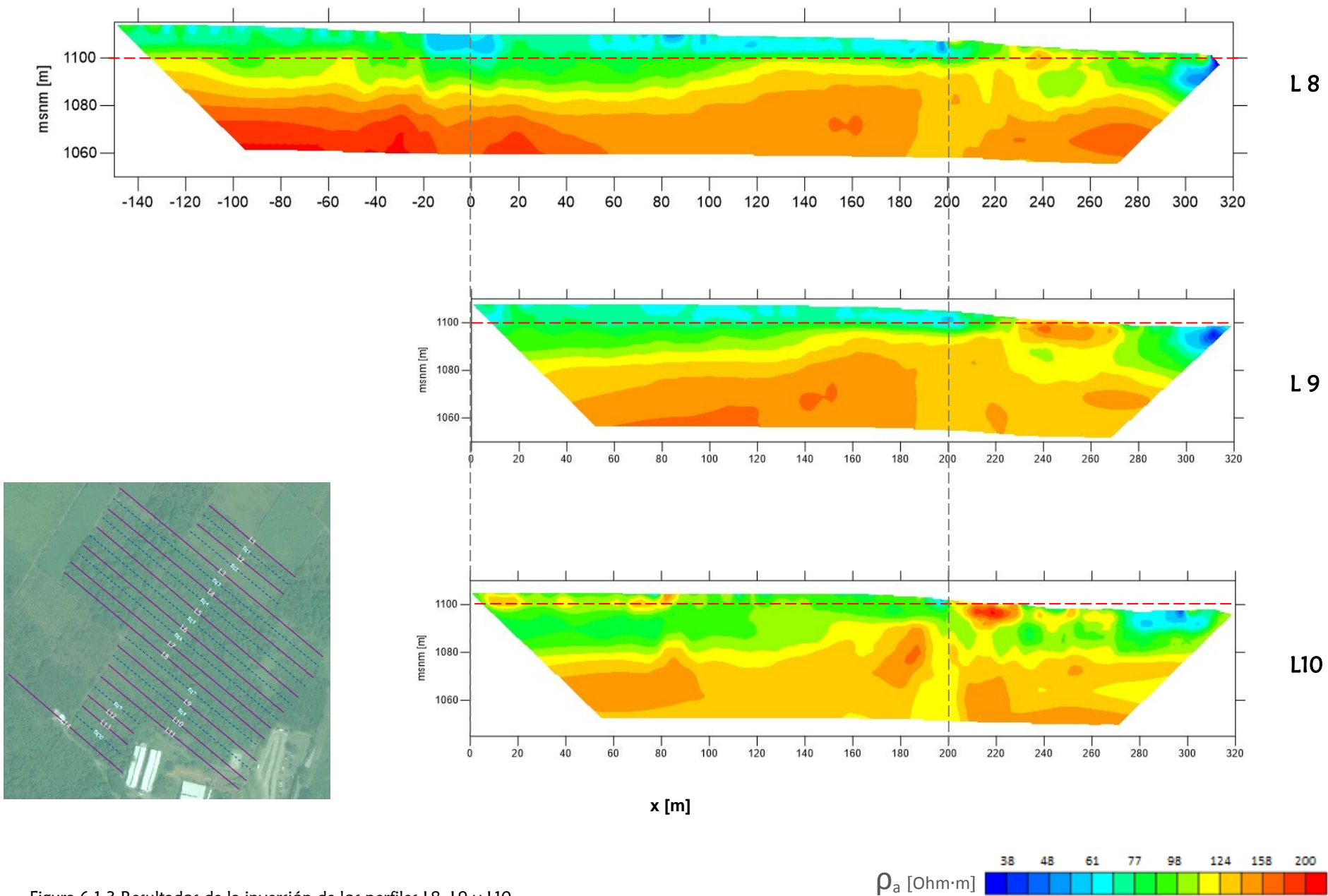


Figura 6.1.3 Resultados de la inversión de los perfiles L8, L9 y L10.

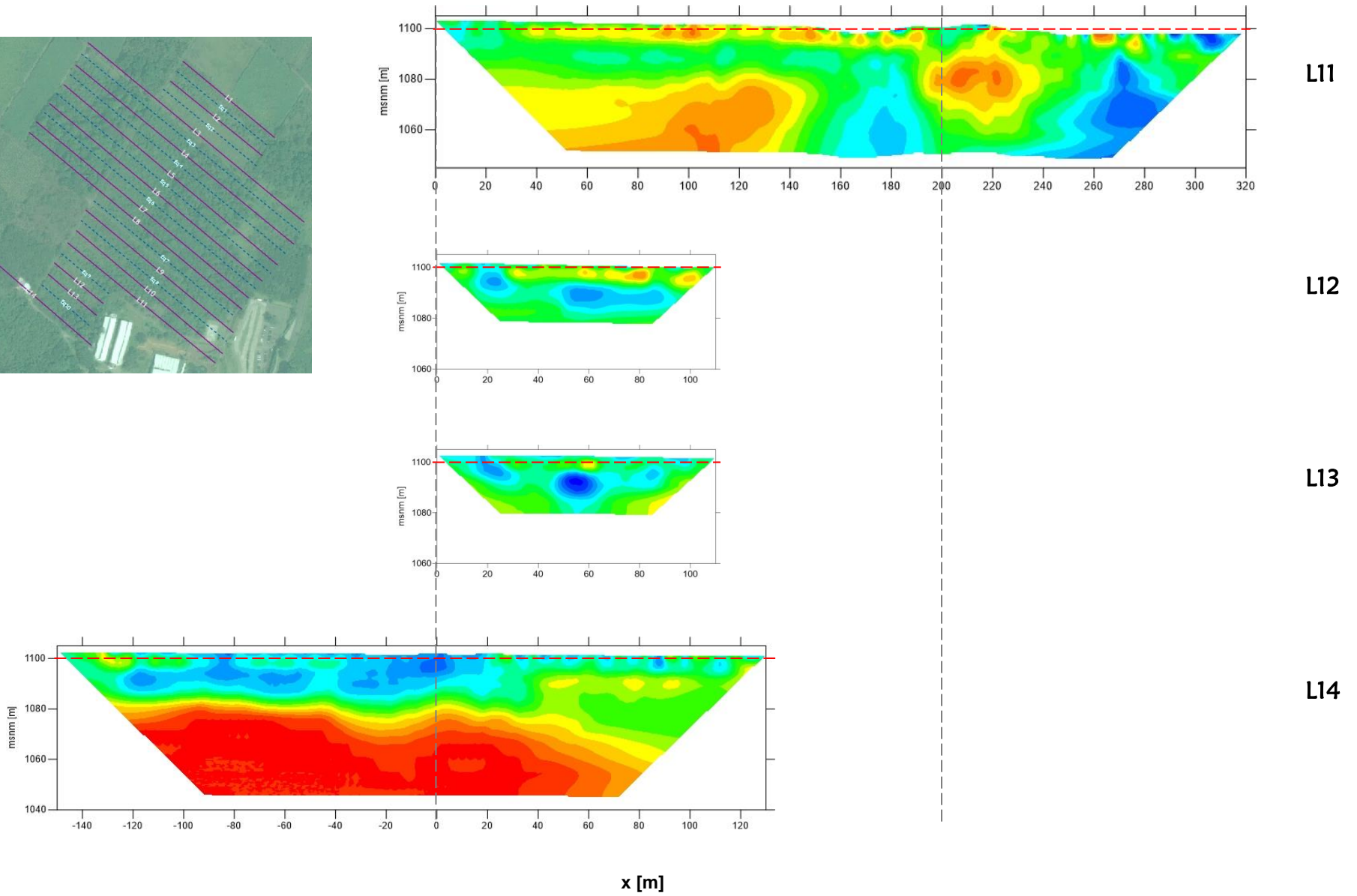


Figura 6.1.4 Resultados de la inversión de los perfiles L11, L12, L13 y L14.

