

Importancia de la tomografía de resistividad eléctrica en la ingeniería Civil

Nicolás Barbosa Parra

Jhon Jairo Torres Monsalve

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

Ingeniería Civil

Bogotá D.C., Colombia

2020

Importancia de la tomografía de resistividad eléctrica en la ingeniería Civil

Nicolás Barbosa Parra

Jhon Jairo Torres Monsalve

Tesis Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

Ingeniero Civil

Director

Ph.D Carlos Martín Molina

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

Ingeniería Civil

Bogotá D.C., Colombia

2020

Firma Jurado 1

Firma Jurado 2

Bogotá D.C., mayo, 2020

Dedicatoria y agradecimientos

Dedicamos este trabajo principalmente a Chuchito,

A nuestros padres y hermanos,

Por apoyarnos en cada logro de vida

Agradecemos a todos los docentes de la universidad Antonio Nariño

Que nos han guiado al crecimiento profesional y personal

Primordialmente al Ph.D Carlos Martín Molina

Por todo el apoyo, la paciencia brindada

Y acompañamiento constante.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	7
ABSTRACT	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
3. OBJETIVOS.....	10
3.1. Objetivo general.....	10
3.2. Objetivos específicos	10
4. MARCO CONCEPTUAL	11
4.1. Estudios geológicos con método ERT.....	11
4.2. Litología.....	11
4.3. Tomografía eléctrica	11
4.4. Dispositivos de distribución electrónica	12
4.5. Variación del método ERT	15
4.6. La conductividad	15
4.7. Tomografía de resistividad eléctrica bidimensional	15
4.8. Tomografía de resistividad eléctrica tridimensional.....	16
4.9. Prospección eléctrica	16
4.10. Valores RMS	16
4.11. Ventajas	17
5. ESTADO DEL ARTE.....	18
5.1. Ingeniería hidráulica	19
5.2. Ingeniería estructural	20
5.3. Ingeniería de pavimentos.....	21
5.4. Ingeniería geotécnica	22
6. METODOLOGÍA.....	24
6.1. FASE 1	24
6.1.1. Enfoque	24
6.1.2. Diseño de la investigación.....	25
6.2. FASE 2.....	33
6.2.1. Métodos de recolección de datos en ERT.....	33
6.2.2. Equipos para la recolección de datos de ERT	39
6.3. FASE 3	43
6.3.1. Herramientas de procesamiento de datos ERT	43
7. CASO DE ESTUDIO EN EGIPTO	45
7.1.2. Resultados.....	52

7.1.3. Análisis	54
7.1.4. Conclusiones	55
8. APLICACIÓN EN COLOMBIA DE LA “ERT”	56
8.1. Propuesta de implementación de ERT para Colombia	56
8.1.1. Consideraciones pertinentes al método ERT	58
8.2. Casos de estudio llevados en Colombia con tomografía de resistividad eléctrica ERT	
59	
8.2.1. Discusión	61
9. CONCLUSIONES	63
10. BIBLIOGRAFÍA	65
11. ANEXOS	75
11.1. Valores de resistividad aparente	75

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 Fases de la metodología de estudio</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3 Comparación de la profundidad y resolución de los principales métodos de ERT aplicados a obras civiles .</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 4 sistema de 32 electrodos en Colombia fuente (subsuelo3d, 2019).....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 5 aplicación de tomógrafo de resistividades eléctricas en Colombia fuente. Autores.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 6 geología de Sohag, Egipto fuente (Abudeif et al., 2020)</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 7 geología de Huila, Colombia fuente. (Acosta et al., 2002).....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 8 geología de Huila, Colombia fuente. (Acosta et al., 2002).....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 9 valores típicos de resistividad de los materiales fuente (Arias, 2011)</i>	<i>75</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 configuración Wenner fuente (Barriga Acapana, 2017)</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2 configuración Schlumberger fuente (Barriga Acapana, 2017)</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3 configuración Dipolo-Dipolo fuente (Barriga Acapana, 2017).....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4 línea de tomografía eléctrica fuente. (Huillca, 2018).....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 5 Posición espacial de los valores de resistividad aparente Wenner fuente: (Jiménez, 2015)</i>	<i>35</i>
<i>Figura 6 Posición espacial de los valores de resistividad aparente schlumberger fuente: (Jiménez, 2015)</i>	<i>36</i>
<i>Figura 7 Posición espacial de los valores de resistividad aparente dipolo-dipolo fuente: (Jiménez, 2015).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 8 área de estudio Sohag, Egipto fuente (Abudeif et al., 2020)</i>	<i>46</i>
<i>Figura 9 temperaturas medias y precipitaciones de Sohag, Egipto fuente. (Meteoblue, 2020)</i>	<i>47</i>
<i>Figura 10 perfil 1 tomografía de resistividad eléctrica 2D fuente. (Abudeif et al., 2020)</i>	<i>48</i>
<i>Figura 11 perfil 2 tomografía de resistividad eléctrica 2D fuente. (Abudeif et al., 2020)</i>	<i>49</i>
<i>Figura 12 perfil 3 tomografía de resistividad eléctrica 2D fuente. (Abudeif et al., 2020)</i>	<i>49</i>
<i>Figura 13 perfil 4 tomografía de resistividad eléctrica 2D fuente. (Abudeif et al., 2020)</i>	<i>50</i>
<i>Figura 14 perfil 5 tomografía de resistividad eléctrica 2D fuente. (Abudeif et al., 2020)</i>	<i>50</i>
<i>Figura 15 perfil 6 tomografía de resistividad eléctrica 2D fuente. (Abudeif et al., 2020)</i>	<i>51</i>
<i>Figura 16 perfil 7 tomografía de resistividad eléctrica 2D fuente. (Abudeif et al., 2020)</i>	<i>51</i>
<i>Figura 17 perfil 8 tomografía de resistividad eléctrica 2D fuente. (Abudeif et al., 2020)</i>	<i>52</i>

RESUMEN

La tomografía de resistividad eléctrica (TRE) se presenta como un método útil en la obtención de datos del subsuelo de manera no invasiva y rápida con amplia información, enviando una corriente eléctrica al terreno, posteriormente la medición de potencial que obtiene los valores de resistividad del suelo por parte de las configuraciones electrónicas, esto se evidencia de manera gráfica con imágenes en 2D y 3D, este documento presenta la manera en que se ha venido implementando el método a nivel mundial para estudios relacionados con ámbitos de la ingeniería civil, evidenciando las variaciones que se pueden optar de acuerdo al objeto propuesto de investigación.

Palabras clave – resistividad, configuraciones electrónicas, tomografía.

ABSTRACT

The electrical resistivity tomography (ERT) is presented as a useful method in obtaining subsoil data in a non-invasive and fast way with extensive information, sending an electric current to the ground, subsequently measuring the potential that obtains the soil resistivity values by of the electronic configurations, this is evidenced graphically with 2D and 3D images, this document presents the way in which the method has been implemented worldwide for studies related to areas of civil engineering, evidencing the variations that can be choose according to the proposed research object.

Key words - resistivity, electronic configurations, tomography.

1. INTRODUCCIÓN

Las exploraciones en campo son de suma importancia para obtener información relevante de cualquier punto de estudio en todo tipo de obra civil, por lo tanto es fundamental la innovación y el constante progreso en los métodos de investigación, como apoyo en el desarrollo de la industria y las tecnologías de aplicación.

En las ramas ingeniería civil se han venido implementando los métodos geofísicos como fuente de adquisición y modelamiento de la información del subsuelo, el presente documento tiene por objeto presentar las aplicaciones y uso del método de la tomografía de la resistividad eléctrica ERT(Electrical resistivity tomography) por sus siglas en inglés, este presenta la conformación del subsuelo de manera concisa a partir de los perfiles de tomografía, con la inyección de corriente al terreno y posterior medida de potencial, la representación de imágenes bidimensionales y tridimensionales se dan por las discontinuidades o anomalías presentes en el subsuelo, expresando valores de resistividad. Con el fin de recopilar experiencias del método en campo, de fuentes bibliográficas internacionales aplicadas a las ramas de la ingeniería civil, consecuente a esto integrar casos en los que la tomografía tenga gran desempeño de exploración, para dar aporte al aumento y posibles aplicaciones en la ingeniería colombiana.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La poca investigación con métodos de prospección geofísica aplicados en Colombia para la obtención de resistividades y perfiles del suelo en las ramas de la ingeniería civil, lo que permite proponer los siguientes interrogantes, ¿Qué aporta el método de tomografía de resistividad eléctrica ERT en la exploración de la diversidad de suelos encontrados en Colombia?, ¿cuál sería la configuración electrónica adecuada que otorgue mayor eficiencia en la toma de datos de las diferentes áreas de la ingeniería civil?

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Elaborar un estado del conocimiento sobre la implementación del método de la tomografía de resistividad eléctrica (ERT por sus siglas en inglés) en la ingeniería civil.

3.2. Objetivos específicos

- Plantear las alternativas evidenciadas en las literaturas de aplicación del método en campo de investigación
- Analizar la aplicación del uso de la ERT en la ingeniería civil a partir de un estudio de caso.
- Presentar en qué tipo de obras civiles se ha usado y puede implementarse la ERT en Colombia.

4. MARCO CONCEPTUAL

Para el desarrollo del estado del conocimiento se establecen términos a lo largo del documento, se pretende establecer los principales conceptos que están presentes con mayor frecuencia en la aplicación del método de la tomografía de resistividad eléctrica, con el fin de entender y asociar estos en campo para su uso y posterior creación de imágenes de resistividad.

4.1. Estudios geológicos con método ERT

Esta permite identificar el origen y naturaleza de la litología en el área de estudio, con esta evidenciar la presencia de elementos estructurales o fallas (de Bari et al., 2011) mediante el cual se tiene una base para la prospección del terreno.

4.2. Litología

Es la caracterización de las rocas de una formación geológica, en el método permite la relación con las resistividades de los materiales expuestos en las imágenes de la prospección.

4.3. Tomografía eléctrica

Es una tecnología nueva no invasiva la cual se encuentra desarrollando diferentes tipos de formas para su aplicación, en el mundo moderno la innovación y los bajos costos van de la mano, es ahí cuando la tomografía saca a relucir su versatilidad tanto en usos como en la toma de datos, hace que su implementación sea cada vez más frecuente en el estudio de suelos, es relevante para obtener determinaciones satisfactorias, con estas poder dar una explicación más minuciosa y clara de esta tecnología la cual la acompañan diferentes configuraciones de electrodos a lo largo terreno determinado, georeferenciado para garantizar la precisión de la toma de datos, estos arreglos son Wenner, Schlumberger y dipolo-dipolo son los que se emplean en el método y cada

uno garantiza diferentes tipos de resolución, profundidad, que generan una interpretación diferente para cada uno.

Para poder hacer factible esta investigación se hace uso de diferentes herramientas de impacto con las cuales se recopilara la información necesaria con el fin de ver las diferentes aplicaciones de la tomografía en la ingeniería civil además como está es tan útil para el mundo.

4.4. Dispositivos de distribución electrónica

Para cualquier configuración electrónica, si se conoce el factor geométrico k , la corriente eléctrica I inyectada por los electrodos A y B, y la diferencia de potencial entre los electrodos M y N, se logra calcular la resistividad aparente mediante $\rho = k \Delta V / I$. (Arias, 2011)

Las configuraciones tetra electródicas lineales más implementadas son los siguientes:

- Configuración Wenner

Consiste en la ubicación de cuatro electrodos A, M, N, B ubicados a una distancia “a” entre electrodos como se muestra en la figura (1), Pretende colocar dos electrodos de potencial A y B en la parte central del modelo, por otra parte los electrodos M y N que son de corriente se ubican en los extremos.

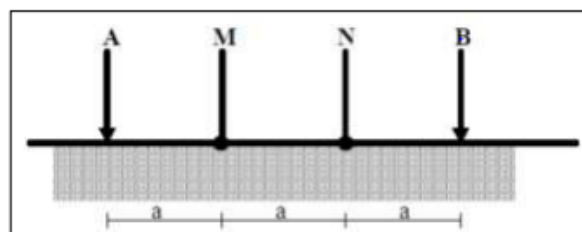


Figura 1 configuración Wenner fuente (Barriga Acapana, 2017)

El factor geométrico para este dispositivo es:

$$k=2*\pi*a$$

- Configuración Schulumberger.

Se compone de un sistema de los electrodos A M N B dispuestos en línea, donde la distancia de los electrodos detectores M N es mucho menor que la de los inyectores AB (figura 2). En la práctica, $AB > 5MN$.

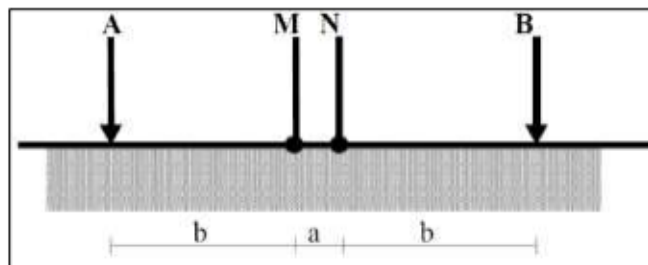


Figura 2 configuración Schulumberger fuente (Barriga Acapana, 2017)

Factor geométrico para este arreglo es:

$$k = \pi \frac{b(b + a)}{a}$$

- Configuración Dipolo-Dipolo

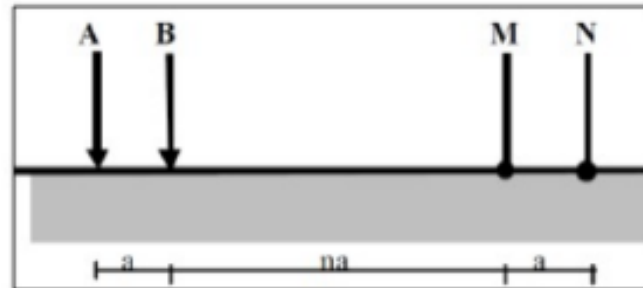


Figura 3 configuración Dipolo-Dipolo fuente (Barriga Acapana, 2017)

En esta configuración los electrodos se localizan sobre una línea en el orden A B M N formando el factor geométrico, es en este caso

$$k = -\rho \cdot n \cdot (n+1) \cdot (n+2) \cdot a$$

Este dispositivo se emplea normalmente con $n \gg 1$ (entonces AB y MN se da como un dipolo de corriente y de potencial respectivamente), muchos autores utilizan esta configuración incluso con $n = 1$. El factor geométrico cuando $n \gg 1$ se puede expresar como:

$$k = -\pi \cdot n^3 \cdot a$$

Esta configuración presenta un inconveniente en el que el campo dipolar decrece con el cubo de la distancia entre los dipolos de corriente y potencial, por lo que necesita detectores más sensibles que los otros dispositivos (Barriga Acapana, 2017).

Por su versatilidad y resolución se adapta para investigar hasta profundidades que pueden llegar a centenares de metros, la Tomografía eléctrica es aplicable a cualquier estudio del subsuelo donde interese identificar todo tipo de accidentes o discontinuidades que presentan un contraste

suficiente en la distribución de resistividad del medio rocoso de los recursos hídricos. (Xin Zhang, 17 May 2016).

4.5. Variación del método ERT

En la tomografía de resistividad eléctrica (ERT) intervienen factores tipológicos a lo largo de las exploraciones existentes. A través de los enfoques investigativos se tiene como primicia para la obtención de la resistividad eléctrica del subsuelo para esto se interponen las variaciones de la litología, geología, factores climáticos, aumento del contenido de agua y la presencia de capa freática (Kumar et al., 2020; Llerena, 2019; Naudet et al., 2008).

