

Caracterización geofísica a través de tomografías eléctricas 2D para la delimitación de zonas contaminadas por hidrocarburos en el subsuelo para el municipio de Toledo – Norte de Santander, Colombia, atendido por MCS Consultoría y Monitoreo Ambiental S.A.S



Gineth Castillo Mongui

Universidad de Pamplona

Facultad de Ciencias Básicas

Programa de Geología

Director académico

Msc. Ilich Sebastián Villamizar Solano

Docente revisor (Codirector)

Geólogo, Sebastián Dohener Hernández

Director empresarial

Geólogo, David Alexander Cuellar Montoya

Villa del Rosario, Norte de Santander

2024

Caracterización geofísica a través de tomografías eléctricas 2D para la delimitación de zonas contaminadas por hidrocarburos en el subsuelo para el municipio de Toledo – Norte de Santander, Colombia, atendido por MCS Consultoría y Monitoreo Ambiental S.A.S

Gineth Castillo Mongui

Director académico

Msc. Ilich Sebastián Villamizar Solano

Docente revisor (Codirector)

Geólogo, Sebastián Dohener Hernández

Director empresarial

Geólogo, David Alexander Cuellar Montoya

Trabajo de grado, modalidad práctica empresarial

Presentado como requisito para optar al título de Geólogo

Universidad de Pamplona

Villa del Rosario, Norte de Santander

2024

Tabla De Contenido

Resumen.....	7
1. Introducción.	1
2. Objetivos	2
2.1. Objetivo General.	2
2.2. Objetivos Específicos.....	2
3. Generalidades.....	3
4. Marco Teórico.	4
4.1. Geofísica.....	4
4.2. Tomografías de Resistividad Eléctrica.....	4
4.1.2. Resistividad eléctrica.....	5
4.1.3 Polarización inducida	9
Modalidades del Método de Polarización Inducida.....	10
Dominio del tiempo.....	11
Dominio espectral	11
4.2. Marco Geológico	11
4.2.1. Geología Regional	12
4.2.2. Geología Local	13
5. Metodología.....	14
5.1. Etapa 1: Recolección Bibliográfica	14
5.2 . Etapa 2: Delimitación y análisis del Área De Estudio	14
5.3. Etapa 3: Etapa de campo	15
5.4. Etapa 4: Adquisición de datos.....	16
5.5. Etapa 5: Procesamiento de datos.	17
5.6. Etapa 6: Análisis de resultados e informe final	17
6. Resultados	18
6.1 Línea 1 (paralela al drenaje).....	21
6.2. Línea 2 (perpendicular al drenaje)	23
6.3 Línea 3 (perpendicular al drenaje)	25
6.4. Línea 4 (perpendicular al drenaje)	28

6.5.	Línea 5 (perpendicular al drenaje)	30
6.6.	Línea 6 (perpendicular al drenaje)	33
6.7.	Línea 7 (perpendicular al drenaje)	35
6.8.	Delimitación zona contaminada.....	37
7.	Conclusiones y Recomendaciones.....	39
9.	Referencias.....	41
	Anexos.....	43

Tabla de Figuras

Figura 1. Mapa de localización área de estudio.....	3
Figura 2. Diagrama de puntos de atribución para el arreglo Wenner	7
Figura 3. Diagrama de puntos de atribución para el arreglo Wenner-Schlumberger.....	7
Figura 4. Diagrama de puntos de atribución para el arreglo Dipolo-Dipolo.....	8
Figura 5. Resistividad de las rocas, minerales, suelos y químicos.....	9
Figura 6. Polarización de Membrana y Polarización Electrónica	10
Figura 7. Gráficas de amplitud y fase.....	11
Figura 8. Mapa geológico del área de estudio en la plancha 111, Toledo	12
Figura 9. Equipo Supersting R1 de AGI.....	16
Figura 10. Imagen del sobrevuelo de dron	18
Figura 11. Reconocimiento de la geología local.	19
Figura 12. Líneas de tomografías Eléctricas 2D en el área de estudio	20
Figura 13. Resistividad y cargabilidad línea 1 (SSW-NNE).	21
Figura 14. Fotografía de línea 1 con vista hacia el W	21
Figura 15. Interpretación línea 1	23
Figura 16. Secciones transversales de resistividad y cargabilidad de la tomografía 2 (NWW-SEE).	24
Figura 17. Fotografía de la línea 2 vista hacia el E.....	24
Figura 18. Interpretación Línea 2.....	25
Figura 19. Secciones transversales de resistividad y cargabilidad de la tomografía 3 (NWW-SEE).	26
Figura 20. Nota. Fuente: Autor	26
Figura 21. Interpretación Línea 3.....	28
Figura 22. Secciones transversales de resistividad y cargabilidad de la tomografía 4 (NWW-SEE).	28
Figura 23. fotografía de la línea 4 vista hacia el E.	29
Figura 24. Interpretación Línea 4.....	30

Figura 25. Secciones transversales de resistividad y cargabilidad de la tomografía 5 (SSW-NNE).	31
Figura 26. Fotografía de línea 5 con vista hacia el N	31
Figura 27. Interpretación Línea 5	33
Figura 28. Secciones transversales de Resistividad y cargabilidad de la tomografía 6 (NWW-SEE).	33
Figura 29. Fotografía de la línea 6 vista hacia el E.....	34
Figura 30: Interpretación Línea 6.....	35
Figura 31. Secciones transversales de Resistividad y cargabilidad de la tomografía 7 (SSW-NNE).	35
Figura 32. Fotografía de línea 7 con vista hacia el E.....	36
Figura 33. Interpretación Línea 7	37
Figura 34. Zonificación de área contaminada.....	38

Resumen

El presente informe se enmarca dentro de una caracterización geofísica mediante tomografías eléctricas 2D para delimitar la zona de afectación generada por el derrame de hidrocarburo en el subsuelo en una zona puntual al norte del municipio de Toledo el municipio de Toledo, Norte de Santander, esto con el fin de mitigar a posteriori un impacto a largo plazo las áreas afectadas del subsuelo. Además, la gravedad del problema se incrementa cuanto mayor es la porosidad del suelo y/o la cantidad de hidrocarburo derramado por el posible riesgo de contaminación de recursos hídricos y otros componentes ambientales, por tal motivo la utilización de este método proporciona información vital sobre la distribución del contaminante en el subsuelo. Para la realización de esta caracterización se generaron e interpretaron secciones transversales de resistividad y cargabilidad mediante el software especializado de inversión res2Dinv, utilizando los datos recopilados durante las tomografías en la etapa de campo, asimismo, imágenes generadas con dron. Como resultado principal, se obtuvo valores de resistividad que oscilan entre 0,7 y 800 ohm/m, correlacionados con la litología predominante dividida en dos unidades: la unidad más superficial relacionada con depósitos coluviales recientes y la unidad infrayacente que se compone de lodolitas, ligeramente carbonosas. Se detectaron valores elevados de resistividad en ciertas áreas, los cuales podrían estar vinculados a la presencia de contaminación por hidrocarburos; identificando así posibles tendencias de flujo de contaminantes en las líneas 1, 3, 4 y 5 como resultados destacados.

Palabras Clave: Tomografía, resistividad, hidrocarburos, subsuelo, contaminación.

1. Introducción.

Los incidentes de contaminación en el subsuelo por derrames de hidrocarburos han impulsado la búsqueda de métodos de caracterización avanzados y precisos; entre estas técnicas, las tomografías eléctricas en 2D han surgido como herramientas que proporcionan información detallada sobre la distribución de la resistividad eléctrica, lo que a su vez ayuda en la identificación, caracterización y gestión efectiva de las áreas afectadas. En un estudio llevado a cabo por la Universidad de Los Andes en el año 2020 en Norte de Santander, se analizaron las emergencias ocurridas tras los atentados a las infraestructuras petroleras, que generaron derrames de oleoductos, este estudio incluyó al municipio de Toledo debido a la alta probabilidad de afectación de los recursos hídricos aledaños tras un atentado (Osorio, 2020, p024-38). Por lo tanto, es esencial delimitar rápidamente las zonas afectadas y tomar medidas para prevenir la contaminación del agua subterránea; Teniendo en cuenta lo anterior, y con el fin de apoyar el desarrollo de estudios geofísicos para la protección y recuperación del medio ambiente, se opta por realizar un estudio con tomografías eléctricas 2D en el subsuelo para reconocer y delimitar una zona contaminada por derrame de hidrocarburo en el municipio de Toledo, perteneciente al departamento de Norte de Santander atendido por MCS consultoría y monitoreo ambiental S.A.S.

Por medio de las secciones transversales de resistividad y cargabilidad se espera que se puedan delimitar las zonas de contaminación por hidrocarburos y evaluar la precisión de los estudios geofísicos en la caracterización de derrames de petróleo. Además, se busca que este método no invasivo sea considerado como una herramienta para determinar las zonas de mitigación para la evolución de impacto ambiental generado por este tipo de incidentes. Por consiguiente, se ha diseñado una metodología de 6 etapas. Dichas etapas están concebidas para garantizar un análisis integral y preciso de los componentes, con la finalidad de proporcionar la información necesaria en el respaldo de decisiones y acciones por parte de entidades gubernamentales.

2. Objetivos

A continuación, se presentarán los diferentes objetivos tanto generales como específicos.

2.1. Objetivo General.

- Caracterizar mediante tomografías eléctricas 2D el subsuelo para delimitar las zonas contaminadas por hidrocarburos en Toledo - Norte de Santander, Colombia, atendido por MCS consultoría y monitoreo ambiental S.A.S.

2.2. Objetivos Específicos.

- Diagnosticar las zonas contaminadas del subsuelo por hidrocarburos en el área de estudio, mediante la recopilación de datos obtenidos en campo.
- Analizar las variaciones y distribución de las propiedades físicas de los materiales presentes en profundidad, mediante las resistividades realizadas.
- Zonificar las áreas contaminadas para mostrar la distribución de una pluma de hidrocarburo en el área de estudio.