Valores de error en la Inversión de Perfiles 2D						
Perfil	RMS (%)	L2		Perfil	RMS (%)	L2
L1	0.49	0.03		L8	0.42	0.02
L2	0.28	0.01		L9	0.22	0.01
L3	1.67	0.31		L10	0.34	0.01
L4	2.90	0.09		L11	0.67	0.05
L5	0.97	0.1		L12	0.47	0.02
L6	0.54	0.03		L13	1.73	0.33
L7	0.38	0.02		L14	1.69	0.32

Tabla 6.2 Valores de error RMS y Norma L2 en la inversión de los perfiles 2D.

En la siguiente descripción se hace referencia a dos unidades geoelectricas que se diferencian claramente por los valores de resistividad que presentan. La unidad profunda presenta altos resistivos en un rango de 120 a 200 [Ohm·m] mientras la unidad superficial corresponde a valores de resistividades medias en un rango de 70 a 110 [Ohm·m]. Además se presentan bajos resistivos en un rango de 30 a 65 [Ohm·m] que posiblemente se deben a zonas de saturación.

6.1.1 Observaciones y comentarios

Perfil L1

Es un perfil de 200 m de longitud con el que se logró profundizar aproximadamente 40 m, donde puede distinguirse una diferenciación en los valores de resistividad. Como se vio en los antecedentes del lugar, existe un basamento de calizas y sobre éste un depósito sedimentario, clasificado como lahar areno-arcilloso, constituido principalmente por arcillas en esta zona.

Observando este perfil se distinguen claramente dos unidades geoelectricas, una unidad de resistividades altas, por debajo, que se puede asociar a las calizas, y otra unidad superficial de resistividades medias que se puede asociar a arcillas saturadas. Además se pueden observar rasgos en la capa superficial que muestran una alta conductividad (baja resistividad), los cuales pueden ser asociados a una mayor concentración de agua. Entre los 120 y 150 m se observa uno de estos rasgos, donde las formas circulares con los valores más bajos al centro pueden ser asociados al fenómeno de tubificación en el terreno.

Perfil L2

Presenta las mismas características que el perfil anterior en cuanto a longitud y profundidad. También pueden distinguirse las dos unidades geoelectricas y los rasgos de alta conducción en la parte somera, aunque en éste ya no destaca la concentración mayor de agua en la unidad asociada a las arcillas, mencionada en el perfil anterior.

Perfil L3

Este perfil tiene 470 m de longitud y se profundizó alrededor de 50 m. Aquí también se observa la diferencia de unidades, sin embargo, pueden apreciarse dos rasgos distintivos en la unidad asociada a las calizas; uno del lado izquierdo (entre -80 y -40 m) donde aparece una forma elíptica que en el centro tiene valores de resistividad menores, y otro semicircular entre los 60 y 80 metros, menos pronunciado.

Es importante comentar que estas formas elípticas y semicirculares observadas pueden asociarse a un efecto de disolución de las calizas debido al gran flujo de agua pues, como se vio en los antecedentes, este tipo de formas es característico de tal fenómeno.

En general, la capa geoelectrica asociada a las calizas presenta una profundidad irregular y puede observarse una zona superficial, entre los 140 y 180 m, con valores parecidos a los que presenta este cuerpo resistivo profundo. Asimismo, entre los 200 y 220 m, hay una zona con valores de resistividad menores en una forma vertical que puede atribuirse a una fractura en las calizas; cabe mencionar que los eventos de fracturación favorecen la disolución de las mismas al facilitar el paso del agua.

Perfil L4

En este perfil se puede observar una continuidad de las unidades geoelectricas mencionadas, que muestran características similares a las de la línea anterior. Las formas elíptica y semicircular comentadas en la Línea 3 se acentúan y muestran un ligero desplazamiento a la izquierda que podría mostrar una tendencia o dirección; ahora la forma semicircular encontrada entre 20 y 60 m presenta en el centro una concentración importante de resistividades bajas, lo cual sostiene la suposición de que es un efecto de disolución.

El rasgo del cuerpo resistivo en superficie comentado en el perfil anterior, entre los 140 y 180 m, está ligeramente mejor definido por una continuidad de los valores de resistividad altos desde la parte profunda. En la misma cota pero en la parte profunda, se presenta un bajo resistivo que divide verticalmente a esta unidad geoelectrica, lo cual puede asociarse a fracturación y disolución de las calizas, por su extensión horizontal.

Perfil L5

Este perfil tiene las mismas características de longitud y profundidad que las dos líneas anteriores; sin embargo, aquí ya no se observa continuidad en las formas elípticas asociadas a disolución. Nuevamente la diferenciación de unidades geoelectricas es muy clara y se puede apreciar la irregularidad en la cima de la capa geoelectrica profunda, lo cual es consistente con lo observado en dos perfiles anteriores. El rasgo que se mantiene es la zona de posibles calizas superficiales, entre los 160 y 200 m.

Perfil L6

En general, las características que presenta este perfil son muy similares a las del anterior. El rasgo del alto resistivo superficial se presenta alrededor de 20 m hacia la derecha, con respecto al perfil anterior; este patrón de desplazamiento se observa desde el perfil L3.

Se observa una gran saturación en la capa superficial, aunque no hay rasgos que indiquen flujos claros. Además hay una disminución importante en los valores de resistividad en la unidad profunda, entre 80 y 120 m, que puede deberse a fracturamiento y/o gran disolución de las calizas.

Perfil L7

En este perfil continúa el patrón de desplazamiento hacia la derecha de las calizas superficiales, comentado en el perfil anterior. La diferencia de este perfil, con respecto a los dos perfiles anteriores, es la disminución de los valores de resistividad que presenta la unidad geoelectrica asociada a las calizas a partir de los 120 m, lo que puede asociarse a una combinación de los siguientes efectos: diferencia en la compactación de la roca, disolución de calizas y fracturamiento, este último particularmente se presenta claramente entre los 180 y 200 m.

Es importante notar que la potencia de la capa superficial asociada a las arcillas, disminuye de los 120 m en adelante. El rasgo de un bajo resistivo en esta capa, entre los -20 y 20 m, sugiere un flujo de agua o una mayor saturación. Además el detalle de las calizas superficiales comentado en perfiles anteriores aquí no está claro.

Perfil L8

Entre este perfil y el anterior no se observan diferencias importantes en las características; se mantiene la disminución del espesor de la capa asociada a las arcillas y el mismo rasgo de concentración de agua, entre -20 y 20 m.

Hay una fuerte saturación en toda la unidad superficial y aparece un bajo resistivo en el extremo derecho del perfil. Las calizas superficiales aparecen nuevamente, entre los 250 y 270 m, manteniendo el patrón de desplazamiento hacia la derecha que se observó desde perfiles anteriores.