4.6. La conductividad

Es la capacidad que tienen los materiales para permitir el paso o la conducción de la corriente a través de ellos, a manera que la relación de la resistividad es inversa a la conductividad (Faz et al., 2006), por lo tanto en cuanto mayor sea el contraste de resistividad de los materiales mayor será la resolución y la profundidad varia en cuanto a la distancia de los electrodos aumenta, la profundidad de investigación será mayor (Huaqui & Angel, 2019).

4.7. Tomografía de resistividad eléctrica bidimensional

Se utiliza para mapear la variación lateral de la resistividad en función de la profundidad (Rangel et al., 2018), promoviendo la obtención de datos a lo largo de la línea de reconocimiento del terreno o línea de introspección (Zhang, 2016).

4.8. Tomografía de resistividad eléctrica tridimensional

Consistente con el método eléctrico común, hace que el subsuelo esté lleno de electricidad y observe la distribución del campo eléctrico subsuperficial, Permite determinar la distribución de la resistividad eléctrica en los volúmenes del subsuelo investigado (Apuani et al., 2015), obtiene información en dirección horizontal y vertical, y utilizando la tecnología de procesamiento de imágenes de volumen (Zhang, 2016).

4.9. Prospección eléctrica

Este término en particular hacer referencia a la zonificación del terreno ya que se relaciona con el área de estudio, siendo identificada es donde se procede a realizar la toma de resistividades experimentales del suelo, se le conoce como zona de prospección (Arias, 2011), Los métodos de prospección eléctrica en corriente continua son de gran fundamento en el entendimiento de la teoría general del campo eléctrico estacionario, el cual se basa en la detección los efectos superficiales que produce la inyección de una corriente eléctrica por el subsuelo, para posteriormente medir y determinar la composición del área de investigación

4.10. Valores RMS

Es un método de optimización, basado en reducir las diferencias entre los valores de resistividad aparente medidos y calculados, la respuesta del modelo actualizado en cada iteración. En general, la mejor aproximación se obtiene al escoger un modelo cuyo error RMS sea bajo (Huaqui & Angel, 2019).

4.11. Ventajas

En la geotecnia es de suma importancia la compactación del suelo este método no lo logra hasta el momento, de igual manera para no proporciona información en cambios de alturas (de Bari et al., 2011).

Se presenta en suelos muy conductivos la mayoría compuestos por arcilla y limos saturados, donde el método se limita por parte de los equipos ya que tendrían que aplicar corrientes muy elevadas al terreno para tener datos satisfactorios

Las ventajas que presenta este método son las siguientes:

- Debido al proceso de adquisición de los datos está totalmente automatizado, se logra realizar un gran número de medidas, a manera que se pueden obtener secciones 2-D de buena resolución en profundidad.
- Hallar zonas susceptibles que presentan focos de filtración, así como caracterizar geoméricamente el problema.
- Abordar de forma eficaz problemas en terrenos con difícil acceso a la zona de estudio.
- Ubicar con gran eficiencia las discontinuidades, dado que nos marca lugar y profundidad a la que se encuentra la falla.
- Podemos controlar la profundidad máxima de estudio.
- Es un método no destructivo.
- El procesado de los datos se puede realizar en el propio campo, mediante la ayuda de un portátil y en un tiempo corto, el actuar es casi a tiempo real.

5. ESTADO DEL ARTE

La caracterización del subsuelo ha sido parte fundamental para el crecimiento de la información, investigación y creación de nuevas metodologías para lograr tener una aproximación de los estratos de un suelo, a manera de siempre mejorar la eficiencia de los estudios, empleando las ramas de la física, matemáticas, geología entre otras. Se plantea el primer avance de las prospecciones geofísicas, a causa del descubrimiento en que los materiales producían débiles corrientes eléctricas, por parte de Robert Were Fox en 1829 (Jiménez, 2015; Mundo, n.d.), sugirió esto para el uso en la prospección de yacimientos.

Se produjo un gran aporte para los sistemas de prospección, hasta implementar una fuente artificial de inyección, consistía en mapear la resistividad eléctrica en la superficie del suelo de manera que expresa la distribución del voltaje observado en la corteza, desarrollado por Conrad Schlumberger 1912 (Hulin, G., Maneuvrier, C., Tabbagh, A., & Vincent, J. 2018) el estudio de la cuenca silúrica de Calvados en Francia.

Consecuente a esto se plantean métodos para obtener información mediante modelaciones permitidas por la inyección de corriente eléctrica al suelo, posteriormente la medición de las diferencias de potenciales creadas, el efecto de esto fue posible por la creación del dispositivo tetraelectrodico , que identificamos actualmente ,gracias a Fran Wenner y Conrad Schlumberger en 1925 (Jiménez, 2015), tal cual abrió campos de estudio en todas las áreas aplicadas a la comprensión de agentes que componen el subsuelo, dio lugar a la implementación de la tomografía eléctrica como método de prospección geofísica (Guilminot et al., 2012), la definen como una excavación por naturaleza no destructiva y por extensión de grandes áreas investigadas por parte de la arqueología. En cuanto a esto no se podría dejar de lado la parte fundamental de los suelos, fortalecer su equilibrio debido a la explotación a la que están

sometidos continuamente por diferentes actuares mineros, (Andrés López Hidalgo, n.d.)

Logrando afianzarse como una herramienta para mitigar eventos de gran impacto ambiental a los que están expuestos y mejorar las técnicas de perforación que son de minucioso cuidado ya que son foco de contaminación geoquímica e inestabilidad geotécnica (Faz et al., 2006) por parte del actuar de las industrias, en los últimos años se han implementado para el estudio de casos en los que el medio ambiente se ve radicalmente afectado, (Helene et al., 2020; Uchebulam & Ayolabi, 2014), proponiendo la seguridad ambiental y operativa para rellenos sanitarios, con monitoreo y modelación de suelos, aguas subterráneas y contención de sub productos de degradación, para los periodos de 2016 a 2018 en base de la variabilidad de la resistividad eléctrica.

En la ingeniería civil los métodos de prospección geofísica se han adaptado de manera favorable, llegando al punto de generar literaturas de aplicaciones en las diferentes ramas que se divide la ingeniería. Tomando en forma de estudio los diferentes parámetros que intervienen en el estudio ingenieril mediante la medida y análisis de las variaciones resistivas de interés.

5.1. Ingeniería hidráulica

Ocupándose de la proyección y ejecución de obras relacionadas al manejo del recurso hídrico, conducción, potabilización, energía, entre otras, Planteado esto, el método de tomografía eléctrica se emplea para la supervisión de estructuras como lo expresa el documento de *“Aplicación de la tomografía de resistividad eléctrica 3D para diagnosticar fugas en la presa de relleno de roca de la Tierra”* resaltando la importancia que debe tomar este método en el futuro, destacando la gran cantidad de datos que se proporcionan, resultados válidos y la explicación de estos se remota a ser sencilla e intuitiva (Zhang et al., 2016). La hidrología y la geología juegan

parte fundamental en todos los procesos de estudios y diseños hidráulicos y demás disciplinas, siendo las ciencias que estudian el origen y la formación de las aguas subterráneas, reservas, la interacción con los suelos y rocas, la tomografía se plantea en beneficio de la obtención de los parámetros solicitados en cada proyecto, de manera que esta se puede adaptar con otros métodos que mejoren su calidad de análisis en las investigaciones, presentando valores que logran caracterizar sistemas de acuíferos de acuerdo a su composición y cantidad de recurso disponible (Amaya et al., 2016; Rangel et al., 2018), es de suma importancia la ubicación y circulación de las aguas en estos sistemas, para la localización de perforaciones de alto flujo ,en pro de continuar un conjunto de sistemas de irrigación que permita el transporte y generar un abastecimiento de agua potable (Akokponhoué et al., 2019; Sk et al., 2018).

5.2. Ingeniería estructural

Esta rama de la ingeniería se centra en el estudio y diseños de elementos que componen las estructuras, cargas aplicadas y la interacción de eventuales naturales como los sismos, vientos, nieves etc, en las estructuras, a modo de garantizar la funcionabilidad, seguridad, resistencia estructural.

La importancia de la determinación de la resistencia del concreto (Sabbag & Uyanik, 2018), el conocimiento del desgaste de estructuras con el pasar del tiempo por su actuar con agentes erosivos , de allí proviene el estudio de métodos de reconocimiento y monitoreo del estado de degradación para mamposterías y cimientos (Abu Zeid et al., 2010; Smyl et al., 2017). La tomografía eléctrica aplicada a Estimación indirecta del volumen mortero inyectado en muros para refuerzo en grietas.

La principal causa del deterioro de las estructuras se da por la corrosión del refuerzo aplicado (acero), la tomografía proporciona una propuesta en la relación de riesgo probable de corrosión y resistividad eléctrica del concretos, esto variando por el contenido de cemento, propiedades físicas y dosificación del concreto por ende tener y un conocimiento completo de estas propiedades en campo (Balestra et al., 2019).

5.3. Ingeniería de pavimentos

La prospección geofísica en la determinación de las resistividades de los materiales que subyacen las carreteras, pretendiendo cubrir los requerimientos específicos de la caracterización de los estratos de suelo, la relación y aplicación va estrictamente ligada a los parámetros geotécnicos y geológicos que están presentes en el actuar de suelo-pavimento (Llerena, 2019), brindando soluciones en el mantenimiento, prevención y mejoramiento de las capas asfálticas mediante el estudio resistivo del suelo en la caracterización y ubicación de fallas. socavamientos presencia de aguas que generan alteración en la estructura (Arevalo, 2017), de acuerdo a lo anterior el monitoreo de estructuras subterráneas (Bellmunt et al., 2012) y la presencia de fallas en edificaciones aledañas posterior a la excavación y realización de las obras llevado a cabo esto para demarcar el área afectada para evitar un mayor deterioro del sitio (Butchibabu et al., 2019) indican claramente la presencia de zonas débiles y posibles ubicaciones de sumideros.

5.4. Ingeniería geotécnica

La mecánica de suelos, comprende el estudio, mejoramiento de las características del suelo primordialmente en la capacidad de sostener cargas (Code s.a.s., 2015), estimando la resistencia entre las partículas de la corteza terrestre, la variabilidad de los suelos es propia, debido a que en su formación intervienen varios procesos geológicos, la investigación geotécnica nace de las necesidades de prevenir o estudiar hechos producidos naturalmente o inducidamente, permitiendo la inestabilidad de los taludes (de Bari et al., 2011; Huaqui & Angel, 2019; Jiménez, 2015; Naudet et al., 2008; Ramírez-Hoyos et al., 2016), generándose movimiento o desplazamiento de tierras debajo de la sección de pendiente.

Teniendo en cuenta eventos como estos la vida de las personas, presentan una amenaza constante por ende, es muy importante estudiar la estabilidad de la pendiente en el diseño y construcción de la ingeniería (Zhang, 2016) enjuiciando la estabilidad de la pendiente de la roca a una estimación aproximada de la cantidad de excavación de roca inestable, esta parte de la experiencia tomada en campo y expresa en las literaturas del método, van de la mano en un contexto de profundidad del suelo, aunque los arreglos de electrodos disponibles no suelen pasar de los 200m de profundidad (Molina & Rinaldi, 2004), en relación a los métodos convencionales o clásicos del estudios de suelos, evita alteraciones al terreno permitiendo reducir el número de sondeos mecánicos. Como se menciona anteriormente para tener mayor claridad y suplir las limitaciones del método, la geofísica en sus diversas técnicas emplea metodologías que aumenten el nivel de calidad en los resultados (Arias, 2011; Javier Olona Allue, 2014).

Por otra parte la geoelectrica se ha volcado a manera de ser útil en informes pequeños de geotécnica, para ello las firmas geofísicas se han desarrollado equipos específicos para estos estudios, relacionando la cantidad de corriente transmitida al suelo, permitiendo sus principales

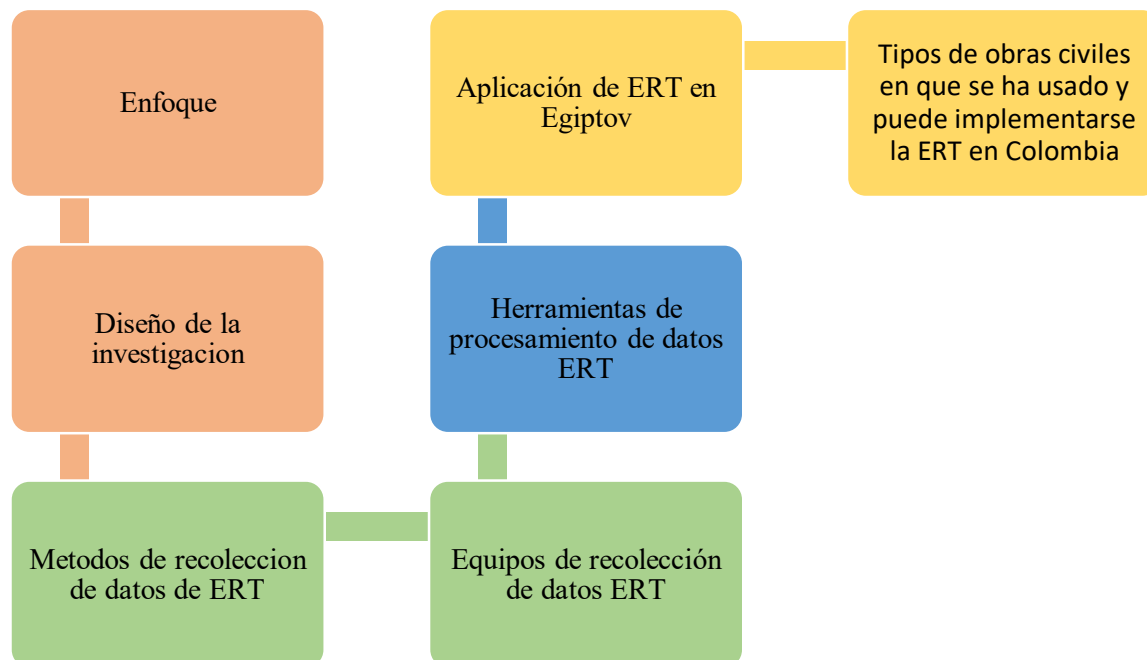
investigaciones en la detección socavamientos, cavidades bajo cimentaciones (Bordehore, n.d.), demás que se plantean para evaluar la calidad y degradación de los grupos estructurales constituidos en estructuras antiguas , proporcionando la distribución geométrica o espacial y el dimensionamiento de la cimentación sin afectaciones a las estructuras (Abu-Zeid et al., 2006; Tsokas et al., 2011).

En la evaluación de la estratigrafía subsuperficial del terreno se han evidenciado sectores en los que se es difícil establecer un reconocimiento del comportamiento y caracterización del suelo, por esto, en disciplinas de la ingeniería civil las fuentes de riesgo se centran en estructuras no detectadas desde la superficie, con esto la interacción de la interpretación geofísica geotécnica y geología llevan a considerar fallas normales sub superficiales que son parte crítica en la estabilidad de edificaciones (Mohamed et al., 2012) se han llevado estudios consiguientes a este permitiendo en zonas específicas crear un caracterización total de las composiciones de un sector de suelo, dando prospecciones acertadas geotécnicamente a la falla o asentamientos de estructuras como es de resaltar el caso del Cairo en Egipto empelando la tomografía de resistividad eléctrica y técnicas de refracción sísmica superficial (Araffa et al., 2014; Liang et al., 2019).