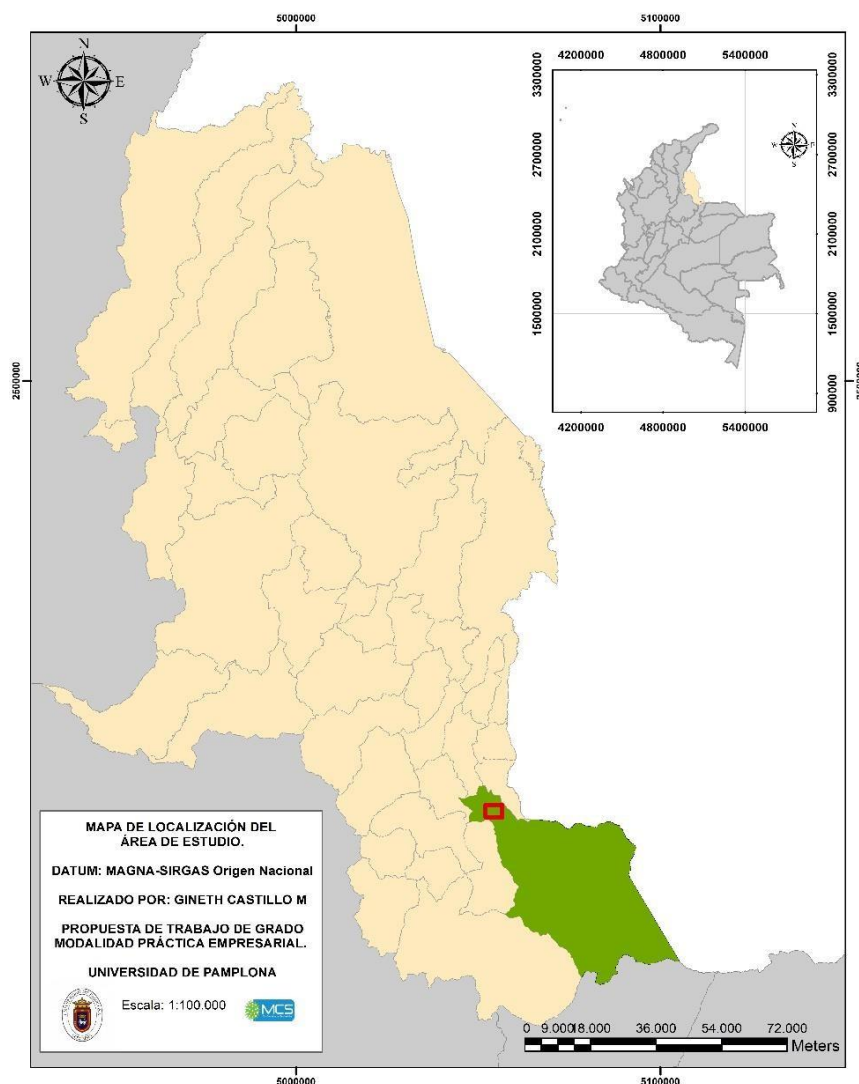
3. Generalidades.

A continuación, se mostrarán las diferentes generalidades sobre la localización Geográfica.

3.1. Localización Geográfica del área de estudio.

El área de estudio se sitúa al norte en una región rural del municipio de Toledo, localizada en el vértice formado por la Cordillera Oriental, como se puede observar en la **Figura 1**. Con el propósito de cumplir con las políticas de privacidad y confidencialidad establecidas por la empresa, no se mencionará específicamente la ubicación precisa del área de estudio. Sin embargo, es relevante señalar que el oleoducto Caño Limón – Coveñas atraviesa el municipio de Toledo, y las áreas impactadas a lo largo de su recorrido se localizan en la parte norte de dicho municipio.

Figura 1. Mapa de localización área de estudio



Nota. Fuente: Autor

4. Marco Teórico.

En este apartado se proporciona la base teórica sobre la cual se desarrolla el estudio, la cual, no solo fortalece la fundamentación del estudio, sino que orienta la interpretación de los resultados.

4.1. Geofísica

La rama de la Geofísica que trata sobre el comportamiento de rocas y sedimentos en relación a la corriente eléctrica es la prospección eléctrica. La implementación de este método de exploración no destructivo, consiste en la medición de las resistividades eléctricas en el subsuelo mediante la inyección de corriente a través de un par de electrodos metálicos C1 y C2, la medición del potencial se realizará en otro par de electrodos P1 y P2. Su disposición en el suelo y el incremento de la distancia entre ellos incrementan la profundidad de exploración. (Pacheco, 2015 p.22)

4.2. Tomografías de Resistividad Eléctrica

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) (2D), es un método que permite investigar la variación de la resistividad del subsuelo a profundidad y lateralmente. Se estudia a lo largo de líneas en una dirección determinada, donde se inyecta una corriente eléctrica y mediante un dispositivo receptor se observa la respuesta del subsuelo, siendo el resultado, datos de resistividades aparentes. Con las mediciones se construye una sección en dos dimensiones (2D) que muestra una primera aproximación de los cambios en el subsuelo. Posteriormente, se aplica un algoritmo de inversión para obtener la distribución real de resistividades o imagen eléctrica; imagen que será un resultado interpretable desde un punto de vista físico y geológico, y que dará información sobre las características físicas de este. (Zúñiga, 2012 p.16).

La Inversión calcula como resultado una “Imagen de Resistividades y Profundidades Verdaderas” que se correlaciona con la información geológica, perforaciones, geoquímica, hidrogeología, edafología, etc. A través de la Interpretación se llega a las conclusiones del

Diagnóstico Ambiental, que puede ser constatada con las observaciones de campo y datos de perforaciones y/o calicatas mecánicas. Tales prospecciones se efectúan comúnmente usando un número grande de electrodos, conectado a un cable multi-conductor. (López, 2004, p. 5).

4.1.2. Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica ρ de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad σ como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material. La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo viene determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor. Para un conductor rectilíneo y homogéneo de sección s y longitud l la resistencia eléctrica es: (Medida de la resistividad eléctrica del subsuelo. (Ecuación 1): (Pérez, A, *et al.*, 2010. p.13)

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (1)$$

A partir de esta ecuación podemos despejar la resistividad, ecuación 2

$$\rho = \frac{R \cdot s}{l} \quad (2)$$

- Resistividad (R)
- Resistividad eléctrica (ρ)
- Sección (s)
- Longitud (l)

Cuando se introduce corriente eléctrica en el terreno, ésta se puede propagar de tres maneras diferentes a través del subsuelo: conducción dieléctrica (asociada a materiales muy poco conductivos o aislantes), conducción electrónica (asociada a materiales con electrones libres, i.e. los metales) y conducción electrolítica (asociada al movimiento de los iones presentes en el fluido intersticial del terreno). (Pérez, A, *et al.*, 2010, p.15)

4.1.2.1. Factores que afectan a la resistividad.

La resistividad eléctrica es un parámetro que varía en función de las características del terreno. Algunos de los factores que lo influyen son: El grado de saturación del terreno, la temperatura, porosidad y la forma de los poros, la salinidad del fluido, el tipo de roca, los procesos geológicos que afectan a los materiales, la presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico. (Vargas, 2015, p.14)

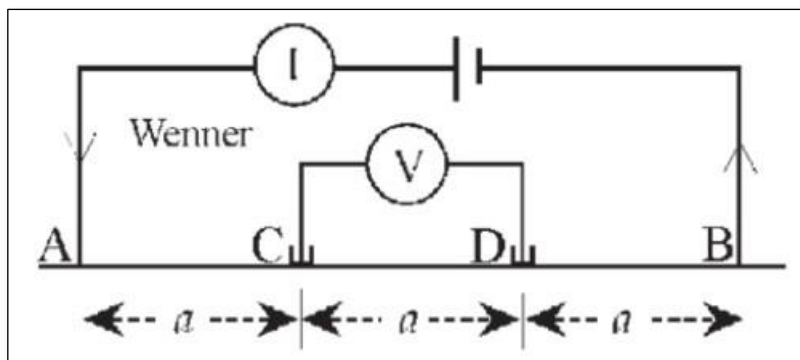
Es precisamente esta estrecha relación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del terreno, lo que permite el utilizar estos métodos de resistividad en la búsqueda de focos de filtración de agua en el subsuelo. En este sentido, incrementos del contenido en agua del terreno provocarán disminuciones de la resistividad. En lo que concierne a los otros factores, destacar que la salinidad del fluido, la porosidad del terreno, y la temperatura (si bien éste es un factor poco importante), presentan un comportamiento análogo al del grado de humedad. (López, 2004, p. 7)

4.1.2.2. Arreglos de electrodos

En la medición del potencial eléctrico se hace mediante un arreglo de electrodos formado con dos pares de electrodos, dos emisores y dos receptores. A través de los electrodos emisores C1C2 se inyecta la corriente y se realiza la medición del potencial eléctrico resultante, se realiza a través de electrodos hincados en el suelo y la manera en que éstos son acomodados recibe el nombre de arreglos o dispositivo electródico. (Vargas, 2015, p.16)

Arreglo Wenner: Es un arreglo tetraelectródico que se usa para medir la resistividad del suelo por medio de la ubicación de electrodos espaciados en línea recta, en este arreglo los electrodos son equidistantes entre sí, a una distancia denominada “a” siendo esta la que más convenga al estudio. El arreglo Wenner (ver **Figura 2**). Es más sensible a cambios verticales de resistividad en el subsuelo debajo del centro del arreglo. Sin embargo, es menos sensible a cambios horizontales. (Vargas, 2015, p.16)

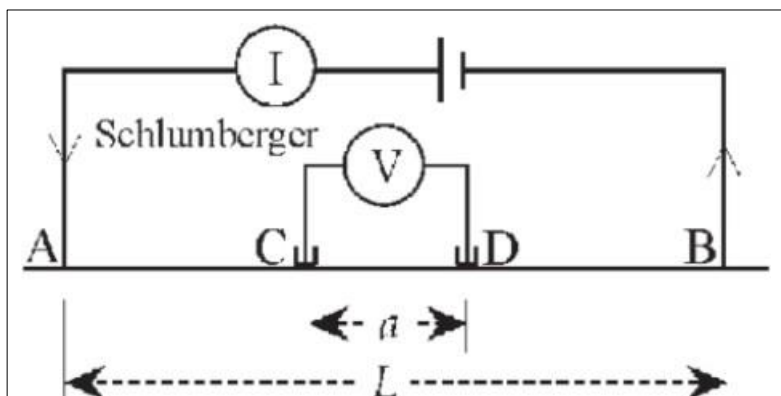
Figura 2. Arreglo Wenner



Nota. Fuente: Sánchez A. 2011. p.16

Arreglo Schlumberger: Se inicia colocando los cuatro electrodos a una distancia constante y la separación aumentará conforme aumente el factor n , Es así como resulta en una combinación que aporta resolución vertical y horizontal; la toma de datos es más cerca entre un punto y otro en forma horizontal y vertical, lo cual representa la ventaja de este arreglo. (ver **Figura 3**). (López, 2004, p.8)

Figura 3. Arreglo Schlumberger

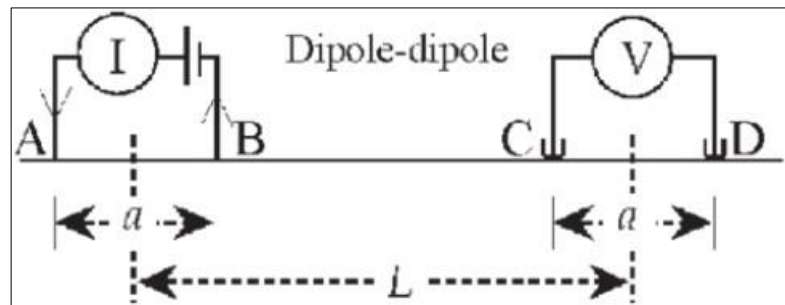


Nota. Fuente: Sánchez A. 2011.p, 15

Arreglo Dipolo-dipolo: Un dipolo (un par de electrodos conectados) envía corriente al subsuelo y el otro dipolo sirve como par de medición de potencial. La separación entre pares es a menudo comparable (o solo algunas veces mayor) al espaciamiento dentro de cada par, por lo que los pares de electrodos no son dipolos ideales. El arreglo dipolo-dipolo (ver **Figura 4**). Es sensible

a cambios laterales de resistividad, pero no a cambios verticales. Sin embargo, a medida que se alcanza mayor profundidad, se pierde más información. Por lo tanto, este arreglo tiene una mayor resolución en niveles cercanos a la superficie y es particularmente adecuado para detectar estructuras verticales, como cavidades. No obstante, su capacidad para identificar estructuras horizontales, como diques o capas sedimentarias, es relativamente pobre. (Vargas, 2015, p.20).