Perfil L9

Este perfil tiene longitud de 320 m iniciando en el metro cero y se profundizó alrededor de 50 m, igual que en los anteriores. Las características de distribución son muy similares, manteniéndose clara la diferenciación de unidades geoelectricas pero con la diferencia de que el rasgo de la caliza ahora se ve más uniforme que en los perfiles anteriores y se observa como un afloramiento.

Se acentúa también el bajo resistivo en el extremo derecho del perfil, que puede asociarse a tubificación debido a la concentración de los valores. Asimismo se presenta una disminución en los valores de resistividad de la capa geoelectrica profunda, a partir de los 180 m, que puede asociarse a un cambio en la compactación de las calizas.

Perfil L10

Este perfil muestra variaciones respecto a las características observadas en los anteriores. Se distinguen las dos unidades, sin embargo, disminuye la saturación de la capa asociada a las arcillas en la que únicamente se presenta una gran concentración de agua entre los 280 y 310 m del perfil. En la misma capa, se observan pequeños rasgos de resistividades altas muy superficiales, entre 0 y 90 m, que pueden atribuirse a cantos rodados de caliza u otro tipo de rocas.

Además, el cuerpo resistivo superficial presenta una extensión horizontal mayor, aunque más irregular, y el patrón de desplazamiento hacia la derecha que se vio hasta el perfil anterior ya no se cumple, observándose un ligero desplazamiento a la izquierda. Aparece nuevamente el rasgo asociado a una fractura alrededor de los 200 m.

Perfil L11

Las características que presenta este perfil cambian completamente con respecto a lo que se observó en los perfiles L1 al L9. Ya no se observa la capa resistiva, asociada a las calizas, uniforme en toda la base del perfil, solo se distingue hasta los 140 m. A partir de esa cota, se presentan resistividades bajas, dentro de los valores que asociamos al agua, lo cual sugiere una gran saturación en la zona profunda.

Similar a lo visto en el perfil anterior, se observan rasgos resistivos cubriendo prácticamente toda la superficie pero con un espesor muy pequeño. Así como un cuerpo irregular entre los 200 y 240 m, con los valores de resistividad que asociamos a las calizas.

Perfil L12

Este perfil tiene 110 m de longitud, la más pequeña utilizada. Al utilizarse pocos electrodos, la profundidad de investigación únicamente alcanzó los 20 metros. Aquí no se observa la diferenciación de unidades geoelectricas, lo que indica un aumento en la potencia de la capa asociada a las arcillas. Se presenta, al igual que en el perfil anterior, una pequeña franja de resistividades altas en la superficie, que puede deberse a la presencia de cantos rodados. También se aprecia una presencia importante de bajos resistivos que indican una gran saturación.

Perfil L13

Este perfil comparte las características de longitud y profundidad del perfil anterior, con la diferencia de que ya no se presentan los rasgos resistivos someros y la presencia de valores asociados al agua aumenta observándose una gran concentración entre los 50 y 70 m, lo que puede indicar un efecto de tubificación en esa zona.

Perfil L14

Este último perfil tiene 280 m de longitud, que inicia en el metro -150 y concluye en el 130, y se profundizó poco más de 50 m. Aquí se observa nuevamente la diferenciación de unidades geoelectricas, la profunda de resistividades altas asociada a las calizas y, sobre ésta, la de resistividades medias asociada a las arcillas.

La capa de arcillas muestra una gran presencia de valores bajos de resistividad indicando una fuerte saturación e incluso tubificación también donde se observan concentraciones circulares.

6.2 Modelo pseudo3D

El modelo Pseudo3D consiste en el apilado de los perfiles 2D para una visualización completa en el espacio. En la figura 6.2.1 se puede apreciar tal modelo, que se realizó con la ayuda del *software* Voxler, apilando los 14 perfiles 2D comentados en la sección anterior.

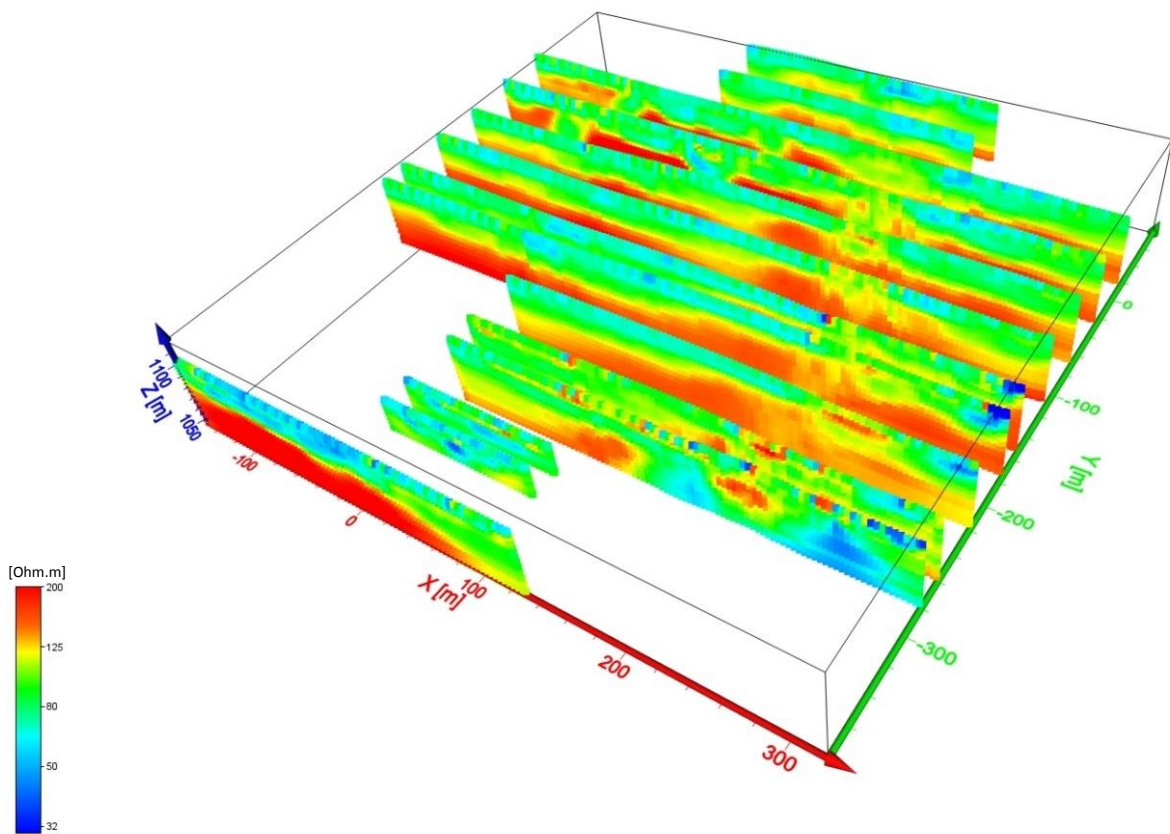


Figura 6.2.1 Modelo pseudo3D a partir de los 14 perfiles 2D.

6.2.1 Observaciones y comentarios

El modelo pseudo3D obtenido permite observar con mayor claridad los rasgos geológicos que tienen continuidad a lo largo del terreno. Se ve claramente la diferenciación de las dos unidades geoeléctricas, la más resistiva asociada a las calizas en la base y una un poco más conductiva asociada a las arcillas, que es la somera. Además, están los rasgos de menor resistividad asociados a la concentración de agua encontrados principalmente en la capa geoeléctrica superficial, con excepción de la zona sureste en la que se observa una gran concentración a profundidad.