6. METODOLOGÍA

El presente estado del conocimiento se planteara mediante cuatro fases para el cumplimiento de los objetivos establecidos

Tabla 1 Fases de la metodología de estudio



6.1. FASE 1

6.1.1. Enfoque

El presente documento se pretende plantear bajo un enfoque cualitativo, puesto que este se adapta a las características y necesidades de indagación, permitiendo la recolección y recopilación de las literaturas del método de tomografía de resistividad eléctrica ERT,

posteriormente un análisis de las fuentes adquiridas para establecer patrones o comportamientos que se adoptan a lo largo del método

Se pretende tomar la tendencia de uso de este método para ampliar las perspectiva de uso en Colombia (car, 2017; Estefany & Álvarez, 2014; Liang et al., 2019; Ramírez-Hoyos et al., 2016) a manera de mejorar la tendencia de estudios en los suelos colombianos en beneficio de las ramas de la ingeniería civil.

6.1.2. Diseño de la investigación

Dado que el objetivo se plantea en evidenciar la aplicación del método de tomografía de resistividad eléctrica ERT en la ingeniería civil, se recurrió a un diseño no experimental de acuerdo a que se considera que el abordaje del tema cuenta con un gran sustento teórico expuesto mediante la práctica, para establecer a detalle la forma en la que se ha venido implementando.

De acuerdo con José Cantos Figueredo (1987) la geofísica aplicada “Es el arte de aplicar las ciencia físicas al estudio de la parte superficial del suelo” (pág. 23) del mismo modo este autor también señala una parte fundamental “La aplicación de los métodos geofísicos de prospección a la búsqueda de todos los recursos minerales útiles al hombre” (pág. 23)(Cantos, 1987), a partir de esto se plantea y se estructuran métodos eléctricos, haciendo hincapié en método de la tomografía de resistividad eléctrica con su primer aplicación en la cuenca silúrica de calvados Francia mediante Conrad Schlumberger (1912)” implementación de una fuente artificial de inyección “. Al pasar de los años se establecieron dispositivos acordes a esta metodología geofísica que aportan diferentes relaciones en cuanto a la ubicación de electrodos de corriente y

potencial, a manera que al entrar en contacto con el suelo presentan variaciones en su resolución de resistividades y crear nuevos enfoques en sus aplicaciones del método en las ramas de la ingeniería civil.

6.1.2.1. Literaturas Aplicación de ERT en las ramas de la ingeniería civil.

Se plantea la presentación de algunas fuentes bibliográficas consideradas relevantes, permitiendo brindar una descripción del uso del método ERT con respecto al objeto y área de estudio, exponiendo las configuraciones electrodiicas que creyeron pertinentes para la obtención de resultados aceptables en la prospección.

❖ Aplicación a fines Geotécnicos

INTEGRATED GEOPHYSICAL AND GEOMORPHOLOGICAL APPROACH TO INVESTIGATE THE SNOWMELT-TRIGGERED LANDSLIDE OF BOSCO PICCOLO VILLAGE (BASILICATA, SOUTHERN ITALY)

Enfoque geofísico y geomorfológico integrado para investigar el deslizamiento de tierra provocado por el deshielo de la aldea de bosco piccolo (basilicata, sur de italia)

Autores del estudio: v. naudet, m. lazzari, a. perrone, *, a. loperte, s. piscitelli, v. lapenna. Revisado y publicado por la revista “engineering geology”, disponible” desde el 5 de marzo de 2008.

- La tomografía de resistividad eléctrica en ámbitos geotécnicos es conveniente en algunos sectores de difícil acceso, permitiendo investigar los deslizamientos de tierra, esto aplicado en la aldea de Bosco Piccolo (Basilicata, sur de Italia), la obtención de datos a través de tres perfiles de tomografía distribuidos de la siguiente manera; dos perfiles transversales al deslizamiento con longitud de 310m haciendo uso de 32 electrodos en una separación de 10m entre estos, por otra parte, un perfil a lo largo del deslizamiento

con longitud de 600m, cada uno de ellos con la conexión al equipo de georesistivímetro Syscal R2. En esta exploración se emplearon las configuraciones de Wenner y dipolo-dipolo con el software RES2DINV estableciendo 5 iteraciones para los perfiles de 310m con errores RMS inferiores a 18.7 y dos iteraciones para el perfil de 600m con errores de RMS inferiores a 17.9, esto permitió hacer comparaciones entre las dos configuraciones presentando errores similares que se atribuyen al complejo litológico y las condiciones del terreno, a objeto de representar las características geométricas del deslizamiento de tierra y estimar el grosor del material movilizado(Naudet et al., 2008).

ELECTRICAL RESISTIVITY IMAGING FOR THE CHARACTERIZATION OF THE MONTAGUTO LANDSLIDE (SOUTHERN ITALY)

Imágenes de resistividad eléctrica para la caracterización del deslizamiento de tierra Montaguto (sur de Italia)

Autores: Jessica Bellanovaa, Giuseppe Calamita, Alessandro Giocoli, Raffaele Luongo, Maria Macchiato, Ángela Perrone, Sebastian Uhlemann, Sabatino Piscitelli.

Revisado y publicado por la revista “engineering geology”, disponible” desde el 17 de julio de 2018.

- Cabe recalcar que debido a su precisión, bajo costo, y a que no es invasivo se planteó en Italia en el 2011 a causa de estudio de uno de los deslizamientos más grandes de Europa, por ende el gobierno se puso en marcha con el análisis de la zona para así determinar discontinuidades horizontales como verticales además de contribuir a información litológica más precisa del cuerpo del deslizamiento y del entorno geológico. Se aplicaron las configuraciones dipolo-dipolo, Wenner determinado una profundidad mayor con esta última además de una disminución de ruido, se utilizó el software RES2DINV, hasta llegar a concluir que no se encontraron discontinuidades y se determinó que los deslizamientos

son probables a una falla existente además de obtener las litologías hasta una profundidad de 30 metros (Bellanova et al., 2018).

- Aplicación a fines Hidráulicos

CONTRIBUTION OF ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY AND BORING TECHNIQUE IN THE REALIZATION OF TEN (10) LARGE BOREHOLES IN A CRYSTALLINE BASEMENT ROCKS IN THE CENTRE-WEST OF BENIN

Contribución de la tomografía de resistividad eléctrica y la técnica de perforación en la realización de diez (10) perforaciones grandes en rocas de sótanos cristalinos en el centro-oeste de benin”

Autores del estudio: Nesny yanonvoh akokponhoué , Nicaise Yalo , Bertrand Houngnigbo Akokponhoué , Rita Houngue , George Agbahoungba.

Revisado y publicado por la revista “geoscience and enviroment protection”, disponible” desde el 24 de septiembre de 2019

- La amplia aplicación de ERT en la identificación de acuíferos conlleva a estar presente en la hidráulica a manera de permitir visualizar la localización de fuentes de alto flujo, esto aplicado para el abastecimiento de agua potable para Benín en 2021, se realizó la exploración bajo las características de precisión de las discontinuidades geológicas y localización de las áreas de alto interés hidrogeológico, para esto se implementaron 10 perfiles de tomografía de longitud de 240m y una separación de electrodos de 5m, en conexión al equipo Syscal R2 con Swicth 48 de la compañía Iris Instruments, su proceso se llevó a cabo mediante la configuración dipolo-dipolo y su inversión de datos por el software Prosys II, presentando grosores de alteración, profundidad del horizonte fisurado para el abastecimiento del caudal requerido (Akokponhoué et al., 2019), en unión con técnicas de perforación.

2D-ERT MONITORING OF SOIL MOISTURE SEASONAL BEHAVIOUR IN A RIVER LEVEE: A CASE STUDY

Monitoreo 2d-ert del comportamiento estacional de la humedad del suelo en un dique de río: un estudio de caso

Autores: Clara Jodry, Sérgio Palma Lopes, Yannick Fargier, Martin Sanchez, Philippe Côte. Revisado y publicado por la revista “revista de geofísica aplicada”, disponible” desde el 22 de mayo de 2019.

- Por otra parte se implementa en el caso de la ciudad de Bouguenais en Francia, para determinar la estabilidad de un dique además de su capacidad de infiltración de agua, se realizaron dos líneas de investigación compuestas por 48 electrodos espaciados a dos metros con el fin de hacer un aproximación a la composición del subsuelo sin necesidad de usar métodos invasivos, los cuales pueden alterar el nivel freático o incluso perjudicar la estructura, por eso se decantan por la tomografía eléctrica usando el arreglo Wenner-Schlumberger considerando los datos obtenidos como de buena calidad, procesados en el utilizando el software comercial RES2DINV y obteniendo una mejor comprensión del comportamiento estacional de la humedad del suelo en el tramo Estudiado del dique (Jodry et al., 2019).

IDENTIFICATION OF UNDERGROUND WATER-BEARING CAVES IN NOISY URBAN ENVIRONMENTS (WUHAN, CHINA) USING 3D ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY TECHNIQUES

Identificación de cuevas subterráneas que contienen agua en entornos urbanos ruidosos (wuhan, china) utilizando técnicas de tomografía de resistividad eléctrica en 3d

Autores: Ziyang Fu, Zhengyong Ren, Xirui Hua, Yuan Shi, Huang Chen, Chaojian Chen, Yuanao Li, Jingtian Tang. Revisado y publicado por la revista “journal of applied geophysics”, disponible” desde el 31 de enero de 2020.

- Recientemente se ha aplicado para la detección de acuíferos subterráneos aprovechables para la extracción de agua y para revisar la recarga de acuíferos para así conservarlos, esto se llevó a cabo en la ciudad de Wuhan en China abarcando 29 líneas de tomografía usando un promedio de 92 electrodos por línea, alcanzando hasta 30 metros de profundidad haciendo uso del arreglo Wenner para minimizar ruido obteniendo así un modelo 3D usando el software BERT2, obteniendo con este cinco discontinuidades que coinciden con posibles cuevas para depósitos de agua lo cual es un resultado positivo para el estudio (Fu et al., 2020).
- Aplicación a fines Estructurales

Indirect estimation of injected mortar volume in historical walls using the electrical resistivity tomography

Estimación indirecta del volumen de mortero inyectado en muros históricos utilizando la tomografía de resistividad eléctrica

Autores: Nasser Abu Zeida ,Marcobal Ducci ,Francesco Bartocci Robertoregni, Giovanni Santarato.

Revisado y publicado por la revista “journal of cultural heritage”, disponible” desde el 13 de noviembre de 2009

- La tomografía de resistividad eléctrica tiene aplicabilidad en la búsqueda de grietas de los sistemas estructurales como se plantea en la iglesia medieval situada en el pueblo de Montepetriolo, en el barrio de la ciudad de Perugia (Italia), para monitorear el estado de degradación de muros, este estudio se estableció en menor escala con ERT 3D, haciendo uso de puntillas de 6cm como electrodos, con separación de 20cm entre estas, para la configuración Wenner y dipolo-dipolo se generó una maya de 16 *11 electrodos para prospectar un área de agrietamiento de $6m^2$ posteriormente el dipolo-dipolo se

estableció a una profundidad de 10 niveles, mientras que el Wenner a profundidad de 6 niveles, con conexión al equipo Syscal R1 (Iris Instruments, Francia) , con uso del software RES3DINV para la inversión de los datos tomados en función de mapear las grietas en los muros y presentar una estimación indirecta de un volumen de mortero (Abu Zeid et al., 2010).

NON-INVASIVE CHARACTERISATION OF ANCIENT FOUNDATIONS IN VENICE USING THE ELECTRICAL RESISTIVITY IMAGING TECHNIQUE

Caracterización no invasiva de cimientos antiguos en Venecia. Utilizando la técnica de imagen de resistividad eléctrica

Autores: Nasser Abu-zeid, Daniele Botteon, Giovanni Cocco, Giovanni Santarato.
Revisado y publicado por la revista “ndt & e international”, disponible” desde el 08 de agosto de 2005.

- En Venecia Italia le dan un enfoque más detallado implementándolo en la restauración de cimientos de un edificio para generar el modelo 3D usando 24 electrodos espaciados en promedio de 20 centímetros y apoyándose en el algoritmo desarrollado por Morelli y LaBrecque. Lo llevaron a cabo con dos métodos una medición sin alteraciones y otra con inyección de mortero mostrando una disminución en la resistividad en las zonas consolidadas mientras que en las zonas no consolidadas la resistividad aumenta, demostrando así que la inyección de concreto en cierta parte rellana las fisuras y fracturas de la cimentación (Abu-Zeid et al., 2006).

- Aplicación en pavimentos

MOISTURE MONITORING IN CLAY EMBANKMENTS USING ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY

Monitor monitoreo de humedad en terraplenes de arcilla usando tomografía de resistividad eléctrica

autores:d.a.gunn;j.e.chambers;s.uhlemann;p.b.wilkinson;p.i.meldrum;t.a.dijkstra;e.haslam;m.kirkham;j.wragg;s.holyoake;p.n.hughes;r.hen-jones;s.glendinning.revisado y publicado por la revista “construction and building materials”, disponible” desde el 01 de septiembre de 2015

- El uso en pavimentos va de la mano con la parte geotécnica permitiendo optar por el monitoreo de estructuras en las vías correspondiente a esto se empleó el método de tomografía de resistividad eléctrica, para el monitoreo de la humedad de terraplenes, esta aplicación se llevó a cabo en el terraplén BIONICS, cerca de Newcastle (Inglaterra) construido en 2005 y el terraplén VICTORIANO al sur de Nottingham (Inglaterra) construido en 1897, cada uno de estos constituidos con materiales diferentes, las variaciones de las resistividades fueron medidas mensualmente con la implementación de sistemas de monitoreo, en los cuales principalmente intervienen líneas de 64 y 32 electrodos transversales a los terraplenes con separación de 0.5m y 1.5m generalmente, llevado a cabo mediante la recolección de datos por la configuración dipolo-dipolo y el uso del software Res2DInv o Res3DInv a objeto del monitoreo de cambios en contenido de humedad temporal y espacial (Gunn et al., 2014).

6.2. FASE 2.

6.2.1. Métodos de recolección de datos en ERT

Generalidades del método

La técnica de la resistividad de los materiales es usada para establecerse como un indicador de tipo de material que está presente en el subsuelo basado en las condiciones geológicas, litológicas, geomorfológicas entre otras.

El comportamiento y adquisición de las resistividades de los materiales en los estudios de campo varían de acuerdo a qué tipo de material está presente, su porosidad, grado de saturación y factores de ruido posteriormente a mencionar, de acuerdo a esto se presentan las siguientes apreciaciones para las resistividades.

- para materiales de baja porosidad, la resistividad de los materiales tiende a ser alta ($> 1000 \Omega\text{m}$)
- Para materiales que presentan alta porosidad, la resistividad de los materiales tiende a ser baja
- Se estima que la resistividad de los materiales se incrementa a medida que el nivel de saturación de suelo disminuye según la ley de Archie (Goldmann, 2018).

La tomografía de resistividad eléctrica y los demás métodos geofísicos basados en las resistividades de los materiales son sensibles a factores de ruido presentes en el suelo, diferenciándose por sus fuentes de ruido, siendo preciso tener previo conocimiento a ello.