Figura 4. Arreglo Dipolo-Dipolo



Nota. Fuente: Sánchez Reynoso A. 2011.p, 14

4.1.2.3. Propiedades Eléctricas de los Materiales del Subsuelo

La tomografía eléctrica da una Imagen de la distribución de la resistividad real del subsuelo, para convertir esta Imagen de Resistividad en una estructura geológica / ambiental, es muy importante y necesario conocer algunas de las resistividades de los diferentes tipos de materiales del subsuelo y de la geología del área bajo estudio. (López, 2004, p.9)

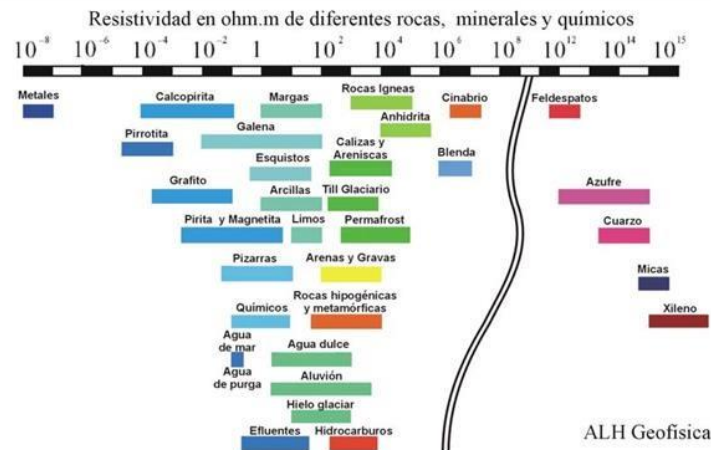
El flujo de la corriente eléctrica pasa a través de los materiales superficiales de la Tierra mediante dos mecanismos: conducción electrónica y conducción electrolítica. En donde el flujo de la corriente viaja a través de los iones del subsuelo. Es muy importante y necesario conocer como varía este parámetro en los diferentes tipos de materiales que constituyen el subsuelo y en las estructuras geológicas, las cuales se describirán a continuación como se observa en la **Figura 5**: (Lastra, 2013, p. 14-16)

- Las rocas ígneas y metamórficas presentan los valores de resistividad más altas, esto debido a los altos valores de presión al que están sometidas. El valor de la resistividad de estas rocas

depende del grado de fracturamiento, y del porcentaje de las fracturas saturadas de agua subterránea. La resistividad varía entre 1,000 y 10 millones [$\Omega \cdot m$], dependiendo del contenido de agua.

- Las rocas sedimentarias, son usualmente más porosas, y tienen un mayor contenido de agua. Normalmente tienen menores valores de resistividad comparado con las rocas ígneas y metamórficas. El rango de valores va de 10 a 1,000 [$\Omega \cdot m$]. El valor de la resistividad depende de la porosidad de la roca y la salinidad del agua contenida.
- Los sedimentos no consolidados generalmente presentan, incluso valores de resistividad menores a los de las rocas sedimentarias, con valores de entre 10 y menores a los 1,000 [$\Omega \cdot m$], el valor de la resistividad depende de la porosidad (asumiendo que todos los poros están saturados) así como el contenido de arcilla.

Figura 5. Resistividad de las rocas, minerales, suelos y químicos



Nota. Fuente: López, 2004

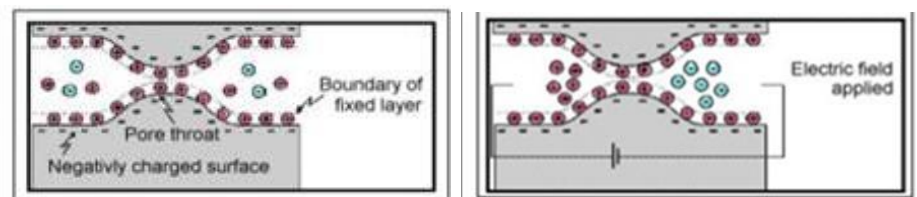
4.1.3 Polarización inducida

Se define como el momento dipolar de la corriente por unidad de volumen. Se le atribuye ese nombre debido a que el comportamiento físico en la tierra funciona como un sistema capacitivo, que se “carga” o “polariza” al suministrar energía eléctrica al medio. Con el paso de corriente eléctrica a través de la roca se crea un campo eléctrico (E) que, a su vez, puede producir uno o

varios tipos de polarización dependiendo su génesis: acumulación de cargas, por movimiento de cargas en un átomo, por desplazamiento de iones en la red cristalina o bien, por la orientación de las moléculas (López A, 2010, p.6-7). (Ver **Figura 6**):

a) Variaciones en la movilidad de los iones presentes en los fluidos a través de la estructura rocosa (IP ELECTROLÍTICA O DE MEMBRANA). b) Variaciones entre las conductividades iónica y electrónica donde existen depósitos de minerales metálicos.

Figura 6. Polarización de Membrana y Polarización Electrónica.



Nota. Fuente: López A, 2010, p.7

En ambos casos el fenómeno puede esquematizarse en el flujo de iones en dirección opuesta al electrodo que presenta carga del mismo signo. Una vez establecido este flujo de iones la tortuosidad del medio acuoso como producto de: a. estrechamiento del canal poroso; b. obstrucción por un grano metálico; c. obstrucción por acumulación de iones en torno a un núcleo de la roca de carga cargado eléctricamente; etc., induce la generación de barreras polarizadas con cargas de signo opuesto. La polarización de membrana representa el caso de una barrera conformada por la acumulación de iones en el entorno de una carga de signo opuesto en las paredes de la zona porosa. (Reyes R, 2011, p.18-19).

Modalidades del Método de Polarización Inducida

Las diferentes formas en cómo fueron llamando a los tipos de medición y análisis de Polarización Inducida, abordando en profundidad al método de Polarización Inducida en el dominio del Tiempo y dominio Espectral. (López A, 2010, p.9)

Dominio del tiempo

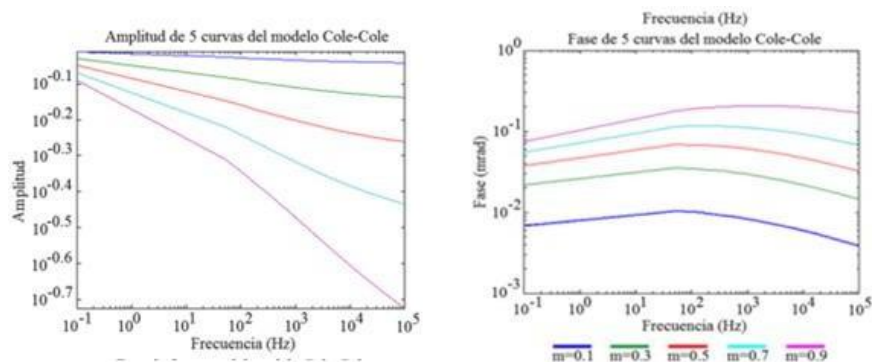
Cuando se detiene la corriente, el voltaje en los electrodos de prueba no decae inmediatamente, sino que persiste por un periodo de tiempo y luego decae su magnitud de manera continua en algunos medios o discontinua en otros, dependiendo de las características eléctricas del medio, así como de las características geoquímicas. (López A, 2010, p.10)

Dominio espectral

Los procesos de PI desde los puntos de vista físico y químico, han sido vistos de dos maneras: como polarización superficial y polarización volumétrica. A nivel microscópico, puede considerarse que todos los efectos son producidos como la suma de polarizaciones superficiales. (López A, 2010, p.21).

En la **Figura 7** se muestran los modelos para cinco curvas de cargabilidad con valores que van de 0.1 a 0.9. (López A, 2010, p.22)

Figura 7. Gráficas de amplitud y fase



Nota. Gráficas de amplitud y fase de las curvas calculadas del modelo Cole-Cole para cargabilidad con $R_0=1$, $\tau=0.1$ y $c=0.25$. Fuente: López A, 2010, p.22