Esta disposición de los perfiles ayuda a observar una continuidad en las formas asociadas a la disolución de las calizas que se comentaron en la sección anterior, aunque únicamente se da a lo largo de dos perfiles, es decir, 40 m o poco más.

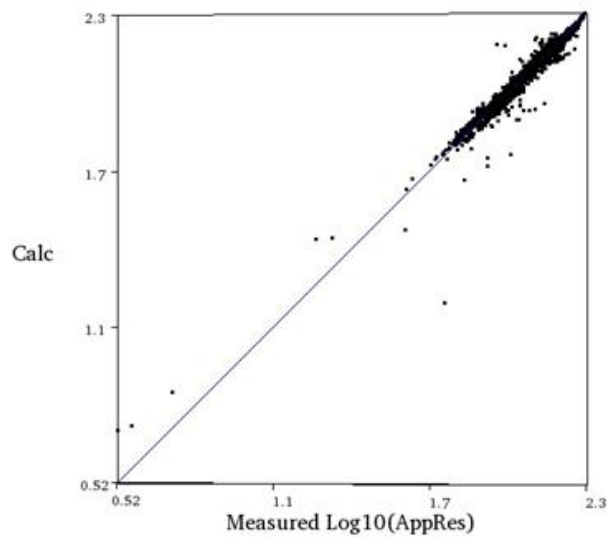
También se observa bien marcada la secuencia del cuerpo resistivo superficial a lo largo de la zona este del terreno, con el patrón de desplazamiento hacia la derecha que se observó y comentó en los perfiles 2D.

Es importante observar el aumento en la concentración de valores de baja resistividad conforme se llega a los últimos perfiles, es decir, a zonas más bajas; lo que confirma la dirección de flujo en sentido de la pendiente.

6.3 Modelo 3D

El error RMS del modelo 3D fue de 3.8% que es un valor bajo dentro del rango aceptado (10%), por lo que puede decirse que los resultados son confiables. En la gráfica de error de la figura 6.3.1 puede observarse que el ajuste a la recta, de los datos medidos y calculados, es muy bueno, donde el porcentaje de error obtenido se debe a los pocos puntos que se encuentran dispersos.

Apparent Resistivity Crossplot



Iteration No. 8. RMS = 3.8%. L2 = 0.6

Figura 6.3.1 Gráfica de error de la inversión 3D, donde se presentan los valores medidos contra los calculados.

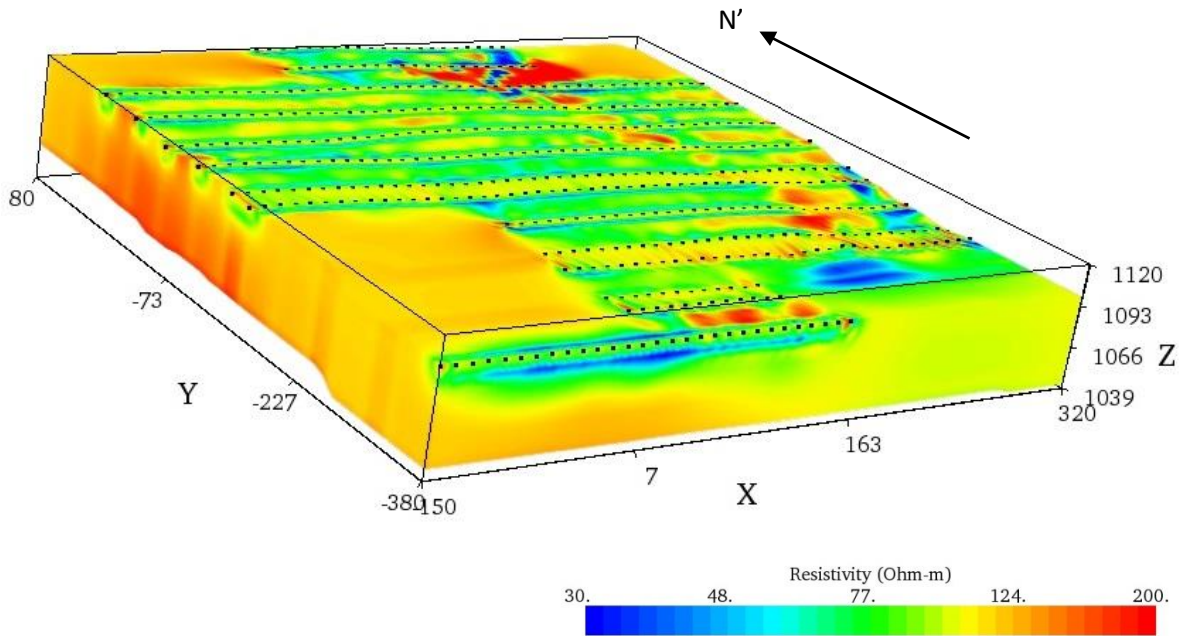


Figura 6.3.2. Modelo resultante de la inversión 3D en EarthImager.

El modelo resultante del EarthImager (Fig. 6.3.2) permite visualizar únicamente la parte externa del cubo; sin embargo, para el objetivo de este estudio lo que se observa en la parte superficial de este modelo es importante:

- Se logra ver en la parte norte (N') un área donde aflora, o es muy superficial, el cuerpo resistivo. Este detalle que en los perfiles 2D no se observa, aquí se marca perfectamente. Por otro lado, lo que puede comprobarse de los perfiles con esta inversión es la continuidad del mismo cuerpo resistivo aflorando a lo largo de la parte oriente del terreno.
- Existe una tendencia de los valores de resistividad, que se presentan alineados a las líneas de adquisición, al ver la parte lateral del modelo se observa que es un fenómeno muy superficial. Este efecto llamado *banding* (Loke, M.H. & Dahlin, T., 2010) es causado por el algoritmo de inversión, generalmente, cuando los datos 3D son adquiridos por medio de líneas 2D, con espaciamiento entre éstas mayor al espaciamiento electródico.