- Fuentes de ruido ambientales. Esta es proporcionada por la naturaleza mediante la caída de rayos y corrientes propias de la tierra

- Fuentes culturales. Hacen referencia al sitio de estudio provocada por estructuras cercanas como la protección de tuberías, cercas, estaciones de radio entre otras.

6.2.1.1. Aplicación de los dispositivos de ERT

Abordando la parte general del método se plantea a base de la colocación de electrodos en el terreno y la separación entre electrodos de corriente y potencial, desarrollando diferentes geometrías de electrodos fijas, para diversas aplicaciones y resoluciones, como corresponde en este documento se trabaja hacia la parte ingenieril teniendo la configuraciones fijas de Wenner, Slumberger, dipolo- dipolo

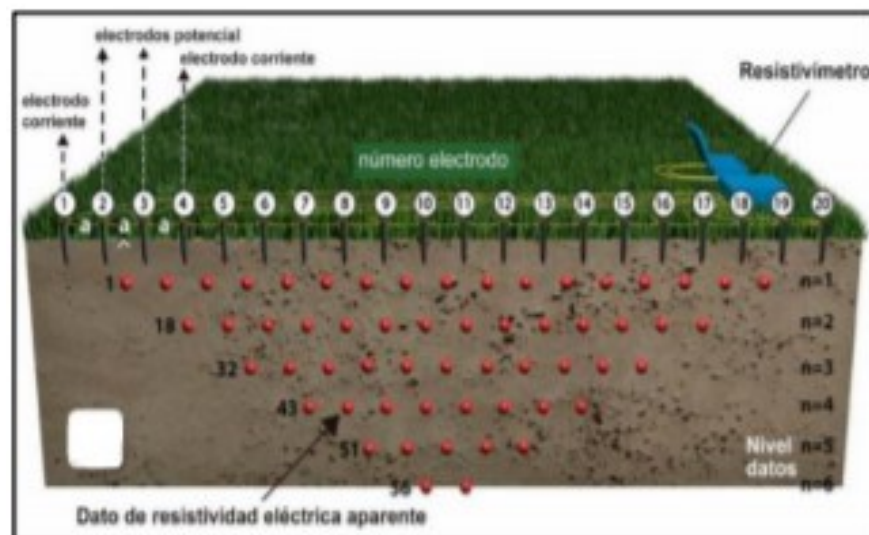


Figura 4 línea de tomografía eléctrica fuente. (Huillca, 2018)

- Configuración Wenner

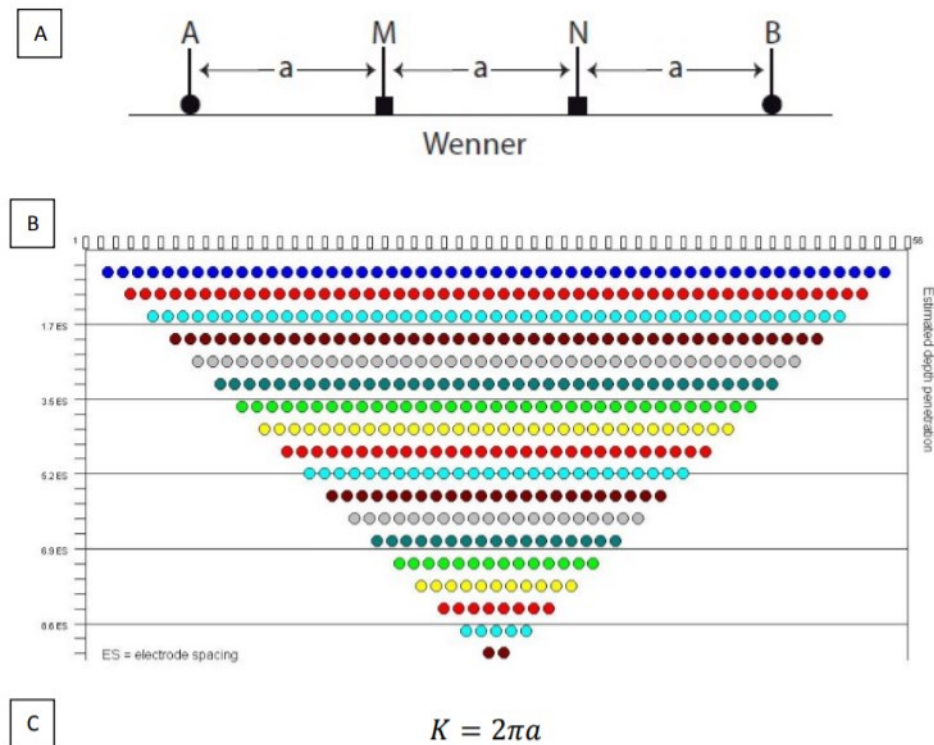


Figura 5 Posición espacial de los valores de resistividad aparente Wenner fuente:

(Jiménez, 2015)

- Este dispositivo es menos sensible a cambios horizontales (Huaqui & Angel, 2019) está especialmente indicado para detectar estructuras horizontales (Lara, n.d.) y pobre en la detección de cuerpos verticales delgados (Jiménez, 2015)
- La relación señal –ruido es más alta que en otros dispositivos (ASTMD6431-99, 2010) por lo tanto hace que tenga una señal más fuerte en zonas de alto ruido
- Profundidad de investigación moderada, más baja entre las tres configuraciones (Huaqui & Angel, 2019)

- Configuración Schlumberger

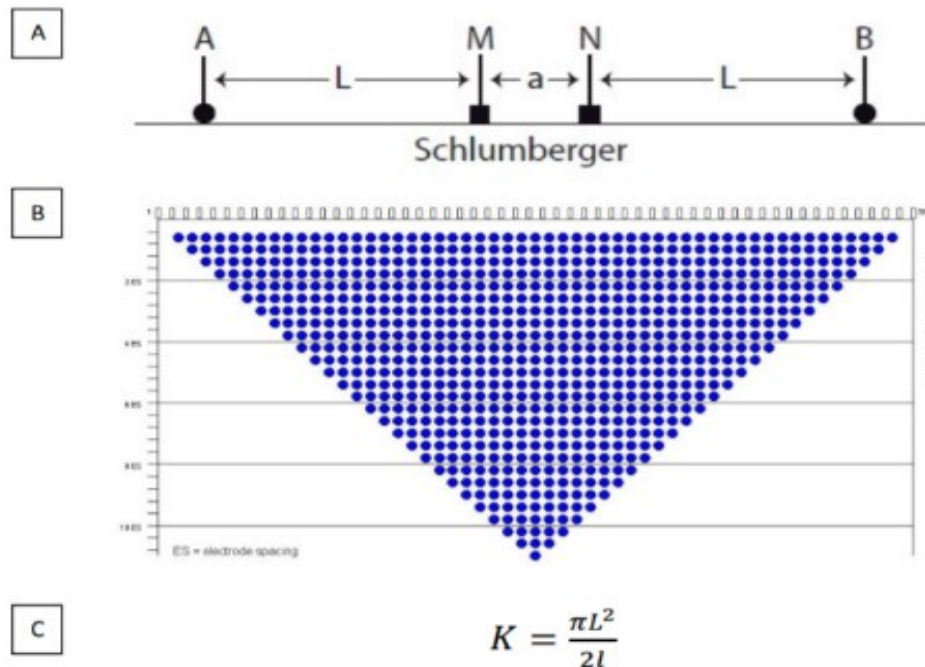


Figura 6 Posición espacial de los valores de resistividad aparente schlumberger fuente: (Jiménez, 2015)

- Este dispositivo en campo es de beneficio debido a que es un poco más rápido en la obtención de los datos (ASTM D6431-18 , 2018) debido a que solo los electrodos actuales deben moverse entre las lecturas.
- Es buen dispositivo para identificar contactos horizontales del subsuelo (Jiménez, 2015)
- Este es menos influenciado en los problemas de contacto o de las condiciones geológicas del sitio (ASTM D6431-18, 2018) debido a que proporciona un medio para reconocer los efectos de las variaciones laterales y corregirlos parcialmente.

- Configuración dipolo- dipolo

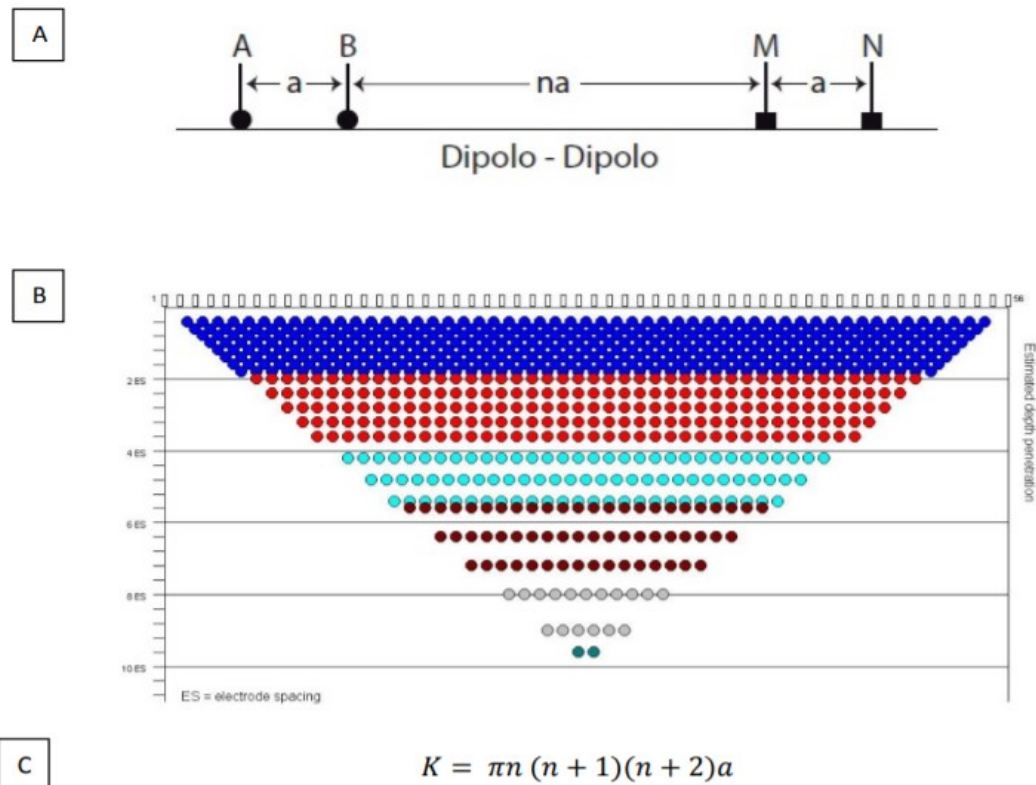


Figura 7 Posición espacial de los valores de resistividad aparente dipolo-dipolo fuente: (Jiménez, 2015)

- Este dispositivo es eficiente en cuanto a la capacidad de detectar discontinuidades verticales (Naudet et al., 2008) presentando buenas resoluciones en la vertical como la horizontal, de modo que es más sensible para detectar cambios laterales (Jiménez, 2015)
- La profundidad respecto a los otros dispositivos es mayor
- Se presenta una intensidad de señal más baja (Jiménez, 2015) y capta mucho ruido ambiental.

Tabla 2 Comparación de la profundidad y resolución de los principales métodos de ERT aplicados a obras civiles

Metodo	Profundidad	Resolucion	Obras civiles aplicables
Dipolo-dipolo	Rango de profundidad media Alta: aproximadamente 1/5 del máximo de la longitud de la ristra.	La resolución más baja: permite el máximo posible detección de anomalías situadas en subsuelo profundo .	Se aplica en la búsqueda de roca madre a mayores profundidades, para monitoreo de humedad en terraplenes.
Wenner	Rango de baja profundidad: aproximadamente (1/6 -1/5)del máximo de la longitud de la ristra.	Alta resolución: permite el máximo posible detección de anomalías situadas en subsuelo somero	Se aplica en la búsqueda de caracterizar la litología del suelo a mayor detalle, para la estabilización de taludes
schlumberger	Rango de media profundidad: aproximadamente 1/6 del máximo de la longitud de la ristra	Resolución media: suficiente para una investigación detallada de estructuras poco profundas.	Matriz de uso general que cubre una amplia gama de tareas, se aplica mas para SEV.

6.2.1.2. Profundidad

En la prospección eléctrica la profundidad de exploración al subsuelo está ligada netamente a la geometría implementada en el arreglo, a manera de que se generan ciertas relaciones con la distancia (Alvarez & Aceves, 2003).

- Distancia-profundidad, es decir que a más distancia de los electrodos, mayor será la profundidad, siendo directamente proporcional.
- Distancia-resolución, es decir que a mayor espaciado entre los electrodos, la resolución disminuye, siendo inversamente proporcional (Huaqui & Angel, 2019)
- Generalmente la profundidad está dada por 1/5 de la distancia total del arreglo

6.2.2. Equipos para la recolección de datos de ERT

Las mediciones de resistividades eléctricas en campo deben ser tomadas mediante equipos aptos para la adquisición de datos, para ello existen grandes variedades de sistemas de resistividad disponibles de diferentes entidades fabricantes, cada uno optando por algunas modificaciones que aporten en su mejor desempeño, traslado a campo, y la validez de valores de resistividad.



Generalidades

Se evalúan mediante las unidades de potencia con que el sistema fue diseñado, variando en baja potencia para estudios poco profundos, de alta potencia capaces de una prospección profunda del subsuelo.

Por lo general constan de la fuente de inyección de corriente al suelo (TRANSMISOR), el instrumento de medición de las variaciones de potencial (RECEPTOR), eventualmente pueden ser constituidos en una sola unidad portátil o de manera separada, por otra parte electrodos y cable aislado (RISTRA) para la conexión al equipo (ASTM D6431-18, 2018)

La Universidad Antonio Nariño dispone del GeoAmo 303 desarrollado por la compañía SUBSUELO3D, formado por una consola GeoAmo 303 ,swichams001 (tabla 4), sistema para 32 electrodos, ristras en conexión a los 32 electrodos, cables conectores a las dos consolas , baterías y un software de adquisición, si bien cabe resaltar este instrumento abre campo de investigación y aplicación en las diferentes ramas de la ingeniería civil y ambiental, como en la “Caracterización hidrogeológica del riachuelo de la quebrada Fucha” por parte de los autores Angie Viviana Vega Cárdenas y Jason S. Quiroga Belalcázar, del programa de ingeniería civil y en la “acumulación de agua subterránea en acuíferos de la provincia hidrogeológica cordillera oriental mediante uso de sensores remotos, sondeo eléctrico vertical y software newlocclim.” por parte de los autores Giancarlo Coronado Perna y Jordy Anderson Neita Arévalo, del programa de ingeniería ambiental.