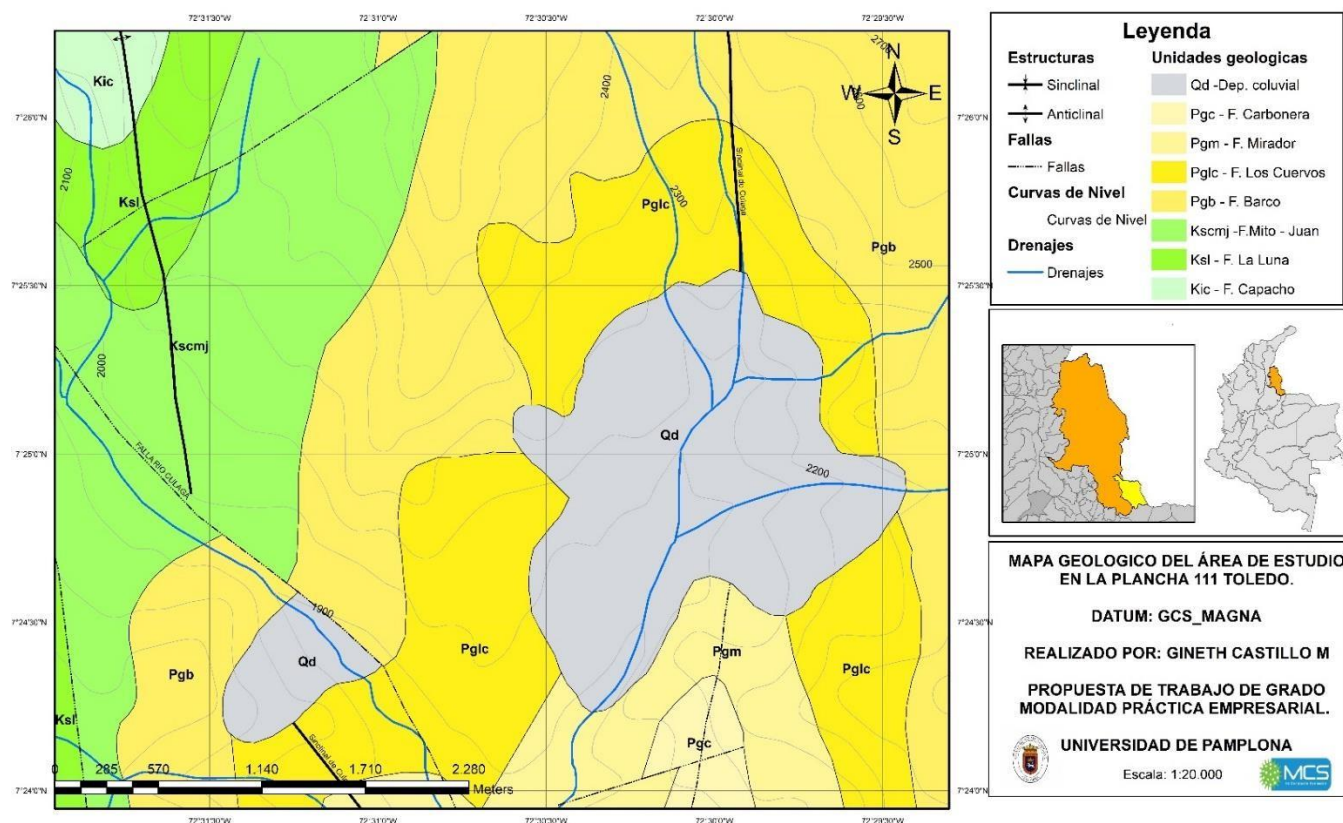
4.2. Marco Geológico

En este apartado se definen las características geológicas y estructurales del área de estudio.

4.2.1. Geología Regional

El área de estudio se encuentra localizada en el vértice formado por la Cordillera Oriental que se continúa en dirección NW y el ramal de la Cordillera de Mérida que toma rumbo NE y se prolonga en territorio venezolano. La información geológica regional se basa en la geología de plancha geológica 111 de Toledo – Norte de Santander, (ver **Figura 8**), con edades que van del Precámbrico hasta el Holoceno. Estas unidades agrupan rocas metamórficas del Precámbrico y Paleozoico inferior, rocas ígneas del Devónico- Carbonífero y Triásico-Jurásico, rocas sedimentarias del Devónico, Carbonífero-Pérmico, Jurásico, Cretácico, Terciario y depósitos cuaternarios. Las rocas sedimentarias ocupan una superficie del 88% del total del área, las metamórficas el 11% y las rocas ígneas y depósitos cuaternarios el 1%. (INGEOMINAS, 2001, p. 31)

Figura 8. Mapa geológico del área de estudio en la plancha 111, Toledo



Nota. La información geológica regional se basa en la geología de plancha geológica 111 de Toledo – Norte de Santander. Fuente: Tomado y Modificado de la plancha 111, Toledo de INGEOMINAS 2001

4.2.2. Geología Local

En el área de estudio se encuentran dos unidades geológicas las cuales presentan unas edades del Cenozoico hasta el Pleistoceno. Estas unidades representativas de este sector son la Formación los Cuervos y depósitos aluviales.

Formación los Cuervos (Tplc). En general la unidad está compuesta en la parte inferior por arcillas pizarrosas y arcillolitas carbonáceas, las cuales se encuentran intercaladas con areniscas de grano fino y mantos de carbón. Hacia la parte superior está compuesta por arcillolitas grises y grises verdosas parcialmente limolíticas y con esferulitas de siderita; las arcillas más superiores se caracterizan por ser de color rojo, amarillo y púrpura. Los mantos de carbón presentan espesores entre 0.10 y 2.50 m de espesor (Royero & Clavijo, 2001).

Para esta formación se reportan espesores de 200 a 750 metros. La Formación Los Cuervos yace concordantemente sobre la Formación Barco. Hacia tope, el contacto con la Formación Mirador está marcado por la aparición de grandes capas de arenisca, aparentemente es concordante, aunque según Notestein *et al*, (1944), De Porta, *et al*, (1974) y Bioestratigráfica (1998), es localmente discordante. Para la edad de la formación los cuervos se le asignan edades de Paleoceno-Eoceno inferior (Van Der Hammen, 1960, p.25).

Depósitos coluviales (Qd)

Consisten de materiales no consolidados, heterogéneos, producto de la fracturación, meteorización y erosión de rocas, que han sufrido transporte por acción del agua y de la gravedad, y se han depositado en la parte inferior de las laderas, los cuales están agrupados en la unidad cuaternaria más antigua (Qd), considerada de edad pleistocénica. (SGC, 2014, p.46)

5. Metodología

La metodología utilizada para la realización de la caracterización geofísica a través de tomografías eléctricas 2D, proporciona una guía metodológica para la empresa en gestión ambiental y la mitigación de impactos en el subsuelo, facilitando significativamente la obtención de información detallada sobre la distribución espacial de contaminantes, la cual se dividió en seis etapas las cuales se detallan a continuación.

5.1.Etapa 1: Recolección Bibliográfica

En esta primera etapa se realizó recopilación de información disponible en el área de estudio, en esta búsqueda se incluyeron estudios provenientes de fuentes bibliográficas tanto Nacionales como Internacionales. Esto abarca informes geológicos, proyectos de grado y análisis derivados de estudios con tomografías eléctricas y estudios sísmicos. Para recopilar toda esta información, se realizaron consultas principalmente en las bases de datos del Servicio Geológico Colombiano (SGC) identificando así la plancha 111 Toledo – Norte de Santander a escala 1:100.000, la cual será llevada a campo para corroborar la información, el instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), diferentes repositorios Universitarios y demás documentos encontrados en sitios web referentes al área de estudio. Toda esta primera etapa se realizó para tener aquellas fuentes que hayan aplicado estos estudios a problemáticas similares y de esta manera establecer un marco conceptual sólido que sirva como base para el desarrollo de las etapas subsiguientes.

5.2 . Etapa 2: Delimitación y análisis del Área De Estudio

Identificación el área de estudio: Se realizó primeramente una pequeña etapa de pre-campo donde se delimitó la zona de estudio sobre una Sobre una base cartográfica la cual fue la de plancha geológica 111 de Toledo – Norte de Santander, también se utilizaron imágenes satelitales proporcionadas por Google Earth pro para observar las diferentes vías de acceso que no estuvieran actualizadas en la plancha.

Sobrevuelo de dron: se realizó un sobrevuelo con el dron Mavic 2 PRO, esto para generar una ortofoto del área de estudio, para el vuelo de este dron se tuvieron unas especificaciones de vuelo, con una altura de 100 m y una velocidad de 18 km/h, todo esto para que las imágenes quedaran de excelente calidad y fueran más fácil de procesar, para el vuelo se tomaron un total de en un tiempo de 25 minutos.

Procesamiento de ortofotos: Se generó un procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales en el programa Agisoft Metashape para determinar la cantidad de líneas de tomografías y cantidad de electrodos a emplear.

5.3. Etapa 3: Etapa de campo

Recolección de información primaria: En esta etapa se inició con el reconocimiento de la geología local, la cual se llevó a cabo en los puntos preestablecidos de las líneas de tomografías, garantizando así la coherencia espacial y la precisión de los datos recopilados, en donde se llevó a cabo el reconocimiento de las principales características litológicas, y constatar e identificar los principales agentes hídricos de acuerdo a la información secundaria.

Elección de la configuración del equipo y del terreno: En primer lugar, se eligió la configuración dipolo-dipolo debido a su alta resolución superficial, sensibilidad lateral profunda facilidad ideal para la detección de plumas contaminantes, entre otras. Se prefirió un terreno con una pendiente similar, se preparó el área donde se llevó a cabo la instalación, verificando que estuviera libre de obstáculos y fuera representativa de las condiciones geológicas locales. Se utilizó el equipo Supersting R1 de AGI (ver **Figura 9**) con un Rango de Voltaje: +/- 400 V y una resolución Teórica de 30 nV para así poder realizar mediciones de resistividad eléctrica y de cargabilidad en el dominio del tiempo.

Figura 9. Equipo Supersting R1 de AGI



Nota. Fuente: [https://www.researchgate.net/figure/Data-collection-using-the-AGI-SuperSting-R1-IP-SP-a-](https://www.researchgate.net/figure/Data-collection-using-the-AGI-SuperSting-R1-IP-SP-a-SuperSting-TM-console-b-Switch_fig1_349725399)

[SuperSting-TM-console-b-Switch_fig1_349725399](https://www.researchgate.net/figure/Data-collection-using-the-AGI-SuperSting-R1-IP-SP-a-SuperSting-TM-console-b-Switch_fig1_349725399)

Montaje de los equipos: En primer lugar, los electrodos se clavaron en el terreno de forma equiespaciada, asegurando que formaran una línea recta y definiendo claramente el origen y el final de la sección transversal. Una vez colocados, se conectaron al cable mediante los conectores correspondientes, tanto para la corriente como para el potencial. Luego, los cables se conectaron a la consola y a la batería para iniciar la adquisición de datos. Se elaboraron pruebas respectivas a fin de calibrar las mediciones acordes con las condiciones del subsuelo para el área según las características geológicas.

5.4. Etapa 4: Adquisición de datos.

Equipo portátil: La consola se conectó desde un cable USB al computador portátil y se abrió el programa del equipo para poder configurar todas las variables del dispositivo: número de electrodos utilizados, distancia entre ellos, dispositivo electródico de medida y el número de medidas a realizar. En el programa se escogió un electrodo de referencia para verificar los demás electrodos, del cual se determinó el valor del voltaje necesario en el arreglo para la adquisición y de esta misma manera se ajustaron los datos de profundidad para tomar los datos.