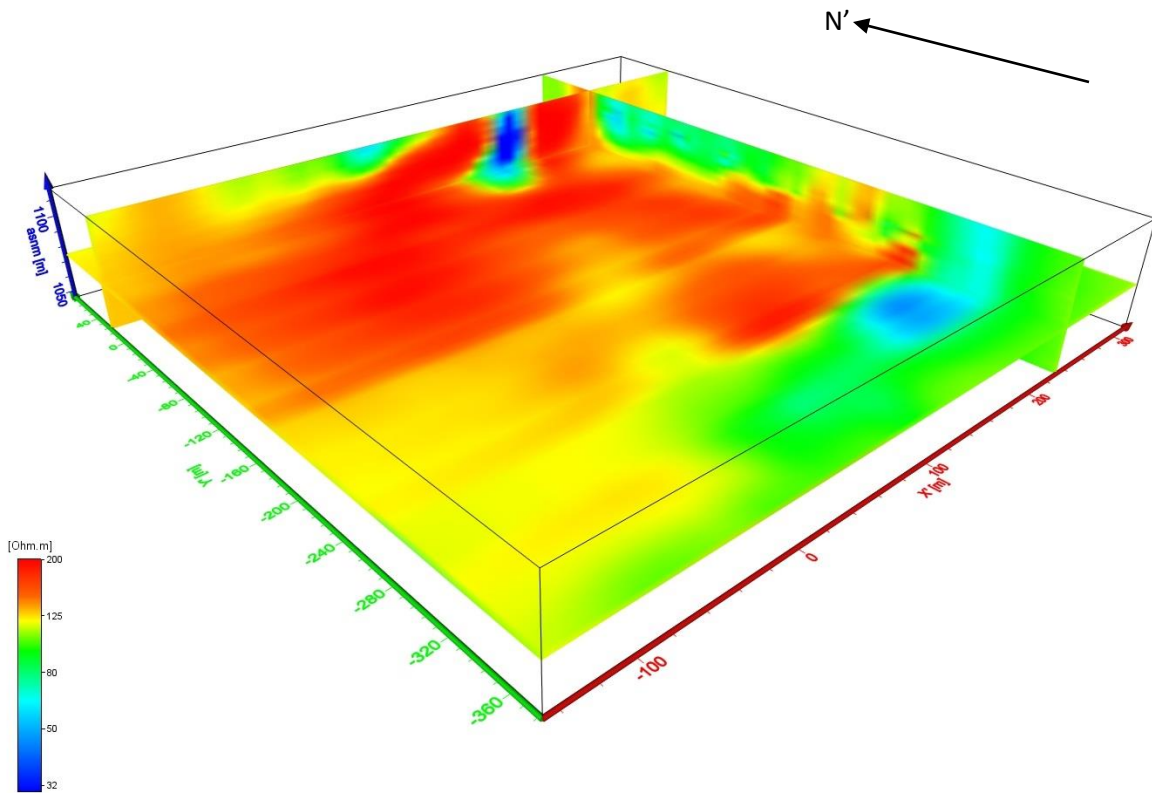


Figura 6.3.3. Imagen de visualización en Voxler, donde se muestra la intersección de los tres planos ortogonales.

En la figura 6.3.3 observamos la intersección de tres planos ortogonales, esta imagen es la visualización de los datos en el *software* Voxler y se eligió en esa posición ya que permite observar:

- La extensión del cuerpo resistivo en el plano horizontal.
- En el plano YZ se observa muy bien la zona norte en la que aflora claramente el cuerpo resistivo, pero también se aprecia que justo en el centro del mismo, en la zona superficial, hay una concentración importante de agua.
- El plano XZ permite visualizar, nuevamente, un poco de la continuidad del cuerpo resistivo que aflora a lo largo de la zona este.

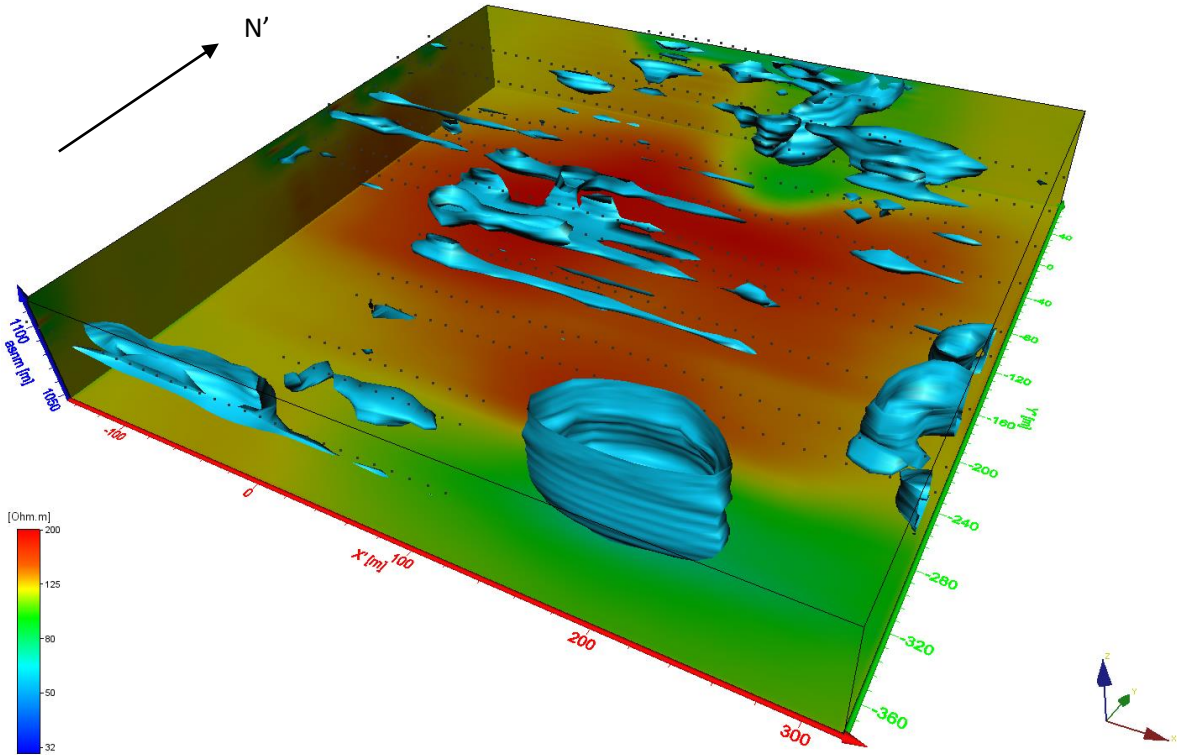


Figura 6.3.4. Superficie de Isovalor $\rho = 60 [\Omega \cdot m]$

Mediante el *software* de visualización Voxler es posible crear superficies de isovalores. En la figura 6.3.4 se observa una superficie con valor de resistividad de $60 [\Omega \cdot m]$; se eligió tal valor pues, al realizar variaciones del mismo, resulta ser la más representativa del cuerpo asociado a mayor saturación de agua.

Se logra ver también un poco del efecto *banding* mencionado anteriormente, sin embargo, es posible distinguir claramente los cuerpos de interés. En la parte norte hay dos cuerpos que muestran muy bien una gran concentración de agua, en uno de ellos se logra ver la dirección perpendicular al tendido, coincidiendo con la dirección del drenado superficial que se observa en la figura 2.4.1.

También hay un cuerpo en la parte este, entre -80 y -240 m en Y' , con la misma dirección perpendicular a la adquisición, la forma que presenta puede ser indicador de tubificación. Además, en la parte sureste se observa un cuerpo que podría indicar una gran concentración; sin embargo, este es un efecto de la interpolación del algoritmo de inversión, dado que en esa zona no se tiene información real pues no se colocaron electrodos. Por lo tanto, los resultados de esta zona son falsos.