Tabla 3 sistema de 32 electrodos en Colombia fuente (subsuelo3d, 2019)

GeoAmp3	swichams001
 <p data-bbox="354 1818 613 1854">(subsuelo3d, 2019b)</p>	 <p data-bbox="946 1818 1190 1854">(subsuelo3d, 2019)</p>

TRANSMISOR	RECEPTOR
<div data-bbox="505 338 1044 604" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="597 640 954 674" style="text-align: center;">RISTRA Y ELECTRODOS</p>	

Tabla 4 aplicación de tomógrafo de resistividades eléctricas en Colombia fuente. Autores

<div data-bbox="293 1110 672 1394" data-label="Image"> </div>	<p>“Tomografía de resistividad eléctrica aplicada al análisis de fallas activas. caso de estudio: falla abriaquí, frontino, Antioquia”</p> <ul style="list-style-type: none"> • método Dipolo-Dipolo <p>Conjunto Earth Resistivity/IP meter Mini Sting (Advanced Geoscience, Inc.) y un Sistema Automático de Conmutación de Electrodo (SACE)(Ramírez-Hoyos et al., 2016)</p>
	<p>“estudio de geoelectrica para prospección y exploración de agua subterránea en la cabecera municipal de jerusalén –</p>

 <p style="text-align: center;">GeoAmp 202</p>	<p>departamento de Cundinamarca”(car, 2017)</p>
---	---

Zaragoza en España, se empleó el Syscal R1 Switch 72 de IRIS Instruments (Orleans, Francia), electrodos construidos por varillas de acero inoxidable de 30 cm de longitud. Estos ofrecen excelente contacto galvánico con el suelo, de manera que reduce la resistencia eléctrica en el contacto electrodo-suelo. Emplearon dos tipos de secuencias en las medidas, se hizo uso de la configuración Dipolo-dipolo y la configuración Wenner-Schlumberger (Ward, 1988; Frangos, 1990, Samouëlian et al., 2005)). Estas se establecieron para los mismos perfiles y las mismas condiciones en función de verificar los datos obtenidos y su resolución, también empleado en la “Aplicación de la Tomografía Eléctrica al Estudio de los Depósitos de Estériles Mineros "El Lirio" y "Brunita" (Murcia)”(Faz et al., 2006)

Scintrex, receptor IPR-10A y transmisor IPC-7 2.5 KW y el segundo, con el sistema STING and SWIFT R1-IP (Advanced Geosciences Inc.) en Mexico para la “implementación del código zondres2d para la modelación directa e inversa de datos de tomografía de resistividad eléctrica 2d”(Erika Pamela Díaz Anaya, 2010).

IRIS Instrument, ELREC PRO, de 10 canales, posee 20 ventanas de cargabilidad y un display LCD gráfico, Transmisor de corriente, TIP 5KW aplicado en la “evaluación geofísica – geotécnica de la zona proyectada del puente manyute, para el mejoramiento de la carretera vizcachani – provincia de caylloma – región Arequipa” (Arevalo, 2017).

Geo-resistivímetro Syscal R2, un sistema de electrodos múltiples con 32 electrodos conectados, aplicado en Italia para los deslizamientos de tierra en “Bosco Piccolo (Basilicata, sur de Italia) mediante matriz dipolo –dipolo (Naudet et al., 2008) ” y “tierra de Picerno (región de Basilicata, sur de Italia) mediante matriz dipolo –dipolo (de Bari et al., 2011)” . Cada equipo varía la cantidad de electrodos empleados para la prospección del subsuelo obteniendo mayores y menores cantidades de datos según sea el caso.

6.3. FASE 3

6.3.1. Herramientas de procesamiento de datos ERT

La adquisición de datos en campo llevados a cabo mediante equipos de prospección anteriormente mencionados, debido a esto se ha tenido que crear software para el procesamiento de resistividades , en 1996 el artículo propuesto por Loke y Baker fue la base para la programación del RES2DINV (Díaz, 2010) de inversión de resistividades, partiendo de este se fueron implementando nuevos sistemas operativos con principios similares a este buscando la eficiencia en el modelado de imágenes de resistividad.

6.3.1.1. Software de inversión de datos

RES2DINV. Basado en el uso del método de los mínimos cuadrados, para la determinación de un modelo de resistividad bidimensional, diseñado para invertir grandes cantidades de datos alrededor de 200 a 21000 fuentes de datos, recolectados con un sistema de 25 16000 electrodos (Geotomo Software, 2010), apto para el uso de matrices Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo entre otras. Siendo este el más implementado para la aplicación del método de tomografía de

resistividad eléctrica por su implementación en Windows (Naudet et al., 2008; de Bari et al., 2011; Faz et al., 2006; Ramírez-Hoyos et al., 2016; Bortolozzo et al., 2019; Helene et al., 2020). EarthImager 2D (Advanced Geosciences Inc.). Software de modelado de inversión bidimensional para imágenes asequibles de resistividad, Diseñado para convertir una complicada inversión de datos de resistividad en un simple proceso de dos pasos (Advanced Geosciences, 2009), es decir, leer un archivo de datos y ejecutar la inversión asequible para Windows (Jiménez, 2015).

ZondRes2D y ZondRes3D. Fue diseñado para la interpretación bidimensional de datos de tomografías, hace uso de formatos de datos simple y claro que permite combinar fácilmente varios sistemas de observación (zond, n.d.), compatible con los formatos más populares AGI, ABEM, instrumentos MAE, ARES, Zonge, Res2dInv, Syscal, Sens2dInv(Díaz, 2010).

SensInv2D. Diseñado para calcular la respuesta del modelo e invertir, es decir las resistividades aparentes de la prospección, puede crear uno o varios modelos de la inversión de datos y modelar la respuesta para varios elementos de la caracterización (harbourdom, n.d.)

Eletom (Geo&soft international). Instrumento capaz de efectuar la inversión completa bidimensional de perfiles eléctricos, mediante el uso del método de elementos finitos, consta de un algoritmo basado en minimizar el error cuadrático entre los datos reduciendo el efecto de ruido a manera iterativa , uso para todos los dispositivos de resistividad eléctrica (Soft di ing Scioldo, n.d.), entre otros software que se encuentran disponibles a nivel mundial.

7. CASO DE ESTUDIO EN EGIPTO

Revista de Ciencias de la Tierra de África

Marzo de 2020, 103734

“Integration of 2D geoelectrical resistivity imaging and boreholes as rapid tools for geotechnical characterization of construction sites: A case study of New Akhmim city, Sohag, Egypt”(Abudeif et al., 2020).

“Integración de imágenes de resistividad geoelectrónica 2D y perforaciones como herramientas rápidas para la caracterización geotécnica de sitios de construcción: un estudio de caso de la nueva ciudad de Akhmim, Sohag, Egipto” (Abudeif et al., 2020).

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo para suplir la problemática del crecimiento poblacional en Egipto, a manera de realizar estudios de suelos para la construcción de una nueva ciudad, para ello se utilizó el método de tomografía de resistividad eléctrica ERT bidimensional y tridimensional, con el fin de delinear las características de ingeniería del subsuelo. Dicha exploración se realizó mediante 8 perfiles o líneas de prospección ubicadas a lo largo del área de estudio, a tratar de cubrir la mayor cantidad de información del suelo con la variación de resistividades.

Se empleó la configuración Wenner, aporta la mejor resolución, genera menor cantidad de errores de ruido y se obtiene una profundidad adecuada al estudio planteado.

Los datos fueron tomados mediante un sistema de Resistividad Automática ARES (fabricado por GF Instruments Company), siendo un sistema de alta tecnología, adaptado para facilidad de uso

y traslado en campo, integrando el transmisor y receptor en una sola consola, apto para la investigación del subsuelo por medio del método de tomografía de resistividad eléctrica en 2D y 3D, mediante configuraciones Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo, entre otros. Es compatible con los software de interpretación más usados, este equipo no requiere de un ordenador ya que los datos de tomografías los guarda en la memoria de 16 Mbit, hasta 100 ficheros, 70 000 puntos.

Lugar de investigación

Parte oriental del Valle del Nilo de la provincia de Sohag en Egipto

Latitudes $26^{\circ} 28' 55''$ y $26^{\circ} 30' 20''$ N

Longitudes $31^{\circ} 50' 05''$ y $31^{\circ} 51' 35''$ E

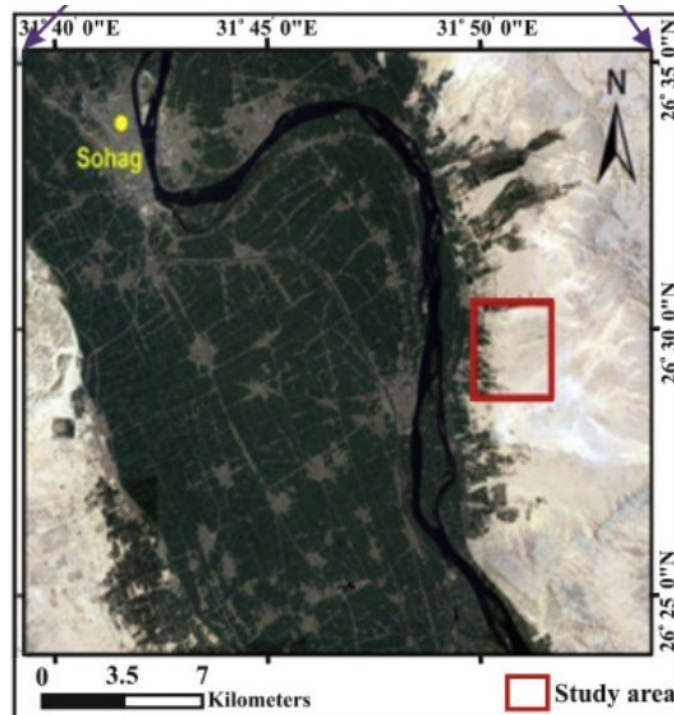


Figura 8 área de estudio Sohag, Egipto fuente (Abudeif et al., 2020)

7.1.1.1. Caracterización geológica de Sohag, Egipto

Tabla 5 geología de Sohag, Egipto fuente (Abudeif et al., 2020)

Era	CENOZOICA
<ul style="list-style-type: none"> Esta era esta comprendida en un lapso de tiempo de hace 66 millones de años, hasta la actualidad. 	
Periodo	PALOGENEO
<ul style="list-style-type: none"> Este periodo esta comprendido en un lapso de tiempo de hace 66 millones de años, hasta los 23 millones de años 	
Rocas	Se formo una secuencia sedimentaria a través del tiempo
<ul style="list-style-type: none"> Se encuentra delimitada por un platino de piedra caliza, la precensia de gravas y arenas mixtas(sedimentos de wadis), intercalaciones de arcillas. 	

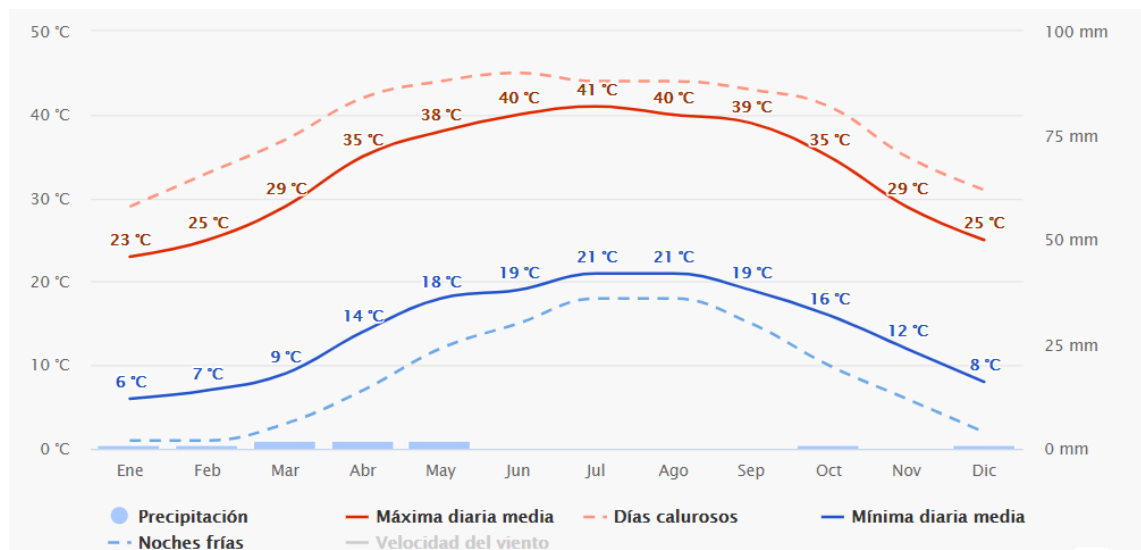


Figura 9 temperaturas medias y precipitaciones de Sohag, Egipto fuente. (Meteoblue, 2020)

El procesamiento de datos se realizó mediante el software RES2DINV, haciendo uso de cinco iteraciones para dar un porcentaje de error (RMS) inferior al 3.7%.

7.1.1.2. Líneas de prospección

Línea 1

Cantidad de electrodos= 35

Espaciado= 5m

Longitud de la línea=165m

Cantidad de datos obtenidos=152

Profundidad= $\frac{165}{5} = 33m$

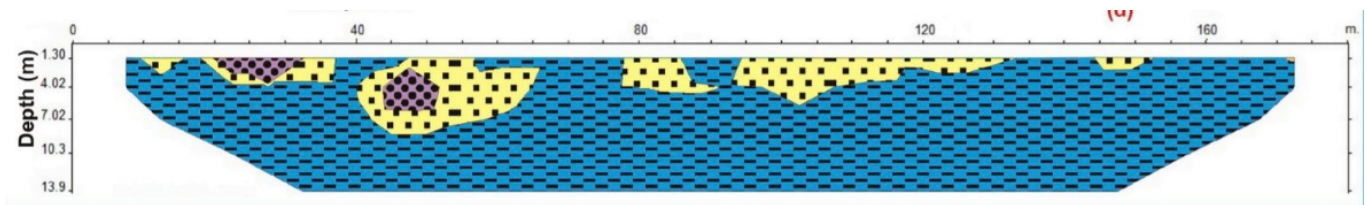


Figura 10 perfil 1 tomografía de resistividad eléctrica2D fuente. (Abudeif et al., 2020)

Línea 2

Cantidad de electrodos= 42

Espaciado= 5m

Longitud de la línea=200m

Cantidad de datos obtenidos=184

Profundidad= $\frac{200}{5} = 40m$

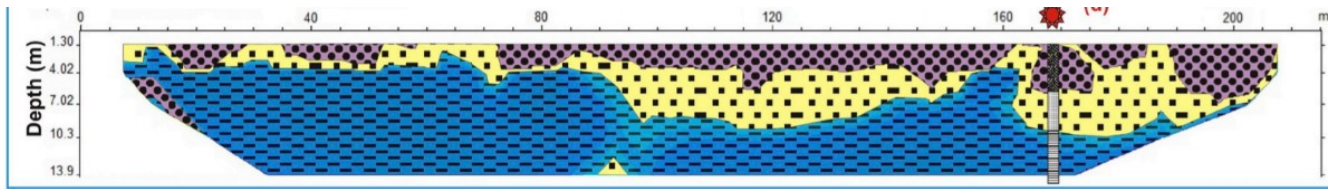


Figura 11 perfil 2 tomografía de resistividad eléctrica2D fuente. (Abudeif et al., 2020)

Línea 3

Cantidad de electrodos= 22

Espaciado= 5m

Longitud de la línea=100

Cantidad de datos obtenidos=84

Profundidad= $\frac{100}{5} = 20m$

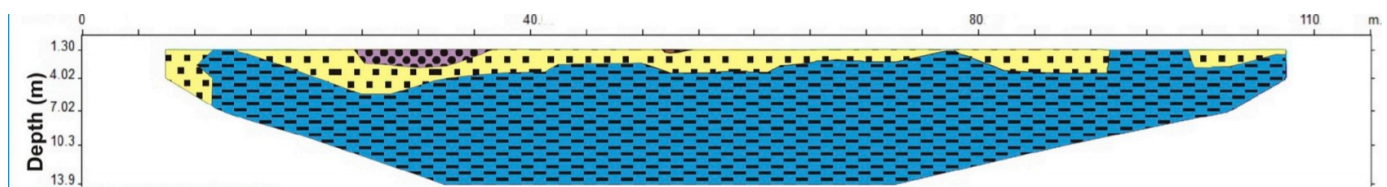


Figura 12 perfil 3 tomografía de resistividad eléctrica2D fuente. (Abudeif et al., 2020)