Mediciones: Una vez inyectada la corriente y ajustado el programa, se realizaron las mediciones en todos los puntos de interés dentro del área de estudio registrando los potenciales

eléctricos medidos para cada configuración, posteriormente se construyó una base de datos alfanumérica, que contiene los valores obtenidos durante el proceso, almacenada digitalmente en el portátil, a fin de proceder a su procesado e interpretación con el programa correspondiente.

5.5. Etapa 5: Procesamiento de datos.

Se empleó el software especializado de inversión y modelización denominado RES2DINV para el procesamiento de la información, inicialmente se preprocesaron los datos tomados para eliminar ruido, corregir errores y asegurar que los datos estén en un formato adecuado y realizar el primer filtro, utilizando la interfaz LS Toolbox,

Posteriormente se eliminaron datos anómalos o que estuvieran por fuera del promedio “exterminate bad data points”, una vez completada la inversión, se visualizaron los resultados en forma de imágenes de resistividad.

Se generaron múltiples modelos utilizando el software. Se seleccionó el modelo con el menor error, ya que representaba una óptima relación con los datos litológicos en la superficie. Esto permitió minimizar la diferencia entre los datos medidos y los datos calculados por el modelo RES2DINV, alineándolos mejor con las observaciones previas.

5.6. Etapa 6: Análisis de resultados e informe final

Durante la sexta etapa, se llevó a cabo el análisis y correlación de la información bibliográfica obtenida en la primera etapa con los datos recopilados durante la etapa de campo. Una vez completada la inversión, se analizaron los modelos de resistividad obtenidos para identificar estructuras geológicas, anomalías hidrogeológicas u otros fenómenos de interés en el subsuelo.

Las secciones transversales de resistividad y cargabilidad adquiridos de las tomografías se interpretaron en función de los valores de resistividad teóricos con los valores representados en cada uno de las secciones transversales de las tomografías en sus respectivas zonas según se consideró; se realizó un análisis detallado de las características identificadas en los modelos de

resistividad obtenidos del software para obtener conclusiones significativas sobre las propiedades del subsuelo, culminando de esta manera con la identificación y delimitación de la zona afectada por la contaminación y su relación con la litología presente, respecto a su incidencia en el recorrido a nivel superficial y el análisis minucioso de las tomografías eléctricas.

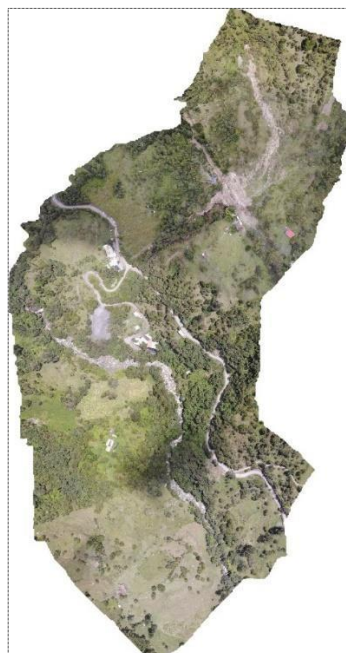
Al concluir el proyecto, se elaboró el informe final, que comprendió un análisis minucioso y una interpretación exhaustiva de los datos geofísicos recopilados a lo largo de las fases previamente mencionadas.

6. Resultados

En el siguiente apartado se mostrarán todos los resultados obtenidos de la caracterización geofísica a través de tomografías eléctricas 2D en el subsuelo para el municipio de Toledo.

Imágenes del sobrevuelo de dron: Se procesaron las fotos con un traslape del 70%, para lo cual se usó el programa Agisoft Metashape, para realizar un procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y determinar un buen traslape, de esta manera se generó una figura final en formato final (Tiff) del sobrevuelo en el área de cómo se observa en la **Figura 10**.

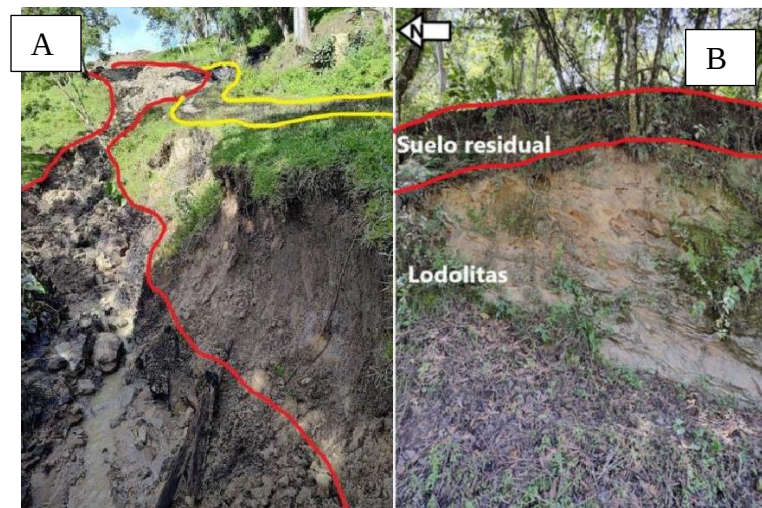
Figura 10. Imagen del sobrevuelo de dron



Nota. Fuente: Agisoft Metashape

Reconocimiento de la geología local: Al tratarse de ser una zona con rocas principalmente sedimentarias se realizó el reconocimiento de las principales características litológicas ver **Figura 11**, tales como el color, textura, estructuras, y cualquier otro detalle relevante, también se observó la topografía del terreno, rasgos geomorfológicos y se identificaron los principales agentes hídricos, de acuerdo a la información secundaria.

Figura 11. Reconocimiento de la geología local.



Nota: A. Márgenes de la quebrada cubiertas de una capa superficial de hidrocarburo, se observa suelo que presenta una textura predominantemente limo-arcillosa. se evidencia que las márgenes están cubiertas de una capa superficial de producto, el cuál alcanzó una infiltración de alrededor de 10-20 cm de profundidad. B. Se observa un perfil típico del área con un suelo residual con espesores variables entre 0,5 m y 2 m de espesor suprayaciendo unas lodolitas de la Fm. Los cuervos. Fuente: Autor

Tomografías Eléctricas: Se llevó a cabo una campaña de adquisición, procesamiento e interpretación de siete (7) líneas de tomografía eléctrica 2D, se definió que la longitud total de las líneas es de 700 m, se inició con las tomografías paralelas al drenaje, denominadas línea 1 y línea 5 con una longitud de 200 m cada una, se utilizaron 28 electrodos en cada una de las líneas distanciadas entre sí a 5 m; posteriormente se siguió con las líneas 2, 3, 4, 6 y 7 perpendiculares al

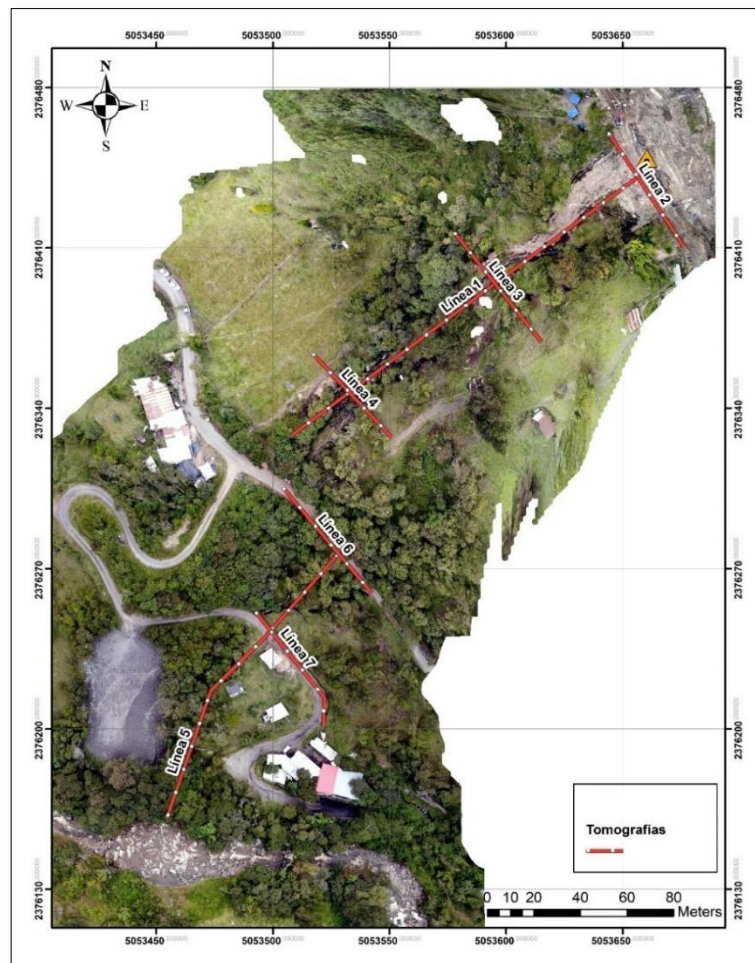
drenaje con una longitud de 60 m cada una perpendicular al drenaje presente, se utilizaron 38 electrodos en cada una de las líneas, distanciadas entre sí a 2 m.

Tabla 1. Líneas de tomografías

Línea	Longitud (m)	Orientación
Línea 1	200	SW-NE
Línea 2	60	NE-SW
Línea 3	60	NE-SW
Línea 4	60	NE-SW
Línea 5	200	SW-NE
Línea 6	60	NE-SW
Línea 7	60	NE-SW

Como se observa en la (**Figura 12**), se presentan las líneas de las tomografías seleccionadas en la zona de acuerdo a las imágenes de sobrevuelo de dron (ortofotos).