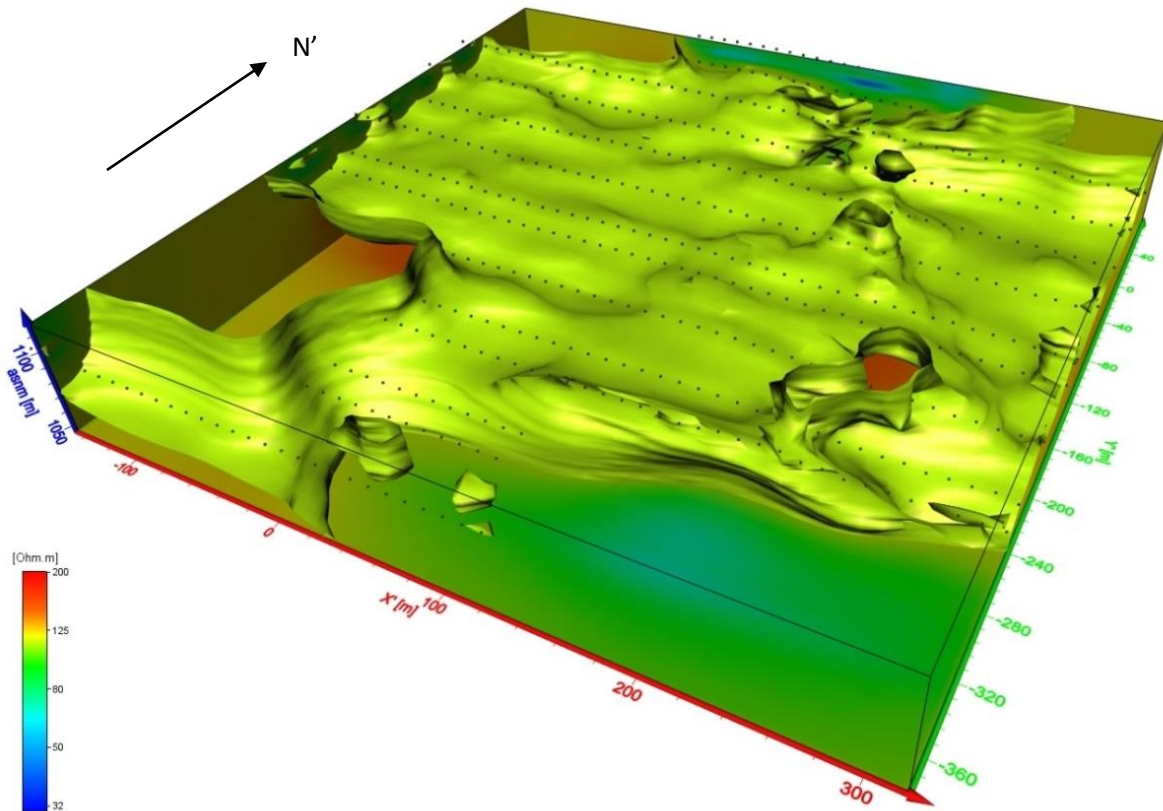


Figura 6.3.5. Superficie de Isovalor $\rho = 95 \text{ [}\Omega \cdot \text{m]}$

Con el mismo *software* se obtuvo otra superficie de isoval, con resistividad de $95 \text{ [}\Omega \cdot \text{m]}$ (Fig. 6.3.5), que muestra un cuerpo que se encuentra cubriendo toda la zona de interés, esta superficie es la base de la unidad geoelectrica superficial que puede asociarse a la base de las arcillas.

Es interesante observar que hay sitios donde la continuación de los valores va hacia la superficie y en el centro hay un vacío de valores, la forma más representativa es la ubicada aproximadamente en la cota (200, -160) en X' y Y', los cuales coinciden con la secuencia donde las calizas están muy superficiales o aflorando.

Al sur del modelo, así como en una zona al suroeste y ambas esquinas al norte, la superficie no muestra continuidad, esto se debe a que no se colocaron electrodos en esas áreas y, por lo tanto, no se tiene información real.

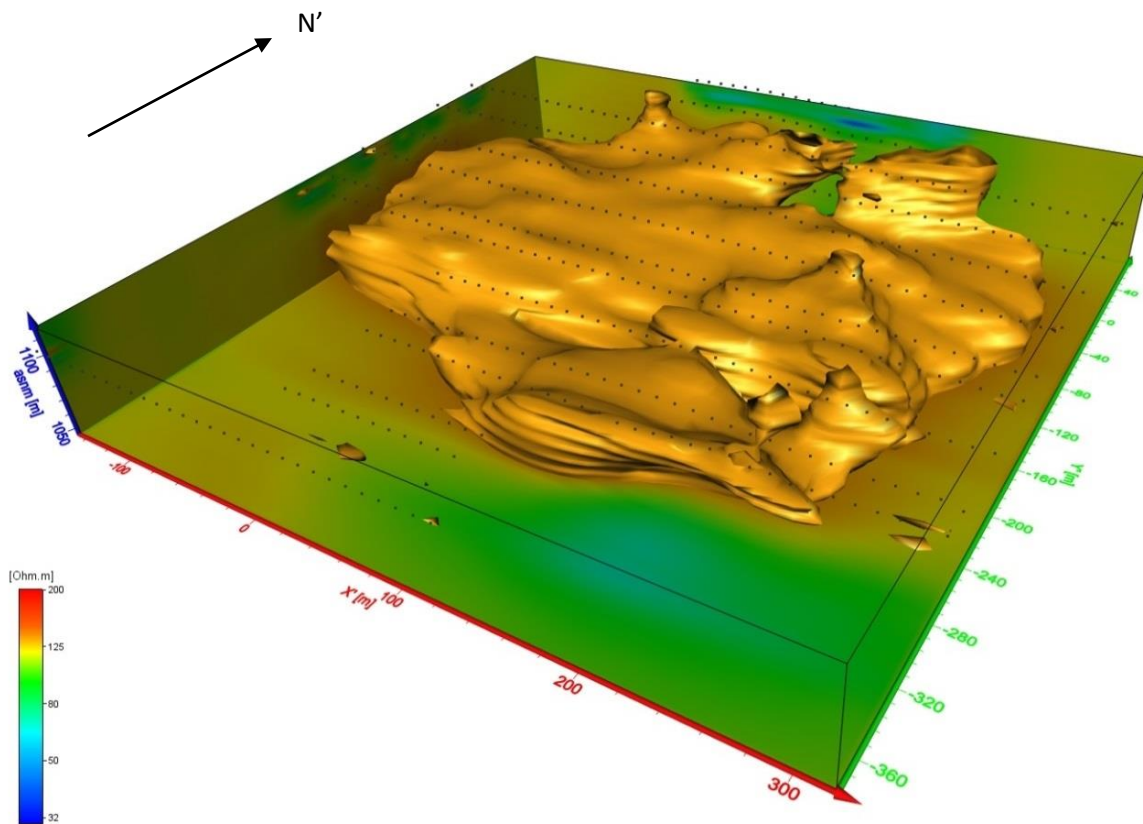


Figura 6.3.6. Superficie de Isovalor $\rho = 145[\Omega \cdot m]$

Finalmente, se presenta la superficie con resistividad de 145 [Ohm·m] (Fig. 6.3.6) donde se ve un cuerpo profundo que es asociado al basamento de calizas, en la zona norte (N') del terreno se observa una continuidad de los valores hacia la parte superior del modelo, que también se muestra, en formas más pequeñas, hacia el sur del modelo. Estas pequeñas áreas que parecen estar superficiales corresponden a los espacios sin valores presentados en la figura 6.3.5 y, a su vez, también coinciden con la secuencia de calizas superficiales que se estuvo analizando en los resultados de inversión 2D de los perfiles. Se observa también que la profundidad de esta unidad es menor alrededor de las zonas donde aflora o está muy superficial, lo cual indica que la potencia de la capa de arcillas disminuye.

6.4 Integración de resultados

En los capítulos iniciales de este trabajo se brindó la información geológica del lugar, en donde se tiene, como basamento, la Formación Orizaba de calizas y sobre ella un lahar areno-arcilloso como contribución del arrastre de materiales provenientes del Pico de Orizaba. Además, se dio un panorama amplio de la situación hidrológica del lugar y también se mostraron los rangos de valores de resistividad que pueden tomar los materiales de interés.