Línea 4

Cantidad de electrodos= 42

Espaciado= 5m

Longitud de la línea=200m

Cantidad de datos obtenidos=184

Profundidad= $\frac{200}{5} = 40m$

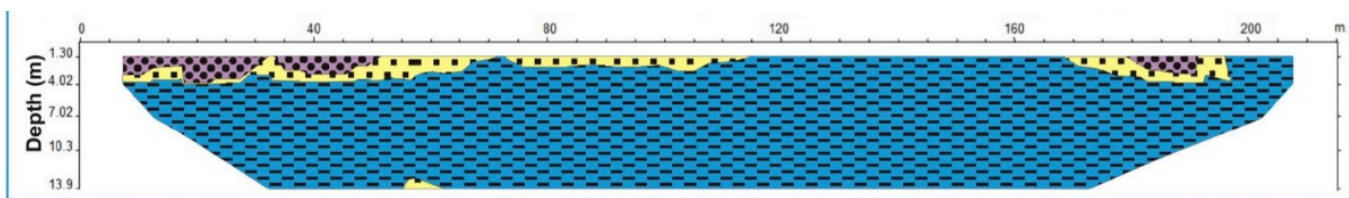


Figura 13 perfil 4 tomografía de resistividad eléctrica2D fuente. (Abudeif et al., 2020)

Línea 5

Cantidad de electrodos= 32

Espaciado= 5m

Longitud de la línea=150m

Cantidad de datos obtenidos=136

Profundidad= $\frac{150}{5} = 30m$

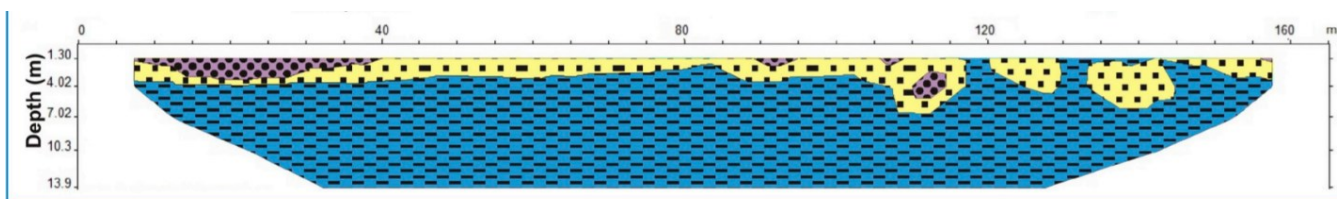


Figura 14 perfil 5 tomografía de resistividad eléctrica2D fuente. (Abudeif et al., 2020)

Línea 6

Cantidad de electrodos= 32

Espaciado= 5m

Longitud de la línea=150m

Cantidad de datos obtenidos=136

Profundidad= $\frac{150}{5} = 30m$

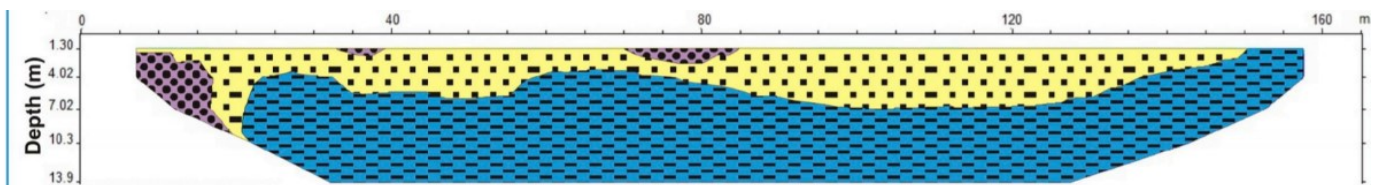


Figura 15 perfil 6 tomografía de resistividad eléctrica2D fuente. (Abudeif et al., 2020)

Línea 7

Cantidad de electrodos= 32

Espaciado= 5m

Longitud de la línea=150m

Cantidad de datos obtenidos=136

Profundidad= $\frac{150}{5} = 30m$

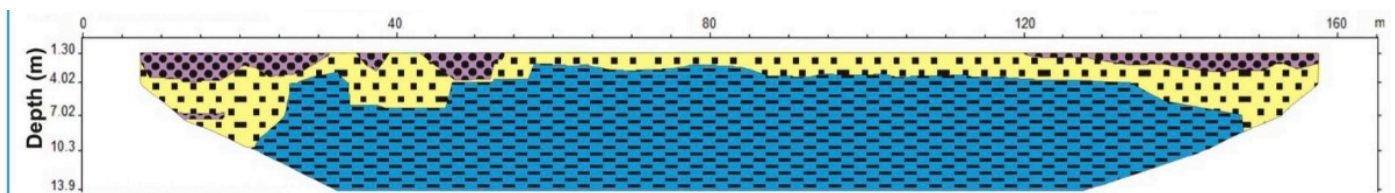


Figura 16 perfil 7 tomografía de resistividad eléctrica2D fuente. (Abudeif et al., 2020)

Línea 8

Cantidad de electrodos= 102

Espaciado= 5m

Longitud de la línea=500m

Cantidad de datos obtenidos=484

Profundidad= $\frac{500}{5} = 100m$

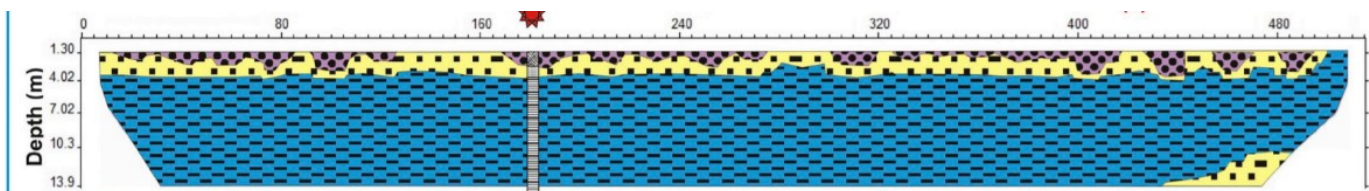





Figura 17 perfil 8 tomografía de resistividad eléctrica2D fuente. (Abudeif et al., 2020)

7.1.2. Resultados

Se realizaron las tomografías obteniendo valores resistivos en rangos de profundidad comprendidos entre 1.3 y 13.9 m, se reflejaron la existencia de 3 estratos de suelo:

- | | | Resistividad (oh/m) |
|----|--|---------------------|
| 1. |  Rocas y gravas no consolidadas | 200-1000 |
| 2. |  Arenas sueltas | 50-200 |
| 3. |  Esquisto compactado | 1-50 |
- Perfil 1. Se reflejaron la existencia de los tres estratos, presentando anomalías a lo largo del perfil, situando la presencia de rocas y gravas no consolidadas en menor proporción con espesores de capa variados entre 2.5 y 3.5m, la presencia de arenas sueltas con

espesores de capa entre 1.5 y 8.5m y la conformación de esquisto, este cubre la mayoría suelos en el perfil.

- Perfil 2. Comprendido por la presencia de los tres estratos, varió respecto al anterior en el aumento de las capas de rocas y gravas no consolidadas y arenas sueltas, del mismo modo se incrementan los espesores de estratos, se presenta en mayor proporción el esquisto compactado.
- Perfil 3. Se evidencia una mínima formación de rocas y gravas no consolidadas, en cuanto al estrato de arena suelta, se mantiene en pequeña proporción a lo largo del perfil, a manera que la presencia del estrato de esquisto compactado se da en casi todo el perfil de tomografía.
- Perfil 4. Se presenta la formación de rocas y gravas no consolidadas, en espesores aproximados a 2.7m al inicio y final del perfil, correspondiente al estrato de arena suelta, se mantiene variando su espesor en las distancias de 7.5 a 114m y el estrato compuesto por esquisto se mantiene en mayor proporción.
- Perfil 5. Se evidencia la formación de rocas y gravas no consolidadas, en el inicio del perfil con espesor de capa aproximado a 2.5m, el estrato de arena suelta se mantiene en casi toda la longitud del perfil con espesor máximo de 5.7m aproximadamente, de igual manera el estrato de esquisto comprendido en mayor proporción.
- Perfil 6. Se reflejan 3 pequeñas formaciones de rocas y gravas no consolidadas, se da un aumento considerable del estrato de arena suelta, respecto a perfiles anteriores, con espesor máximo aproximado de 5.7m, de igual manera el estrato de esquisto se encuentra en mayor proporción.

- Perfil 7. Se evidencia la existencia del estrato de roca y grava no consolidada en el inicio y final del perfil, el estrato de arena suelta se mantiene a lo largo de este, y se presentan aumentos de espesores en el inicio y final de la línea de tomografía, mayor proporción del estrato de esquisto.
- Perfil 8. El que cuenta con mayor longitud de estudio, se refleja es estrato de roca y grava no consolidada en forma de media circunferencia a lo largo de la línea, en relación al estrato de arena suelta, es el perfil en el cual se muestra más constante la profundidad máxima de la capa, de igual manera el estrato de esquisto en mayor proporción.

7.1.3. Análisis

En relación a las formaciones geológicas del sitio estudiado, el método obtuvo resultados satisfactorios en la caracterización del suelo, mostrando su heterogeneidad en cuanto a los 3 estratos visualizado por los valores de resistividad que varió entre: resistividades altas de 200 a 980.2 ohm*m para rocas y gravas no consolidadas, resistividades medias 50 y 200 ohm*m para arenas sueltas y resistividades bajas entre 1.23 y 50 ohm*m para esquistos compactados.

Los perfiles de resistividad demostraron similitudes entre ellos, unos más que otros, estas semejanzas se detectan de los valores obtenidos de resistividad y por su visualización de anomalías en el perfil, el estrato que más cambia en espesores de capa fue; La formación de rocas y gravas no consolidadas, presentadas en la menor profundidad los perfiles 1, 3 y 5 se reflejaban como pequeños parches de estrato, en los perfiles 4, 6 y 7 las mayores anomalías se presentaron principalmente en el inicio y final de los perfiles, las arenas sueltas generalmente

mantuvieron una presencia horizontal en ocasiones más constata, como lo visualizado en perfil 8 que el estrato se mantiene en valores de profundidad muy cercanos a 4m en toda la longitud del perfil, de igual manera todas las líneas de tomografía variaron los espesores de la capa a lo largo de los perfiles, cabe mencionar que la similitud más repetitiva en la tomografía, se dio por el mayor espesor del estrato de esquisto compactado en cada perfil, si bien este estrato a los 13.9m que se estableció como profundidad máxima, no se evidenciaron cambios a otra posible formación del subsuelo.

Afianzaron los resultados de tomografía comparando con las perforaciones establecidas para el estudio, relacionando los 3 estratos de suelo evidenciados con las medidas de resistividad anteriormente mencionadas, con base en la caracterización del subsuelo no se evidenciaron grandes fallas, que puedan interferir de manera grave en la ejecución de obras civiles propuestas por los estudios geotécnicos.

7.1.4. Conclusiones

El método de tomografía de resistividad eléctrica puede llegar a tener buen comportamiento para establecer de manera aproximada los materiales que componen el subsuelo, dando al especialista en geotecnia bases para la toma de decisiones y establecer las adaptaciones que sean pertinentes, el caso puntal de Sohag, Egipto, se presenta una estimación de los componentes del subsuelo llegando a concluir que los estratos de suelo presente pueden llegar a comportarse como roca madre.

8. APLICACIÓN EN COLOMBIA DE LA “ERT”

La adaptación del método de tomografía de resistividad eléctrica ERT en Colombia se puede ampliar de manera consecutiva en las ramas de la ingeniería civil, debido a las implementaciones expuestas en literaturas de aplicación del método en otros países, a manera que ofrecen resultados óptimos en sus exploraciones del suelo enmarcando los beneficios y limitaciones del mismo, con esto tener fuentes de referencia para mejorar la eficiencia en la implementación del método. En los últimos años empresas y universidades colombianas han tomado iniciativa de promover el uso de equipos geo-eléctricos, para la obtención de información del subsuelo para fines de investigación ingenieril.

8.1. Propuesta de implementación de ERT para Colombia

Se estableció una zona del departamento del Huila, Colombia para establecer un proyecto de caracterización del suelo, semejante al practicado en Sohag, Egipto, partiendo de la búsqueda de condiciones geológicas y ambientales similares, posterior a esto mencionar las aplicaciones que brindan los estudios geotécnicos en las ejecuciones de obras civiles.

De acuerdo a lo anterior y partiendo de la ruptura continental entre 120 y 150 millones de años y su posterior separación a lo que conocemos hoy como el continente americano y africano, se generan semejanzas cercanas en cuanto al comportamiento del suelo, clima y presencia de rocas en el lecho geológico.

El municipio de Villa Vieja, Huila, Colombia, plancha 303 del servicio geológico Colombiano (SGC) en el estado de la cartografía geológica (Fúquen & Osorno, 2002). Con el fin de facilitar

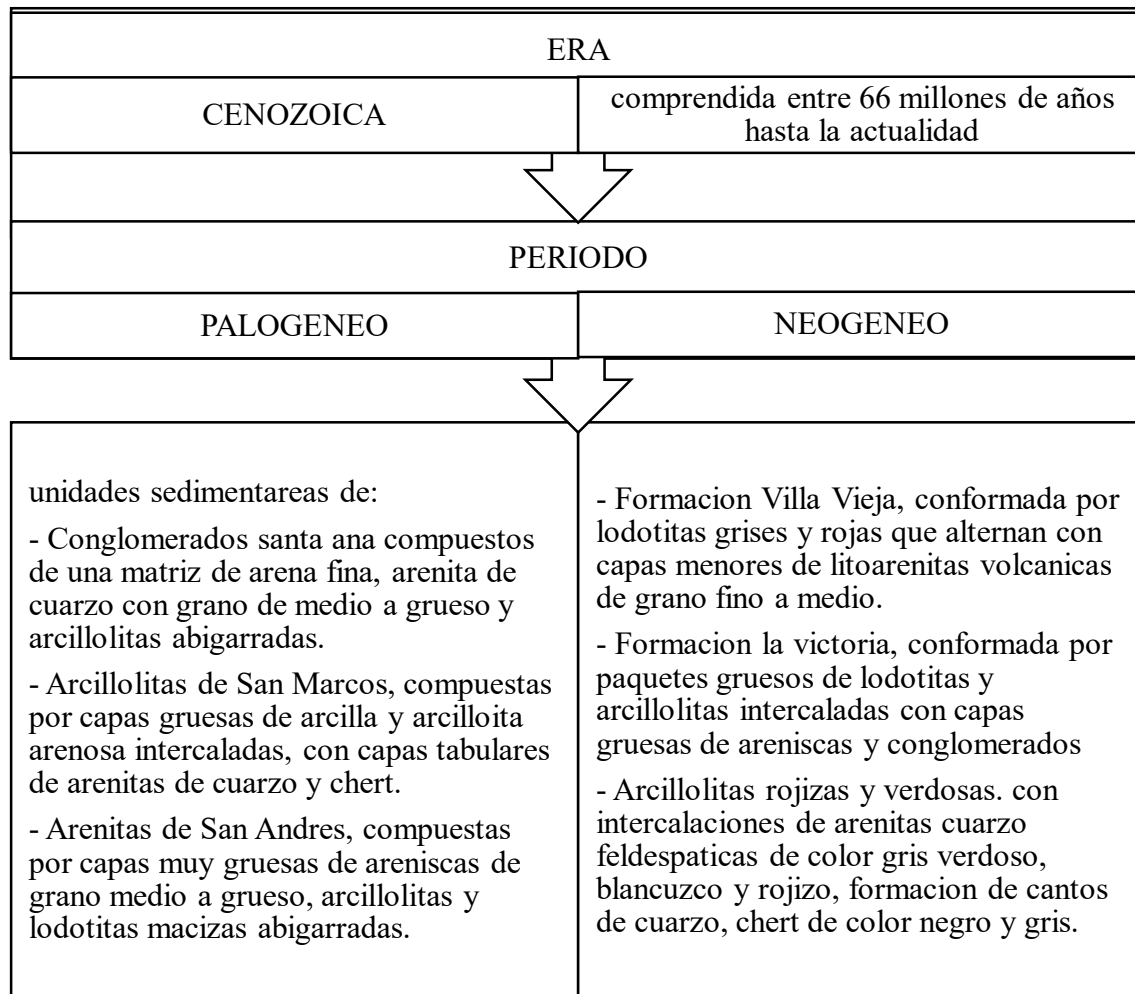
las labores de planeamiento territorial con beneficio en la toma de decisiones en labores de campo de investigación del subsuelo.