Figura 12. Líneas de tomografías Eléctricas 2D en el área de estudio

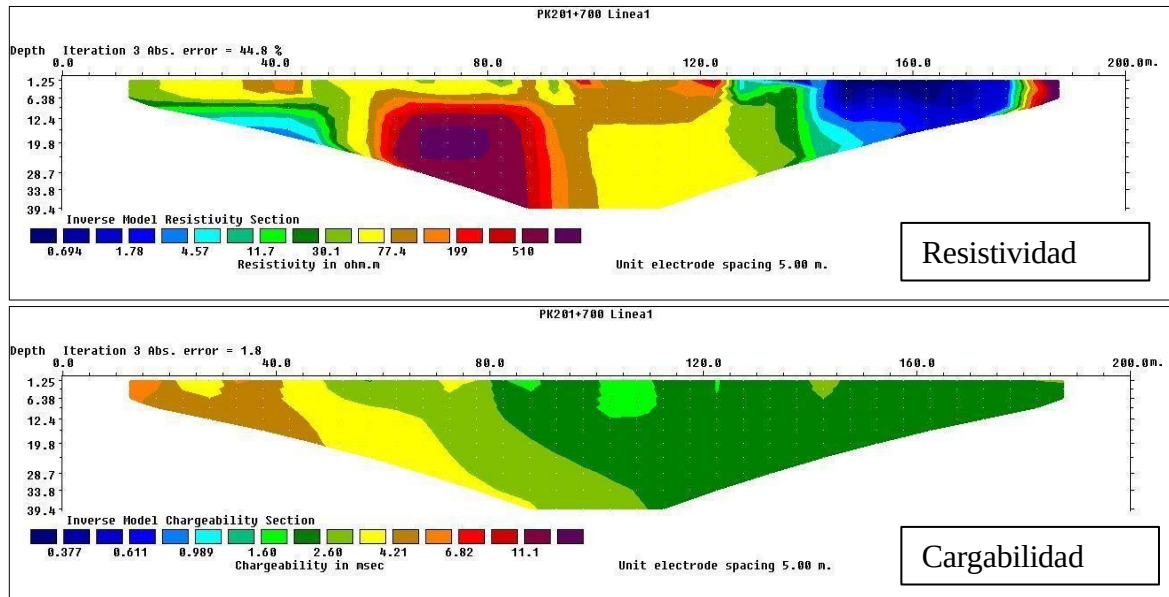


Nota. Fuente: Autor

6.1 Línea 1 (paralela al drenaje)

A continuación, se presentan las secciones transversales de resistividad y cargabilidad (ver **Figura 13**) adquiridos de la tomografía de la línea 1, en donde, el error presente de 44.8% corresponde a una escogencia de la sección transversal de óptima relación con los datos litológicos en la superficie.

Figura 13. Secciones transversales de Resistividad y cargabilidad línea 1 (SSW-NNE).



Nota. Fuente: Inversión obtenida con el software RES2DINV.

Figura 14. Fotografía de línea 1 con vista hacia el W.



Nota. Fuente: Autor

La **Línea – 1** se realizó con un rumbo SW-NE. Se observa una tendencia de valores de resistividades desde los 0,1 ohm/m hasta los 800 ohm/m y valores de cargabilidad desde los 0,2 ms

hasta los 15 ms en promedio. Para la interpretación de los resultados se usan los valores de resistividad puesto que son los que mejor relación y contraste pueden presentar en función de los objetivos de observación dentro del estudio. Para el caso de la Línea – 1 se identificaron 3 zonas en las que se agruparon los valores de resistividad y que generan contrastes diferenciables dentro de la sección transversal, estas zonas se describen a continuación:

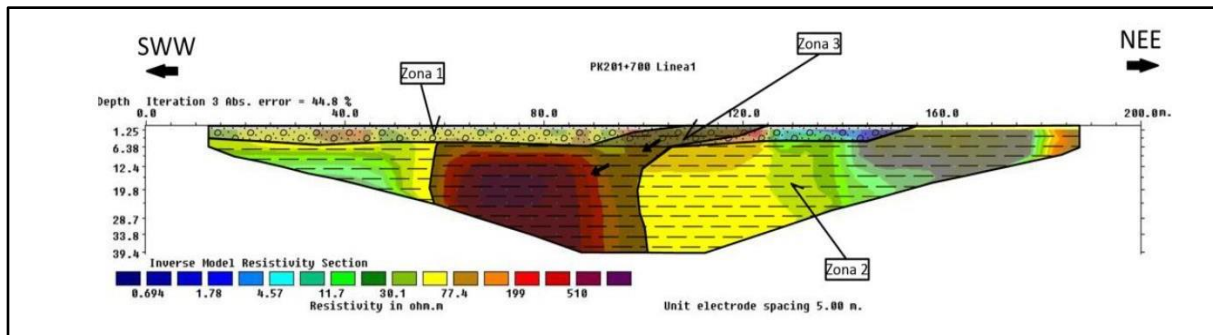
Zona 1 – Depósitos Recientes Saturados: Se presenta como la zona más superficial, ligeramente alargada y con un espesor no mayor a los 7 m, esta zona presenta valores de resistividad que varían desde los 10 ohm/m hasta los 200 ohm/m, litológicamente estos valores se asocian a zonas de depósitos recientes de predominio arenoso según evidencias aportadas en las observaciones de campo, con saturación de agua en superficie en algunos tramos y presencia de clastos ocasionales. Se identifican desde esta zona algunas franjas con valores de resistividad superiores a los 200 ohm/m asociados a la presencia de clastos o bloques de materiales resistivos y posiblemente a la presencia de hidrocarburos en el medio, producto del evento de derrame ocurrido.

Zona 2 – Rocas de la Formación Los Cuervos (Tplc): Esta zona se identifica en 2 franjas a lo largo de la línea y se encuentra cortada en la mitad por una franja de valores resistivos altos. Esta zona 2 presenta los valores de resistividad más bajos del área de estudio con un intervalo entre los 0,7 ohm/m y los 80 ohm/m. Litológicamente estos valores de resistividad se asocian a rocas alteradas de la Formación Los Cuervos (Tplc), las cuales se presentan en el sector como una intercalación de lodolitas grises, carbonosas y micáceas con intercalaciones de niveles de arenitas. Debido a sus características geológicas estas rocas se pueden encontrar fracturadas generando porosidades secundarias que faciliten el movimiento de fluidos dentro de la secuencia.

Zona 3 – Zona de anomalía en valores de resistividad: Esta zona se ubica en la parte central de la sección transversal y corta abruptamente la continuidad de valores resistivos dentro de la Zona 2, generando así una anomalía de valores en esta franja. Presenta los valores de

resistividad más altos dentro de la sección transversal ($>$ a los 200 ohm/m). Estos valores altos se relacionan a lodolitas y arenitas de la Formación Los Cuervos con una posible influencia o acumulación de hidrocarburo dentro de algunas zonas en la secuencia; cabe aclarar que al ser unidades predominantemente de litologías finas las zonas de acumulación pueden estar asociadas a zonas de fracturas o deformación dentro de la secuencia.

Figura 15. Interpretación línea 1

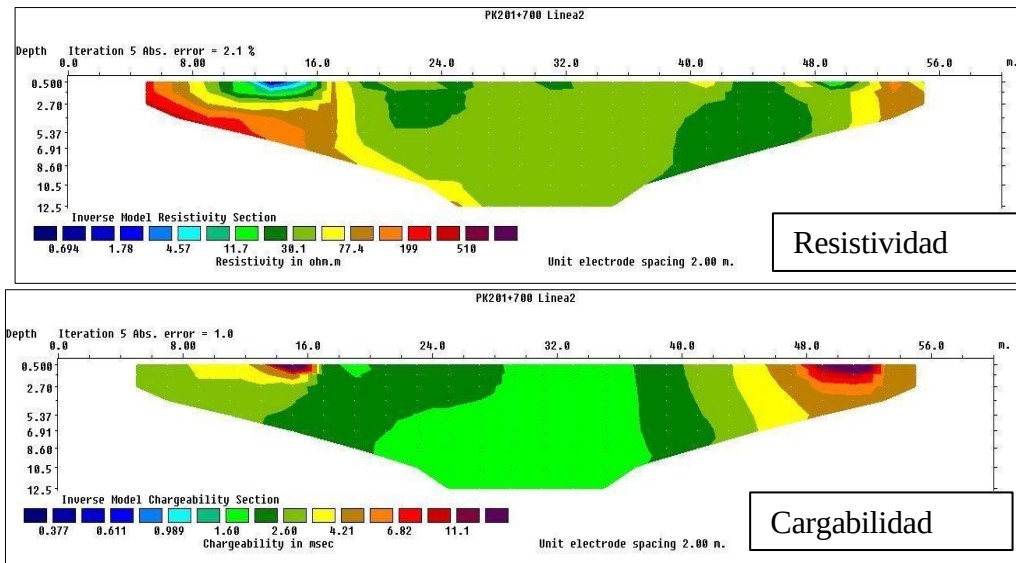


Nota. Fuente: Inversión obtenida con el software RES2DINV.

6.2. Línea 2 (perpendicular al drenaje)

A continuación, se presentan las secciones transversales de resistividad y cargabilidad (ver **Figura 16**) adquiridos de la tomografía de la línea 2.

Figura 16. Secciones transversales de resistividad y cargabilidad de la tomografía 2 (NNW-SEE)



Nota. Fuente: Inversión obtenida con el software RES2DINV.

Figura 17. Fotografía de la línea 2 vista hacia el E.



Nota. Fuente: Autor

La **Línea – 2** fue adquirida con un rumbo NNW-SEE perpendicular a la anterior Línea 1. En función de los valores de resistividad representados en la sección transversal, se identifican tres (3) zonas con propiedades diferentes:

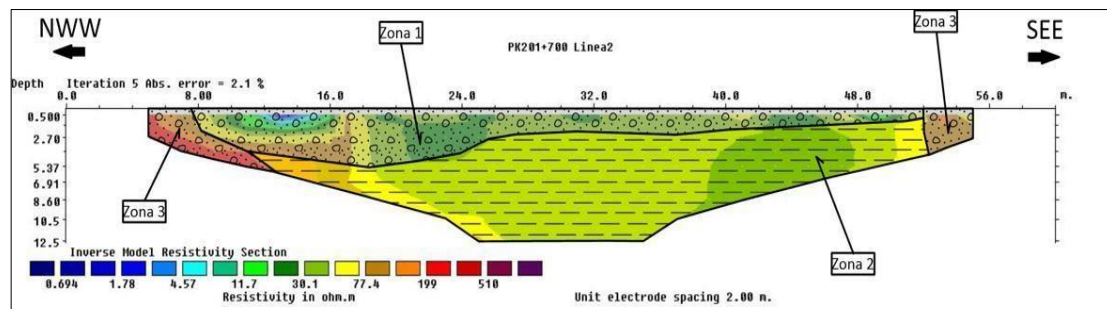
Zona 1 - Depósitos: Se presenta como la zona más superficial, ligeramente alargada y con un espesor no mayor a los 6 m, esta zona presenta valores de resistividad que varían desde los 0,7 ohm/m hasta los 80 ohm/m, litológicamente estos valores se asocian a zonas de depósitos recientes

de predominio arenoso según evidencias aportadas en las observaciones de campo, con una marcada presencia de agua en algunos tramos y presencia de clastos ocasionales.

Zona 2 – Rocas de la Formación Los Cuervos (Tplc): Presenta un intervalo de valores de resistividad entre los 10 ohm/m y los 80 ohm/m, litológicamente estos valores se asocian a rocas alteradas de la Formación Los Cuervos las cuales se presentan en el sector como una intercalación de lodolitas grises, carbonosas, micáceas con intercalaciones de niveles de arenitas.