Teniendo estos conocimientos, es posible realizar una correlación con los resultados analizados anteriormente, en los cuales se distinguen claramente dos unidades geoeléctricas que pueden asociarse a las capas geológicas mencionadas. En la parte profunda, está una unidad resistiva, con un rango de resistividades de 120 a 200 [Ohm·m], asociada a las calizas y, sobreyaciendo a esta, una unidad con valores de resistividades medias, entre 70 y 100 [Ohm·m], asociada a arcillas saturadas, de espesor que presenta variaciones en un rango de 20 a 10 m, aproximadamente.

La saturación de agua en el terreno es considerable, no se logran ver flujos continuos claramente marcados en el subsuelo que indiquen caminos preferenciales del agua; sin embargo, se observan concentraciones importantes, ubicadas principalmente en la capa geoeléctrica asociada a las arcillas, que pueden indicar el efecto de tubificación y que, a la larga, puede producir ductos continuos a lo largo del terreno. Esta asociación puede realizarse gracias a los antecedentes del lugar y a la evidencia mostrada en la fotografía de la figura 2.4.2.

Es importante hacer hincapié en el hecho de que los resultados en áreas donde no se miden datos directamente en campo son creación numérica del algoritmo de inversión que utiliza el *software*. En los modelos presentados se observa una zona al sur que aparece con gran saturación, sin embargo, sobre ésta no se realizó adquisición pues es el lugar donde están los edificios y, por lo tanto, los valores arrojados en ese lugar son falsos.

Finalmente está la unidad resistiva asociada a las calizas, la cual conforma el basamento de la zona de estudio. Existe una secuencia que recorre la parte este del terreno en donde las calizas se encuentran aflorando y otra zona en la que están muy superficiales.

Sin embargo, en esta unidad resistiva se presentan algunas formas elípticas o circulares que, gracias a los antecedentes geológicos, podemos asociar a la disolución de las calizas; también hay evidencia de fracturamiento y se suponen cambios de compactación por la variación que presentan los valores de resistividad en la misma unidad. La combinación de los tres fenómenos mencionados puede ser un problema a futuro ya que el fracturamiento da paso a la disolución y ésta, a su vez, a sistemas kársticos, los cuales son comunes en la región, como se expuso en el capítulo de antecedentes de la zona en este trabajo.

El lugar propicio para construir es aquel donde el material más competente esté aflorando o se encuentre más cercano a la superficie. Para este caso, el material más competente es la caliza, por lo que se decide definir tres zonas en el terreno:

- 1) Zona óptima, aquella donde prácticamente afloran las calizas, es la secuencia comentada constantemente en la descripción de los resultados y que se observa como una franja a lo largo de la zona este E' del terreno, con una longitud de aproximada de 300 m y una extensión lateral alrededor de 40 m, exceptuando la parte norte en la que se observa más amplia (Fig. 6.3.3) con 150 m aproximadamente.
- 2) Zona factible, donde la potencia de la capa de arcillas es menor a 10 m y, por lo tanto, las calizas no afloran pero se encuentran someras. Esta zona se define a partir del perfil L5 (Fig. 6.1.2) hasta el perfil L10 (Fig. 6.1.3), justo a la izquierda de la zona óptima, con extensión variable que va de 50 a 100 m, en algunos casos.
- 3) Zona no recomendable, que es el resto del terreno, en donde la potencia de la capa del lahar areno-arcilloso es de 20 m aproximadamente, lo cual implica una gran inestabilidad en el terreno y, por consiguiente, para los cimientos, debido a las propiedades de las arcillas, también expuestas en los antecedentes.

En la figura 6.4.1 se muestra el terreno que fue cubierto con este estudio bordeado con una línea en rojo, además se puede observar la zona óptima (1) para construcción definida con un polígono de color morado y la zona factible (2) con un polígono azul. El área restante representa la zona en la cual no se recomienda que se realicen trabajos de construcción (3).

Al unir las zonas 1 y 2, que conforman el área recomendable para construir, las dimensiones aproximadas son de 100 x 315 m, que equivale a 3.1 ha, lo cual representa la quinta parte del terreno cubierto por este estudio.

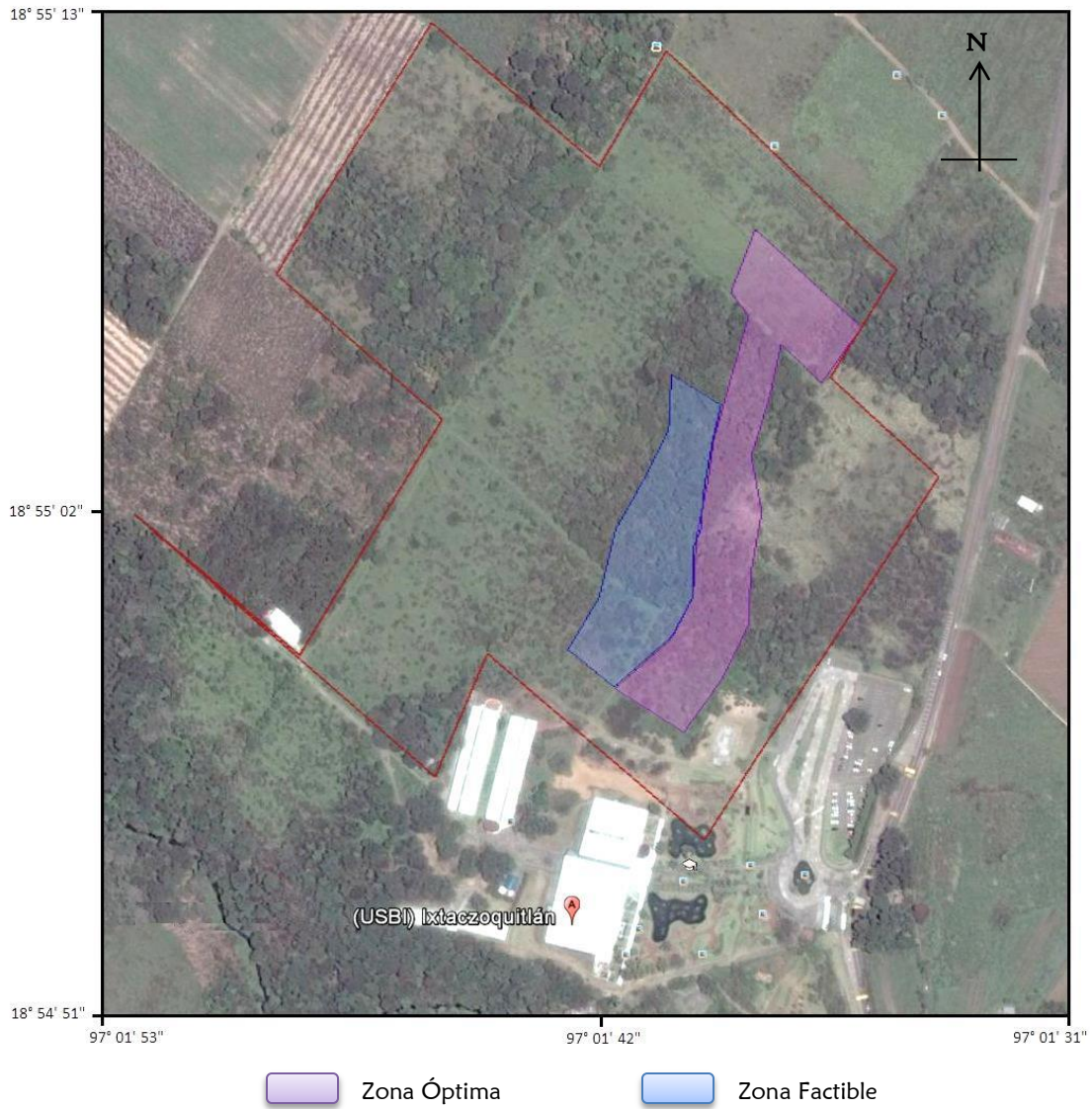


Figura 6.4.1 Se muestra el terreno cubierto en este estudio con un perímetro en rojo, en el que se define una zona óptima y otra zona factible para construcción (Google Earth).