Se ubica desde la ribera del río Magdalena, en el extremo occidental de la plancha, hasta las estribaciones occidentales de la Cordillera Oriental, la zona abarcada geológicamente presenta las variaciones del clima entre los 12°C en las partes de mayor pendiente de la cordillera oriental, de 24°C y mayores temperaturas en la zona del desierto de la Tatacoa y zonas colindantes a este. Con base en lo anterior en el sitio se observan variaciones de rocas desde la era paleozoica hasta la era cenozoica como se menciona en la (Tabla 7) y (Tabla 8) evidenciando las sucesiones de rocas y unidades litológicas más antiguas.

Tabla 6 geología de Huila, Colombia fuente. (Acosta et al., 2002)

ERA	PALEOZOICA
<ul style="list-style-type: none"> • Esta era esta comprendida en un lapso de tiempo de hace 541 millones de años, hasta los 252 millones de años. 	
ROCAS	Se formo una secuencia sedimentaria a través del tiempo
<ul style="list-style-type: none"> • Con presencia de cuarzoarenitas micaceas de grano fino a medio, en capas gruesas a medias, con estratificacion plana paralela intercaladas con capas delgadas de limolitas y arcillas de color gris oscuro. • Arcillolitas y lodolitas fisiles micaceas de color negro y pardo, en la base, formacion de capas tabulares de areniscas feldespaticas y lodolitas grises y verde oliva. • Arenitas de san isidro con alternancia de arenizcas de cuarzo y lodotitas amarillas a cafes, con un conjunto conglomerarico en la base. 	

Tabla 7 geología de Huila, Colombia fuente. (Acosta et al., 2002)



8.1.1. Consideraciones pertinentes al método ERT

De acuerdo a las similitudes encontradas de las formaciones geológicas de Colombia y Sohag, Egipto, Se emplearía la configuración Wenner debido a la variedad de suelos que componen Colombia (siac, 2020), adaptación de ruido propuesta por posibles formaciones desconocidas del subsuelo, y mejor resolución de resistividades, cabe resaltar que es la configuración más

usada junto con dipolo-dipolo en investigaciones internacionales en los últimos años , por ende comprende buen sustento bibliográfico de apoyo investigativo en las diferentes áreas de la ingeniería civil.

Los perfiles de tomografía eléctrica se toman acorde a la topografía de estudio a manera de adquirir la mayor cantidad de datos del área de exploración, variando la cantidad de líneas acorde a posibles grietas visibles por el investigador en la superficie terrestre, de igual manera en la capacidad del equipo para las longitudes máximas posibles y respectivamente las profundidades esperadas, esto variando de la cantidad de electrodos disponibles en el sistema.

Posterior al trabajo en campo, en el procesamiento de los datos y modelado de las resistividades del subsuelo se hace uso de los software especializados para el modelamiento de la información, en forma de anomalías del subsuelo y expresadas mediante imágenes bidimensionales y tridimensionales, para el análisis de las resistividades aparentes del suelo se suele hacer uso de la tabla de resistividades de los materiales (anexo 1), como valores globales en (ohms*m) para las diferentes litologías del terreno. Por otra parte hacer uso de la geología del sitio para verificar la veracidad de las litologías adquiridas por el método, dando un aporte comparativo en relación a la información del subsuelo.

8.2. Casos de estudio llevados en Colombia con tomografía de resistividad eléctrica ERT

La empresa subsuelo3D en Colombia, se enfoca en la creación de equipos de geofísica como el GEOAMP202 Y GEOAMP 303, actualmente ha venido trabajando en aplicaciones en la ingeniería civil, con el método de la tomografía de resistividad eléctrica en 2D y 3D, se viene implementando en casos de estudio como:

- En la creación de “imágenes del subsuelo para el diseño de túneles, puentes y viaductos” (Subsuelo3d, 2019), en este se hace uso del geoamp202 para 10 líneas de tomografía eléctrica , además el estudio lo combinan con métodos sísmicos llegando a la conclusión de ser muy valioso en la búsqueda de la roca portante, la investigación se ejecuta para el Consorcio constructor de vías.
- Se lleva a cabo el método para establecer el “ espesor de sedimentos por debajo del suelo marino para el diseño y anclaje de pilotes, costa afuera de Buenaventura (Valle del Cauca)” (Subsuelo3d, 2019) hace uso del geoamp202 para 2 líneas de tomografía eléctrica, concluyeron que el agua salada presenta conductiva muy alta, por ende se necesita un equipo con alta potencia de salida, la investigación se ejecuta para el Consultor en Ingeniería Civil.
- Se plantea para evidenciar la infiltración de agua a la mina de sal, mediante el uso de geoamp303 con dos líneas de tomografía, el estudio lo realiza para la consultoría en minería (Subsuelo3d, 2019)

En Colombia si bien se han venido aumentando los casos de estudio para este método geoelectrico en la ingeniería civil, la Universidad Nacional con Corporación Autónoma Regional de Risaralda realizaron la prospección eléctrica en: “Modelamiento geofísico de un área de la zona de Cerritos, municipio de Pereira”

Para esta exploración hizo uso de la tomografía de resistividad eléctrica, para adquisición de datos, procesamiento, modelamiento e interpretación de las resistividades. Para este se hizo uso de 10 perfiles de tomografía, a lo largo de 210.75 km² de área comprendida en estudio, se llevó a cabo mediante la configuración Wenner, el procesamiento de la información se manejó con 3 iteraciones para generar menores valores RMS, se obtuvieron valores de resistividades

apropiados en la caracterización litológica del subsuelo, este estudio se realizó a base de comparaciones obtenidas con los métodos gravimétricos, magnéticos y sísmicos además de la geología del sitio (Serna et al., 2008). Esta aplicación del método se puede llevar a fines geotécnicos.

Universidad Nacional de Colombia está desarrollando diferentes estudios, como el de la “Tomografía de resistividad eléctrica aplicada al análisis de fallas activas, caso de estudio: falla Abriaquí, Frontino, Antioquia”

En el noroccidente Andino ha sido fuente de investigación aportando nuevos datos sobre la configuración y la dinámica de fallas activas y la sismicidad en la zona para llevar esto a cabo se hace uso de seis pseudosecciones compuestas de siete electrodos, durante las cuales se varía su espaciado para la obtención de datos haciendo uso de la configuración dipolo-dipolo, realizado en dos lugares, siendo uno Sincerín y el Charquito, obteniendo 108 y 153 datos respectivamente. Arrojando como resultados que para el sitio Sincerín se aprecia deformación de los depósitos de vertiente recientes y una expresión en superficie, y en el sector de El Chaquiro no es posible determinar afectaciones superficiales mayores ya que su expresión es apenas perceptible (Ramírez & Hoyos et al., 2016).

8.2.1. Discusión

Los estudios del subsuelo que se realizan con el método de tomografía de resistividad eléctrica en zonas como la relacionada en Egipto y la que se propone en Colombia, se plantean por situaciones similares de las condiciones geológicas como semejanzas de las formaciones rocosas, influenciadas con el transporte de sedimentos, afloramientos de roca y el clima, serían satisfactorias debido a que la caracterización del subsuelo, concuerda con los aspectos

mencionados en la geología, pero de manera más específica al sitio de estudio y como resultado una capa subsuperficial que pueda soportar cargas, estas apreciaciones en el ámbito geotécnico son fundamentales para las aplicaciones que esta rama dispone en la planeación, diseño y construcción de las obras civiles, centrándonos en Colombia no explícitamente en el Huila, si no a nivel Nacional la aplicación de esta metodología de adquisición más continuamente y notoriamente a estudios geotécnicos llevaría a los especialistas a tomar mejores decisiones.

De modo que se podría situar en obras para el desarrollo de infraestructura, como:

- La vía Bogotá –Villavicencio. Con el fin de estudiar el problema de la inestabilidad de la pendiente y generar medidas prevención de los deslizamientos de tierra que impiden la libre funcionamiento de la vía.
- Puertos de Tribugá (Pacífico chocoano) y Tarena (Golfo de Urabá en el Mar Caribe). Pretendiendo el uso para el anclaje de pilotes, e identificación de la salinidad logrando prevenir las futuras socavaciones a la estructura.
- Proyecto Metro de Bogotá. Se establecería para determinar la caracterización, plantear las posibles alternativas de falla del suelo y comparándolos con estudios previos para obtener mayor detalle de los componentes del sub suelo bogotano, teniendo en cuenta las fuentes de ruido que pueden interferir.

La tomografía de resistividad eléctrica en términos generales presenta ventajas en cuanto a la toma de sus datos, llevada a cabo sin alterar el terreno, es decir que es un método no invasivo y ambientalmente sostenible, lográndose adaptar a zonas de difícil acceso, además de obtener buena cantidad de información de manera rápida, es una metodología que reduce los costos de investigación del subsuelo en relación a las técnicas convencionales, ya en la visualización y lectura de las imágenes de tomografía, suelen ser sencillas de analizar. El método no es muy

favorable en sitios de mucho ruido, debido a que es sensible a estos, los cuales generan errores en la información adquirida, el método en campo se pudo ver limitado por la descarga de las baterías del equipo y la lluvia que incide en el grado de saturación del terreno.

9. CONCLUSIONES

Al desarrollar el siguiente documento, quisimos ampliar el campo de visión sobre los aplicativos que ofrece la tomografía de resistividad eléctrica ERT en Colombia, en distintos enfoques que precisan las ramas de la ingeniería civil.

- Se observaron los beneficios que aporta el método investigativo, en la exploración del subsuelo, determinando factores que si bien su previo conocimiento ayudan a mejorar los resultados de la prospección, tales como- geología y litología, mientras que otros factores la debilitan, como- las fuentes de ruido y la conductividad de los materiales. estos últimos inciden en el análisis de anomalías presentes en las imágenes de resistividad tomadas de los perfiles de tomografía.
- Según las literaturas verificadas se reflejaron similitudes en la aplicación de cada configuración, acorde a los objetivos de las tomografías, en la caracterización geotécnica del terreno, hacen uso principalmente de la configuración Wenner debido a la resolución, rapidez y adaptación al ruido, consiguiente a esto se estableció un complemento entre dipolo-dipolo y Wenner en la rama estructural, debido a la aplicación de monitoreo de desgaste de muros y cimentación en edificaciones históricas, en los movimientos de tierras, el monitoreo de la humedad de terraplenes y en investigaciones donde la primicia sea encontrar fallas a mayores profundidades, la empleabilidad de la

configuración dipolo-dipolo es apropiada. Según sea el caso de estudio se usa como complemento o verificación de técnicas convencionales.

- Se evidencio la versatilidad geológica de los suelos presentes en Colombia, permitiendo relacionarla con la zona explorada en Sohag, Egipto debido a la separación continental, a manera que se revelaron similitudes geológicas y ambientales, que se adaptan a la implantación del método de resistividad eléctrica para el departamento del Huila, Colombia, adaptándose a los usos de información geotécnica para poder ser aplicadas en obras que implica el estudio de caracterización de litologías que componen el subsuelo.
- De acuerdo al sustento bibliográfico de las aplicaciones del método en Colombia, se llega al punto de poder implementarlo para el diseño de cimentaciones poco profundas como zapatas o pilotaje, en la identificación de acuíferos para la realización de pozos y el manejo del recurso hídrico, además de ser flexible en determinar el desgaste de muros de cimentación.
- En Colombia la ERT al ser práctica en su toma, procesamiento y análisis, se debería disponer de ella más consecutivamente, en la solución de problemas presentados por la falta de información en la zona de estudio, ya que se viene usando de manera poco eficiente en comparación al amplio beneficio que puede ofrecer en las ramas que competen la ingeniería civil.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Abu-Zeid, N., Botteon, D., Cocco, G., & Santarato, G. (2006). Non-invasive characterisation of ancient foundations in Venice using the electrical resistivity imaging technique. *NDT and E International*, 39(1), 67–75.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.06.007>
- Abu Zeid, N., Balducci, M., Bartocci, F., Regni, R., & Santarato, G. (2010). Indirect estimation of injected mortar volume in historical walls using the electrical resistivity tomography. *Journal of Cultural Heritage*, 11(2), 220–227.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.07.001>
- Abudeif, A. M., Mohammed, M. A., Fat-Helbary, R. E., El-Khashab, H. M., & Masoud, M. M. (2020). Integration of 2D geoelectrical resistivity imaging and boreholes as rapid tools for geotechnical characterization of construction sites: A case study of New Akhmim city, Sohag, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 163(December), 103734. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103734>
- Acosta, J. E., Caro, P. E., Fuquén, J. A., & Osorno, J. F. (2002). Geología de la Plancha 303, Colombia, escala 1:100.000. *Ingeominas, Bogotá*, 3215.
- Advanced Geosciences, I. (AGI). (2009). *EarthImager 2D*. 512, 139.
- Akokponhoué, N. Y., Yalo, N., Akokponhoué, B. H., Houngue, R., & Agbahoungba, G. (2019). Contribution of Electrical Resistivity Tomography and Boring Technique in the Realization of Ten (10) Large Boreholes in a Crystalline Basement Rocks in the Centre-West of Benin. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 07(09), 114–130. <https://doi.org/10.4236/gep.2019.79009>
- Alvarez, A., & Aceves, M. (2003). *GEOFÍSICA APLICADA EN LOS PROYECTOS*

BÁSICOS DE INGENIERÍA CIVIL. 1–100.