Zona 3 – Zona de anomalía en valores de resistividad: Esta zona se ubica en dos franjas hacia los extremos de la Línea – 2, cortando abruptamente la continuidad de los valores relacionados a las Zonas 1 y 2. Presenta los valores de resistividad más altos dentro de la sección transversal (> a los 80 ohm/m). Estos valores altos se relacionan a una marcada influencia de posibles obras civiles adelantadas dentro del derecho de vía del poliducto Caño Limón – Coveñas en el tramo estudiado y en menor contraste presencia de hidrocarburo.

Figura 18. Interpretación Línea 2

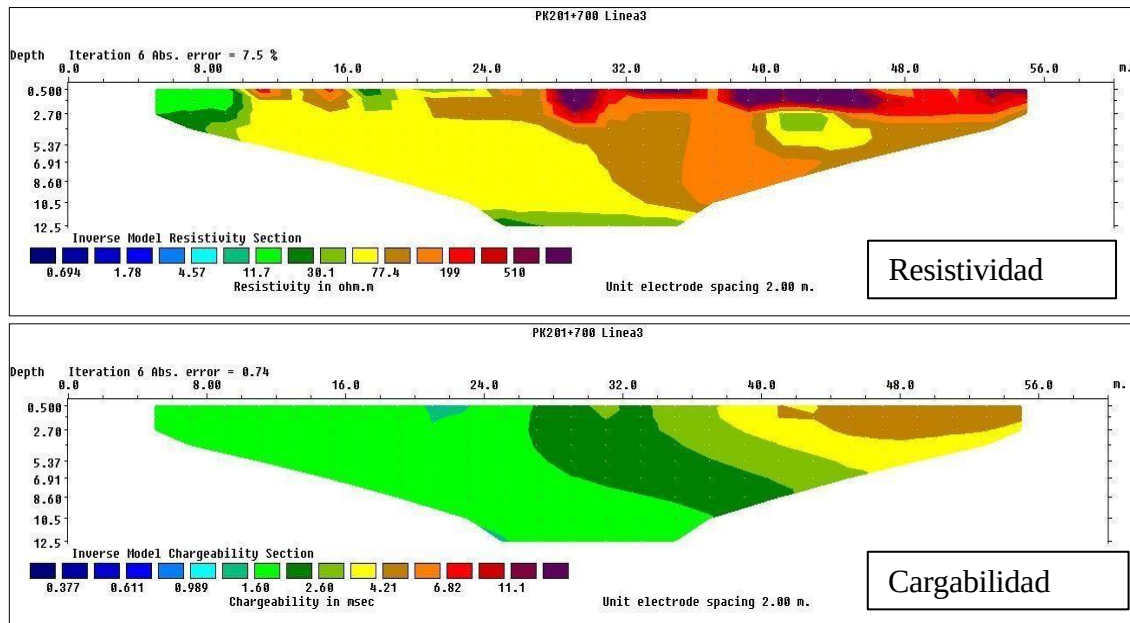


Nota. Fuente: Inversión obtenida con el software RES2DINV.

6.3 Línea 3 (perpendicular al drenaje)

A continuación, se presentan las secciones transversales de resistividad y cargabilidad (ver **Figura 19**) adquiridos de la tomografía de la línea 3.

Figura 19. Secciones transversales de resistividad y cargabilidad de la tomografía 3 (NNW-SEE)



Nota. Fuente: Inversión obtenida con el software RES2DINV.

Figura 21. Fotografía de línea 3 con vista hacia el W



Nota. Fuente: Autor

La **Línea – 3** se realizó con un rumbo NNW-SEE. En función de los valores de resistividad representados en la sección transversal, se identifican tres (3) zonas, con propiedades diferentes:

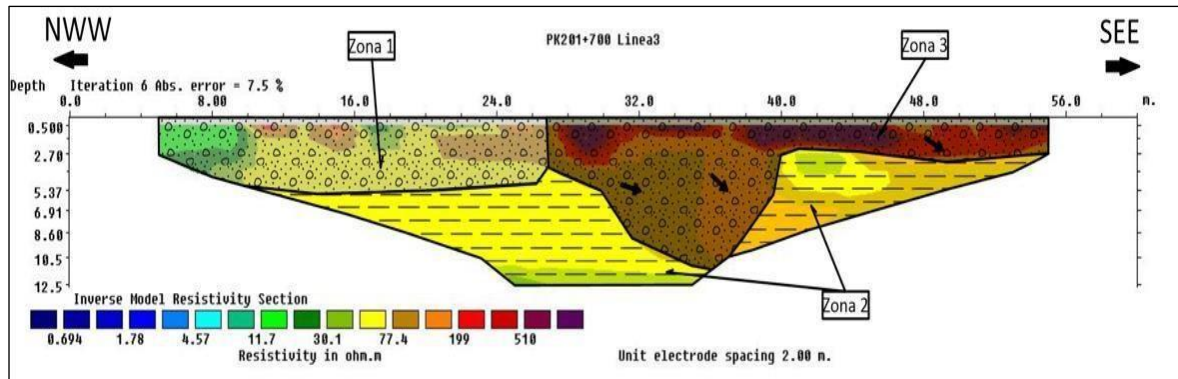
Zona 1 - Depósitos: Se presenta como la zona más superficial, ligeramente alargada y con un espesor no mayor a los 6 m, esta zona presenta valores de resistividad que varían desde los 5 ohm/m hasta los 80 ohm/m, litológicamente estos valores se asocian a zonas de depósitos recientes

de predominio de matriz arenosa según evidencias aportadas en las observaciones de campo y con una marcada presencia de agua en algunos tramos y, presencia de clastos ocasionales.

Zona 2 – Rocas de la Formación Los Cuervos (Tplc): Esta zona se identifica en 2 franjas a lo largo de la parte central y occidental de la Línea – 3, esta zona presenta los valores de resistividad con un intervalo entre los 20 ohm/m y los 80 ohm/m. Litológicamente estos valores de resistividad se asocian a rocas alteradas de la Formación Los Cuervos (Tplc) las cuales se presentan en el sector como una intercalación de lodolitas grises, carbonosas, micáceas con intercalaciones de niveles de arenitas. Estas rocas se pueden encontrar fracturadas generando porosidades secundarias que faciliten el movimiento de fluidos dentro de la secuencia.

Zona 3 – Zona de anomalía en valores de resistividad: Esta zona se ubica en la parte superficial de la sección transversal desde los 30 m hasta los 60 m aproximadamente y presenta un espesor que varía desde 4 hasta 12 m de profundidad, ocupa más del 30% del área central de la sección transversal y corta abruptamente la continuidad de valores resistivos dentro de la Zona 2, generando así una anomalía de valores en esta franja. Presenta los valores de resistividad más altos dentro de la sección transversal ($> 80 - 100$ ohm/m). Estos valores altos se relacionan a lodolitas y arenitas de la Formación Los Cuervos con una posible influencia o acumulación de hidrocarburo dentro de algunas zonas en la secuencia; cabe aclarar que al ser unidades predominantemente de litologías finas las zonas de acumulación pueden estar asociadas a zonas de fracturas o deformaciones dentro de la secuencia.

Figura 21. Interpretación Línea 3

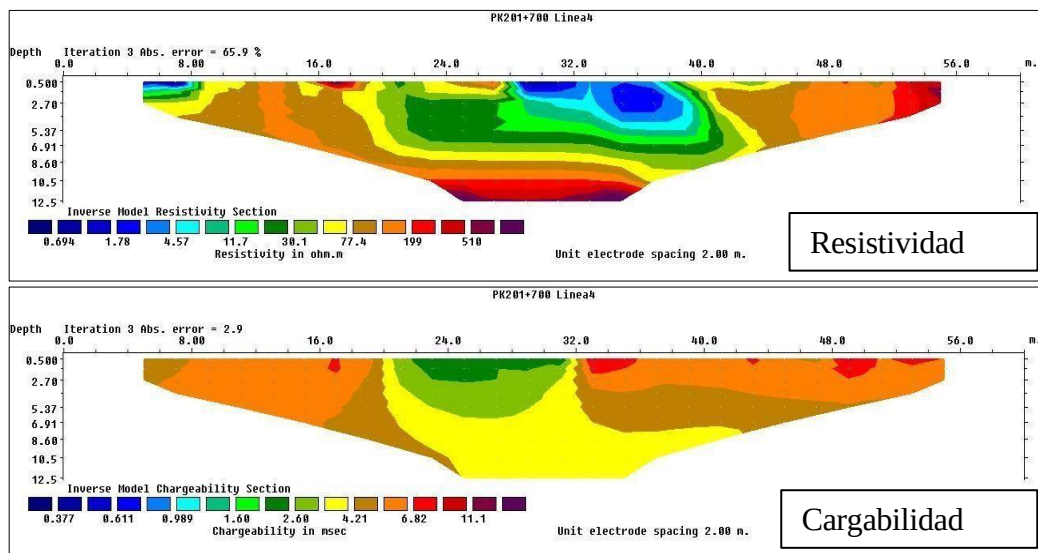


Nota. Fuente: Inversión obtenida con el software RES2DINV.

6.4. Línea 4 (perpendicular al drenaje)

A continuación, se presentan las secciones transversales de resistividad y cargabilidad (ver **Figura 22**) adquiridos de la tomografía de la línea 4.

Figura 22. Secciones transversales de resistividad y cargabilidad de la tomografía 4 (NWW-SEE).



Nota. Fuente: Inversión obtenida con el software RES2DINV.

Figura 23. Fotografía de la línea 4 vista hacia el E.



Nota. Fuente: Autor

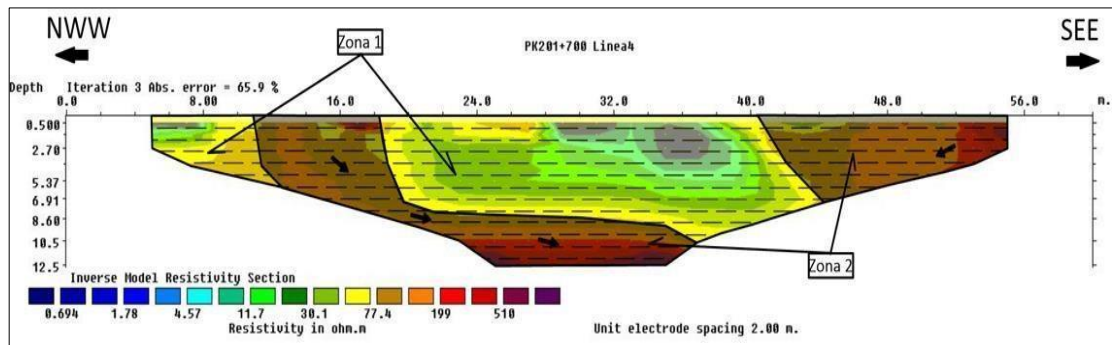
La **Línea – 4** se realizó con un rumbo NWW - SEE. En función de los valores de resistividad representados en la sección transversal, se identifican dos (2) zonas, con propiedades diferentes:

Zona 1 – Rocas de la Formación Los Cuervos (Tplc): Esta zona se identifica en 2 franjas a lo largo de la parte central y oriental de la sección transversal de la Línea – 4, esta zona presenta los valores de resistividad más bajos con un intervalo entre los 0,7 ohm/m y los 80 ohm/m. Litológicamente estos valores de resistividad se asocian a rocas alteradas de la Formación Los Cuervos (Tplc) las cuales se presentan en el sector como una intercalación de lodolitas grises, carbonosas, micáceas con intercalaciones de niveles de arenitas. Estas rocas se pueden encontrar fracturadas generando porosidades secundarias que faciliten el movimiento de fluidos dentro de la secuencia.