7. CONCLUSIONES

El método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) muestra resultados que son acordes a la geología reportada en el lugar y a la problemática que presenta la zona, con respecto a valores de resistividad que corresponden al flujo de agua (alrededor de 60 [Ohm·m]) en las dos unidades geoeléctricas, representadas por el lahar areno arcilloso y las calizas de la Formación Orizaba.

Los resultados de la TRE permiten apreciar la problemática y complejidad del fenómeno a profundidad, en los que se confirma el panorama esperado de un medio arcilloso saturado en la superficie y un basamento de calizas donde se detectaron rasgos que sugieren fracturamiento y disolución (perfiles L3 y L4 de la figura 6.1.1), lo que puede confirmarse con los antecedentes de la zona (apartado 2.3.1).

Se puede observar una congruencia de las evidencias del sentido del flujo superficial (Fig. 2.4.1), que es de las zonas más altas a las más bajas, con los valores de resistividad correspondientes al flujo subterráneo (Fig. 6.3.4).

Se puede apreciar en la TRE que la unidad geoeléctrica asociada a la formación Orizaba se encuentra aflorando en una secuencia estrecha y continua a lo largo del este (E') de la zona de estudio (Fig. 6.2.1).

Este estudio ayuda a entender la distribución y comportamiento del subsuelo en el terreno del campus, donde ya existen edificaciones con problemas estructurales. Asimismo, permite visualizar distintos escenarios, aportando información relevante para la toma de decisiones sobre futuras obras civiles a realizarse.

Desde un punto de vista geofísico, el lugar más favorable para construir es aquel en donde se encuentre el material más competente. Con base en los resultados de este estudio, se proponen dos zonas para la construcción: una zona óptima, que es representada por la franja de calizas que afloran en el terreno; y una factible, definida en el espacio donde el espesor de la capa del lahar areno-arcilloso es menor al del resto del terreno y, por lo tanto, la inestabilidad que representa para los cimientos se ve disminuida al encontrarse las calizas más superficiales.

REFERENCIAS

Artículos

Aizebeokhai, A. (2010). 2D and 3D geoelectrical resistivity imaging: Theory and field design. *Scientific Research and Essays*. Vol 5, No. 23, P. 3592-3605.

Dahlin, T., Bernstone, C., and Loke, M.H. (2002). A 3-D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden. *Geophysics*, Vol 67, No. 6, P. 1692-1700.

Dahlin, Torleif and Bing, Zhou (2003). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with ten electrode arrays. Revised version for Geophysical Prospecting.

Daily W., Ramírez, A., Binley, A., LaBrecque, D., (2004). Electrical resistance tomography. *The Leading Edge*.

Edwards, L.S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, Vol 42, No. 5. P. 1020-1036.

Instruction Manual for EarthImager 2D. Advanced Geosciences, Inc., 2002-2009.

Loke, M.H. (2010). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.

Loke, M.H. and Barker, R.D. (1995). Least-squares deconvolution of apparent resistivity Pseudosections. *Geophysics*, Vol 60, No. 6. P.1682-1690.

Loke, M.H. and Barker, R.D. (1996). Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 499-523.

Loke, M.H. and Dahlin, T. (2010). Methods to reduce banding effects in 3-D resistivity inversion. *Near Surface 2010*.

Oldenburg, D. W. and Li, Y. (2005). Inversion for applied geophysics: A tutorial. Invited chapter in *Investigations in Geophysics* No.13: Near-surface, D. K. Butler Ed. Soc. Expl. Geophy, 89-150.

Tsourlos, P., Szymanski, J., Tsokas, G. (1999). The effect of terrain topography on commonly used resistivity arrays. *Geophysics*, Vol. 64, No. 5, P. 1357-1363.

Pereyra Díaz, D., J. A. A. Pérez Sesma y M. R. Salas Ortega (2010). "Hidrología", en Florescano, E., J. Ortiz Escamilla (coords.), Capítulo en *Atlas del Patrimonio Natural, Histórico, Cultural de Veracruz*, tomo I, Gobierno del Estado de Veracruz–Universidad Veracruzana.

Libros

Cifuentes Nava, G. (1994). *Interpretación de anomalías geoeléctricas por análisis de Fourier* (Tesis de Licenciatura). Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.

Crespo Villalaz, E. (5ta ed). (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Limusa

De La Fuente Utrilla, H.A. (2012). *Evaluación de la seguridad de los bordos de protección sometidos al fenómeno de vaciado rápido* (Tesis de maestría). Facultad de Ingeniería, UNAM. México, DF.

F.G.H. Blyth and M.H. de Freitas (3era ed). (1998). *Geología para Ingenieros*. México: Compañía Editorial Continental, S.A. DE C.V.

González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Education.

Gubbins, David (2006). *Time series analysis and inverse theory for geophysicists*. Cambridge.

Menke, W. (1989). *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory*. Vol. 45 in International Geophysics Series by AcademicPress, Inc.

Menke, William (3rd ed). (2012). *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory. – MatLab ed.*

Orellana, Ernesto (1982). *Prospección geoeléctrica en corriente continua*. Ed. Paraninfo.

Rodríguez Elizarrarás, S. (2011) *Peligros geológicos más frecuentes en el estado de Veracruz*. Xalapa: Universidad Veracruzana.

Tarantola, Albert (1987). *Inverse problema theory*. Elsevier

Telford, W. M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. (2nd ed). (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge.

Sitios Web:

Carnicero, A., Curso Introductorio al Método de los Elementos Finitos y al Programa Ansys. A. Carnicero y C. Príncipe. Apuntes internos ICAI. Recuperado de:
(http://www.iit.upcomillas.es/~carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf)

Comisión Nacional del Agua, 2011. Atlas del agua en México. Recuperado de:
(<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-18-11.pdf>)

García Romero, E., Suárez Barrios, M. Las arcillas: propiedades y usos. Recuperado de:
(<http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/arcillas.htm#propfq>)

Iris Instruments, Syscal Pro, resistivity & equipment for sounding, imaging and monitoring. Recuperado de: (http://www.iris-instruments.com/Pdf%20file/SyscalPro_Gb.pdf)

Ixtaczoquitlán, Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Estado de Veracruz-Llave. Recuperado de:
(<http://www.e.local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM30veracruz/municipios/30085a.html>)

Municipio de Ixtaczoquitlán, Ver., 2007. Recuperado de:
(<http://tebaevzapoapan.blogspot.mx/2007/11/municipio-de-ixtazoquitlan-ver.html>)

Rodríguez Elizarrarás, S., Morales Barrera, W. *Geología*. Recuperado de:
(<http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/9648/1/02GEOLOGIA.pdf>)