Amaya, A. G., Dahlin, T., & Barmen, G. (2016). *Tomografía de resistividad eléctrica y polarización inducida para mapear el subsuelo de los ventiladores aluviales : un estudio de caso en Punata.*

Andrés López Hidalgo, L. (n.d.). *La tomografía eléctrica como herramienta de diagnóstico ambiental subsuperficial en la industria del petróleo y del gas .*

Retrieved April 19, 2020, from

[http://www.ing.unp.edu.ar/ asignaturas/geoaplicada/Publicaciones/TP_04 \(Geoel CC\) TE Diagnóstico Ambiental Ind HC, LópezHidalgo.pdf](http://www.ing.unp.edu.ar/ asignaturas/geoaplicada/Publicaciones/TP_04_(Geoel%20CC)_TE_Diagnóstico_Ambiental_Ind_HC,_LópezHidalgo.pdf)

Apuani, T., Giani, G. P., D'Attoli, M., Fischanger, F., Morelli, G., Ranieri, G., & Santarato, G. (2015). Assessment of the Efficiency of Consolidation Treatment through Injections of Expanding Resins by Geotechnical Tests and 3D Electrical Resistivity Tomography. *Scientific World Journal, 2015*(iii).

<https://doi.org/10.1155/2015/237930>

Araffa, S. A. S., Atya, M. A., Mohamed, A. M. E., Gabala, M., Zaher, M. A., Soliman, M. M., Mesbah, H. S., Massoud, U., & Shaaban, H. M. (2014). Subsurface investigation on Quarter 27 of May 15th city, Cairo, Egypt using electrical resistivity tomography and shallow seismic refraction techniques. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 3*(2), 170–183.

<https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2014.10.004>

Arevalo, J. (2017). *EVALUACIÓN GEOFÍSICA – GEOTÉCNICA DE LA ZONA PROYECTADA DEL PUENTE MANYUTE, PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA VIZCACHANI – PROVINCIA DE CAYLLOMA – REGIÓN*

AREQUIPA. 52.

ASTM D6431-18 Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Site Characterization, (2018). <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/astm/?c=099581>

ASTMD6431-99 Standard Guide for Using the Direct Curren..., (2010).

<https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/astm?c=074733>

Balestra, C. E. T., Nakano, A. Y., Savaris, G., & Medeiros-Junior, R. A. (2019).

Reinforcement corrosion risk of marine concrete structures evaluated through electrical resistivity: Proposal of parameters based on field structures. *Ocean Engineering*, 187, 106167. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106167>

Bellanova, J., Calamita, G., Giocoli, A., Luongo, R., Macchiato, M., Perrone, A.,

Uhlemann, S., & Piscitelli, S. (2018). Electrical resistivity imaging for the characterization of the Montaguto landslide (southern Italy). *Engineering Geology*, 243(July), 272–281. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.014>

Bellmunt, F., Marcuello, A., Ledo, J., Queralt, P., Falgàs, E., Benjumea, B., Velasco, V., & Vázquez-Suñé, E. (2012). Time-lapse cross-hole electrical resistivity tomography monitoring effects of an urban tunnel. *Journal of Applied Geophysics*, 87, 60–70.

<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.09.003>

Bordehore, L. J. (n.d.). *Geofísica somera aplicada a informes geotécnicos de pequeña escala: detección de cavidades por tomografía eléctrica*. Retrieved April 21, 2020, from <http://www.demecanica.com/contribuciones/Cavidades.pdf>

Butchibabu, B., Khan, P. K., & Jha, P. C. (2019). Foundation evaluation of underground metro rail station using geophysical and geotechnical investigations. *Engineering*

Geology, 248, 140–154. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.12.001>

Cantos, J. (1987). *Tratado de prospección geofísica aplicada*. 520.

car. (2017). "ESTUDIO DE GEOELÉCTRICA PARA PROSPECCIÓN Y

EXPLORACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CABECERA MUNICIPAL DE.

[http://sie.car.gov.co/bitstream/handle/20.500.11786/33646/Estudio de geoeléctrica.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sie.car.gov.co/bitstream/handle/20.500.11786/33646/Estudio_de_geoeléctrica.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

CODE S.A.S. (2015). *Agregados, geotecnia y suelos | Conereservicios*.

<https://site.conereservicios.com.co/index.php/suelos-y-geotecnia/>

Daniel Eduardo Arias. (2011, February). *exploración geotecnica-relaciones*

goelectricas. <http://www.bdigital.unal.edu.co/5468/1/71790053.2011.pdf>

de Bari, C., Lapenna, V., Perrone, A., Puglisi, C., & Sdao, F. (2011). Digital

photogrammetric analysis and electrical resistivity tomography for investigating the

Picerno landslide (Basilicata region, southern Italy). *Geomorphology*, 133(1–2), 34–

46. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.013>

ERIKA PAMELA DÍAZ ANAYA. (2010). *IMPLEMENTACIÓN DEL CÓDIGO*

ZONDRES2D PARA LA MODELACIÓN DIRECTA E INVERSA DE DATOS DE

TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA 2D.

Estefany, J., & Álvarez, C. (2014). *ESTUDIO DE RESULTADOS ENSAYO DE*

PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT) PARA EL FACTOR DE CORRECCIÓN (C N)

Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN (Ø) DEL SUELO USANDO DIFERENTES TIPOS

DE CORRELACIONES.

https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2572/1/SPT_factor_CN_ángulo_Ø_diferentes_correlaciones.pdf

- Faz, Á., Martínez-Pagán, P., Aracil, E., & Maruri, U. (2006). Aplicación de la Tomografía Eléctrica al Estudio de los Depósitos de Estériles Mineros " El Lirio " y " Brunita " (Murcia). *Los Residuos Minero-Metalúrgicos En El Medio Ambiente, January*, 89.
- Fu, Z., Ren, Z., Hua, X., Shi, Y., Chen, H., Chen, C., Li, Y., & Tang, J. (2020). Identification of underground water-bearing caves in noisy urban environments (Wuhan, China) using 3D electrical resistivity tomography techniques. *Journal of Applied Geophysics*, 174, 103966. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.103966>
- Fúquen, J., & Osorno, J. (2002). Memoria explicativa de la Geología de la Plancha 303, Colombia, Departamentos de Huila, Tolima y Meta. *Ingeominas Bogotá*, 88. <http://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010020281/documento/pdf/0101202811101000.pdf>
- Geotomo Software. (2010). *RES2DINV ver. 3.59*. https://moodle.polymtl.ca/pluginfile.php/419838/mod_resource/content/0/MANUELRES2Dinv.pdf
- Guilminot, É., Lemoine, G., Pele, C., Poisson, L., & Surbled, M. (2012). The conservation of fatty bones: Research of a degreasing treatment for whale skeletons. *ArcheoSciences*, 35(1), 201–212. <https://doi.org/10.4000/archeosciences.3175>
- Gunn, D. A., Chambers, J. E., Uhlemann, S., Wilkinson, P. B., Meldrum, P. I., Dijkstra, T. A., Haslam, E., Kirkham, M., Wragg, J., Holyoake, S., Hughes, P. N., Hen-Jones, R., & Glendinning, S. (2014). *Moisture monitoring in clay embankments using electrical resistivity tomography*. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.007>

harbourdom. (n.d.). *sensinv2d*. Retrieved April 28, 2020, from

<http://www.harbourdom.de/sensiv2d.htm>

Helene, L. P. I., Moreira, C. A., & Bovi, R. C. (2020). Identification of leachate infiltration and its flow pathway in landfill by means of electrical resistivity tomography (ERT).

Environmental Monitoring and Assessment, 192(4), 1–10.

<https://doi.org/10.1007/s10661-020-8206-5>

Huaqui, H., & Angel, M. (2019). *CARACTERIZACIÓN DEL SUELO E IDENTIFICACIÓN DE DISCONTINUIDADES ESTRUCTURALES DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 2D. EL ALTO, PAMPAS DE MAJES.*

Javier Olona Allue. (2014). *Integración de metodologías geofísicas para la caracterización geológico-geotécnica del terreno - Dialnet*. 1–1.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=208124>

Jiménez, E. (2015). *Caracterización mediante tomografía eléctrica del deslizamiento de toleo (Oviedo)*. 89.

Jodry, C., Palma Lopes, S., Fargier, Y., Sanchez, M., & Côte, P. (2019). 2D-ERT monitoring of soil moisture seasonal behaviour in a river levee: A case study.

Journal of Applied Geophysics, 167, 140–151.

<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.05.008>

Jose Wilfredo Huillca Chuctaya. (2018). *CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO EN 2D, DEL ESTUDIO GEOFÍSICO DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA EN LA REPRESA HUILLACAHUA, DISTRITO DE LARCAY, PROVINCIA DE PUQUIO, DEPARTAMENTO DE AYACUCHO.*

<http://bibliotecas.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/7492/GFhuchjw.pdf?sequen>

ce=3&isAllowed=y

Kumar, D., Rajesh, K., Mondal, S., Warsi, T., & Rangarajan, R. (2020). Groundwater exploration in limestone–shale–quartzite terrain through 2D electrical resistivity tomography in Tadipatri, Anantapur district, Andhra Pradesh. *Journal of Earth System Science*, 129(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-1341-0>

Lara, R. Z. (n.d.). *MARCO TEÓRICO. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA*.

Liang, Q., Tian, J., Wang, F., & Zhang, X. (2019). Soft-sediment Deformation Structures and Sand Body Architecture in the Chang 6 Oil Member of the Upper Triassic Yanchang Formation, Southwestern Ordos Basin, China. *Earth Sciences Research Journal*, 23(2), 119–126. <https://doi.org/10.15446/esrj.v23n2.72414>

lic. Gaston Alejandro Goldmann. (2018). *determinación de la distribución de la porosidad de las rocas mediante resistividad eléctrica*.
<http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/802/1/1Goldmann.pdf>

Llerena, R. V. H. (2019). *Tomografía eléctrica para el mantenimiento de la carretera longitudinal tramo II – La Libertad*. 1–45.
<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/10765/IGhullrv.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mohamed, A. M. E., Araffa, S. A. S., & Mahmoud, N. I. (2012). Delineation of Near-Surface Structure in the Southern Part of 15th of May City, Cairo, Egypt Using Geological, Geophysical and Geotechnical Techniques. *Pure and Applied Geophysics*, 169(9), 1641–1654. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0415-y>

Molina, G. A. R., & Rinaldi, V. (2004). *TOMOGRAFÍA GEOELÉCTRICA: DESARROLLO Y POTENCIALES APLICACIONES EN GEOTECNIA*.

<https://doi.org/10.13140/2.1.3553.4089>

Mundo, cuaqueros en el. (n.d.). *Robert Were Fox (El más joven)*. Retrieved April 19, 2020, from <http://www.quakersintheworld.org/quakers-in-action/378/Robert-Were-Fox-The-Younger>

Naudet, V., Lazzari, M., Perrone, A., Loperte, A., Piscitelli, S., & Lapenna, V. (2008). Integrated geophysical and geomorphological approach to investigate the snowmelt-triggered landslide of Bosco Piccolo village (Basilicata, southern Italy). *Engineering Geology*, *98*(3–4), 156–167.

<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.02.008>

Ramírez-Hoyos, L., Posada, G., Noriega, S., & Monsalve, G. (2016). Tomografía de resistividad eléctrica aplicada al análisis de fallas activas. Caso de estudio: Falla abriaquí, frontino, antioquia. *Boletín de Geología*, *38*(1), 151–164.

<https://doi.org/10.18273/revbol.v38n1-2016008>

Rangel, R. C., Porsani, J. L., Bortolozo, C. A., & Hamada, L. R. (2018). Electrical Resistivity Tomography and TDEM Applied to Hydrogeological Study in Taubaté Basin, Brazil. *International Journal of Geosciences*, *09*(02), 119–130. <https://doi.org/10.4236/ijg.2018.92008>

Sabbağ, N., & Uyanık, O. (2018). Determination of the reinforced concrete strength by apparent resistivity depending on the curing conditions. *Journal of Applied Geophysics*, *155*, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.03.007>

Serna, L. M., Montes, L., & Vargas, C. (2008). Modelamiento geofísico de un área de la zona de cerritos, municipio de Pererira (Risaralda). *Ciencias de La Tierra*.

siac. (2020). *Suelos Colombia - IDEAM*. <http://www.siac.gov.co/sueloscolombia>

- Sk, M., Ramanujam, N., Champoil, V., Biswas, S. K., Rasool, Q. A., & Ojha, C. (2018). Identification of Groundwater in Hard Rock Terrain Using 2D Electrical Resistivity Tomography Imaging Technique: Securing Water Scarcity at the Time of Seasonal Rainfall Failure, South Andaman. *International Journal of Geosciences*, 09(01), 59–70. <https://doi.org/10.4236/ijg.2018.91004>
- Smyl, D., Rashetnia, R., Seppänen, A., & Pour-Ghaz, M. (2017). Can Electrical Resistance Tomography be used for imaging unsaturated moisture flow in cement-based materials with discrete cracks? *Cement and Concrete Research*, 91, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.10.009>
- Soft di ing Scioldo, G. G. (n.d.). *ELETOM-Tomografía eléctrica*. Retrieved April 28, 2020, from <https://www.geoandsoft.com/manuali/espanol/eletom.pdf>
- subsuelo3d. (2019a). *¿Qué es el equipo ASM001?* https://seureservercdn.net/45.40.149.34/d94.f9d.myftpupload.com/wp-content/uploads/2019/07/Manual_de_usuario_Switch_ASM001_V1_2.pdf
- subsuelo3d. (2019b). *¿Qué es el GeoAmp303?* https://seureservercdn.net/45.40.149.34/d94.f9d.myftpupload.com/wp-content/uploads/2019/07/Manual_de_usuario_Geoamp303_V1_2.pdf
- Subsuelo3d. (2019). *PROYECTOS* . <http://www.subsuelo3d.com/proyectos/>
- Tsokas, G. N., Tsourlos, P. I., Vargemezis, G. N., & Pazaras, N. T. (2011). Using surface and cross-hole resistivity tomography in an urban environment: An example of imaging the foundations of the ancient wall in Thessaloniki, North Greece. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(16), 1310–1317. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.03.007>

- Uchegbulam, O., & Ayolabi, E. A. (2014). Application of Electrical Resistivity Imaging in Investigating Groundwater Pollution in Sapele Area, Nigeria. *Journal of Water Resource and Protection*, 06(14), 1369–1379.
<https://doi.org/10.4236/jwarp.2014.614126>
- Zhang, X. (2016). Numerical Simulation Study on the Detection of Weak Structural Plane of Rock Slope by Using 3D Electrical Resistivity Tomography. *Engineering*, 08(07), 438–444. <https://doi.org/10.4236/eng.2016.87041>
- Zhang, X., Zhao, M., Wang, K., Liu, P., & Liu, H. (2016). Application of 3D Electrical Resistivity Tomography for Diagnosing Leakage in Earth Rock-Fill Dam. *Engineering*, 08(05), 269–275. <https://doi.org/10.4236/eng.2016.85023>
- zond. (n.d.). *Software geofísico Zond*. Retrieved April 28, 2020, from <http://zond-geo.com/english/>

11. ANEXOS

11.1. Valores de resistividad aparente

Tabla 8 valores típicos de resistividad de los materiales fuente (Arias, 2011)

Material	Resistividad (Ωm)
Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000
Basamento. Roca fracturada	1500-5000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100-2000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada	1-100
Gruss no saturado	500-1000
Gruss saturado	40-60
Saprolito no saturado	200-500
Saprolito saturado	40-100
Gravas no saturadas	500-2000
Gravas saturadas	300-500
Arenas no saturadas	400-700
Arenas saturadas	100-200
Limos no saturados	100-200
Limos saturados	20-100
Limos saturados con agua salada	5-15
Arcillas no saturadas	20-40
Arcillas saturadas	5-20
Arcillas saturadas con agua salada	1-10
Andosoles secos	1000-2000
Andosoles no saturados	300-1000
Andosoles saturados	100-300