Zona 2 – Zona de anomalía en valores de resistividad: Esta zona se ubica en la parte central y occidental de la sección transversal de resistividades alcanzando profundidades hasta los 12 m, ocupa más del 30% del área central de la sección transversal y corta abruptamente la continuidad de valores resistivos dentro de la Zona 2, generando así una anomalía de valores en esta franja. Presenta los valores de resistividad más altos dentro de la sección transversal (> 100 ohm/m). Estos valores altos se relacionan a lodolitas y arenitas de la Formación Los Cuervos con

una posible influencia o acumulación de hidrocarburo dentro de algunas zonas en la secuencia; cabe aclarar que al ser unidades predominantemente de litologías finas las zonas de acumulación pueden estar asociadas a zonas de deformación dentro de la secuencia. En esta zona se puede observar una tendencia de flujo del hidrocarburo hacia zonas más profundas a lo largo de posibles zonas de falla dentro de la secuencia de rocas.

Figura 24. Interpretación Línea 4

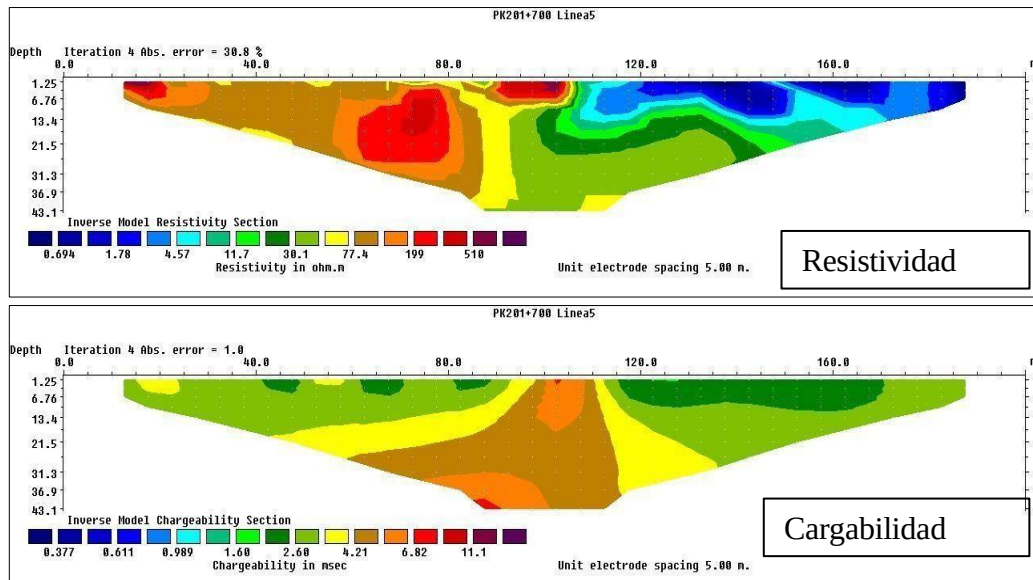


Nota. Fuente: Inversión obtenida con el software RES2DINV.

6.5. Línea 5 (perpendicular al drenaje)

A continuación, se presentan las secciones transversales de resistividad y cargabilidad (ver **Figura 25**) adquiridos de la tomografía de la línea 5.

Figura 25. Secciones transversales de resistividad y cargabilidad de la tomografía 5 (SSW-NNE).



Nota. Fuente: Inversión obtenida con el software RES2DINV.

Figura 26. Fotografía de línea 5 con vista hacia el N



Nota. Fuente: Autor

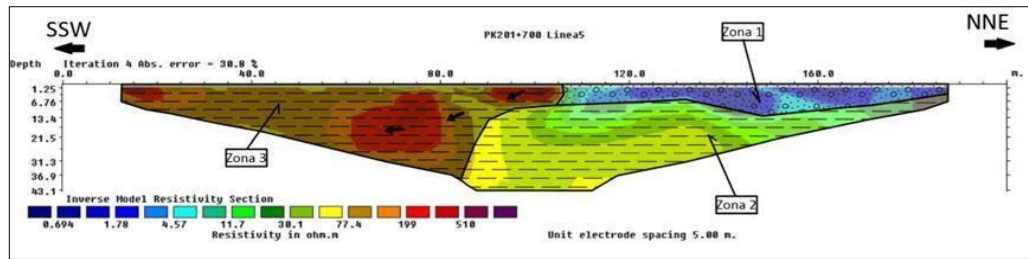
La **Línea – 5** se realizó con un rumbo SW-NE, paralelo al trazado de la quebrada en el sector. En el análisis de los valores de resistividad se identificaron 3 zonas, en las que se agruparon los valores y que generan contrastes diferenciados dentro de la sección transversal, estas zonas se describen a continuación:

Zona 1 – Depósitos Recientes Saturados: Se presenta como la zona más superficial hacia el costado oriental de la línea, ligeramente alargada y con un espesor no mayor a los 10 m, esta zona presenta valores de resistividad que varían desde los 0,7 ohm/m hasta los 8 ohm/m, litológicamente estos valores se asocian a zonas de depósitos recientes de origen aluvial con una matriz arenosa según evidencias aportadas en las observaciones de campo, con saturación de agua en superficie en algunos tramos y abundante presencia de agua a lo largo de la secuencia; presenta clastos ocasionales de diámetros variables.

Zona 2 – Rocas de la Formación Los Cuervos (Tplc): Esta zona se identifica infrayaciendo los depósitos recientes saturados identificados en la zona 1. Esta zona presenta los valores de resistividad con un intervalo entre los 0,7 ohm/m y los 80 ohm/m. Litológicamente estos valores de resistividad se asocian a rocas alteradas de la Formación Los Cuervos (Tplc) las cuales se presentan en el sector como una intercalación de lodolitas grises, carbonosas, micáceas con intercalaciones de niveles de arenitas. Estas rocas se pueden encontrar fracturadas generando porosidades secundarias que faciliten el movimiento de fluidos dentro de la secuencia.

Zona 3 – Zona de anomalía en valores de resistividad: Esta zona se ubica en la parte central de la sección transversal hacia la parte occidental abarcando desde superficie hasta una profundidad aproximada de 45 m, y corta abruptamente la continuidad de valores resistivos dentro de las zonas 1 y 2, generando así una anomalía de valores en esta franja. Presenta los valores de resistividad más altos dentro de la sección transversal ($>$ a los 80 ohm/m). Estos valores altos se relacionan o bien a arenitas de la Formación Los Cuervos y depósitos recientes con una posible influencia de hidrocarburo en superficie o depósitos antrópicos recientes de material de relleno de la mina de carbón. Adicionalmente estos valores altos de resistividad se pueden asociar en algunas franjas cerca de superficie a pérdidas de corriente producto de la presencia de obras civiles dentro del área de estudio.

Figura 27. Interpretación Línea 5

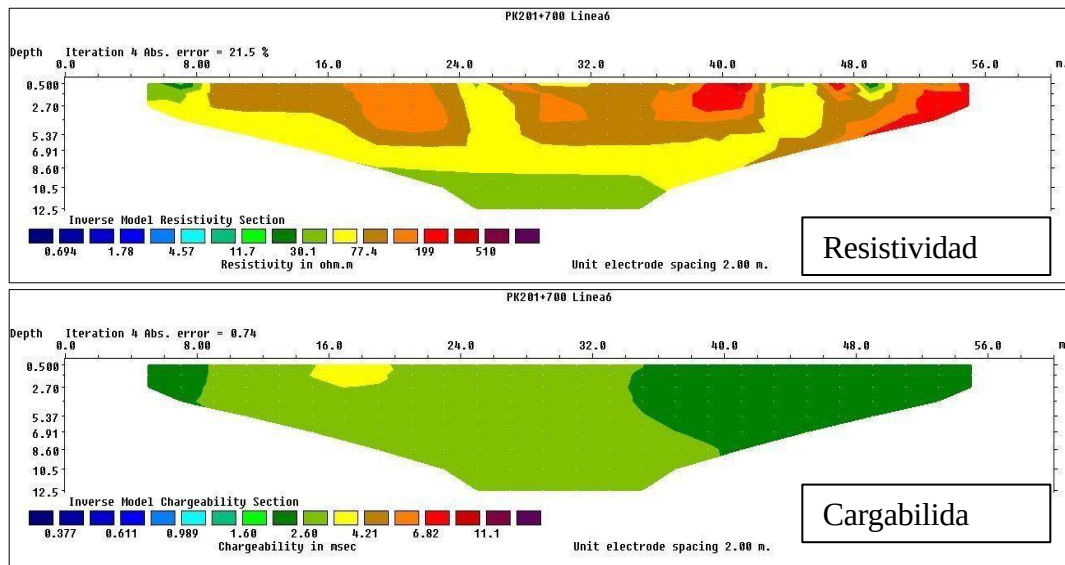


Nota. Fuente: Inversión obtenida con el software RES2DINV.

6.6. Línea 6 (perpendicular al drenaje)

A continuación, se presentan las secciones transversales de resistividad y cargabilidad (ver **Figura 28**) adquiridos de la tomografía de la línea 6.

Figura 28. Secciones transversales de Resistividad y cargabilidad de la tomografía 6 (NNW-SEE).



Nota. Fuente: Inversión obtenida con el software RES2DINV.

Figura 29. Fotografía de la línea 6 vista hacia el E.



Nota. Fuente: Autor

La **Línea – 6** fue adquirida con un rumbo NE-SW perpendicular a la anterior Línea 6 hacia la parte final de esta. Se evidencian tres (3) zonas, con propiedades diferentes en función de los valores de resistividad:

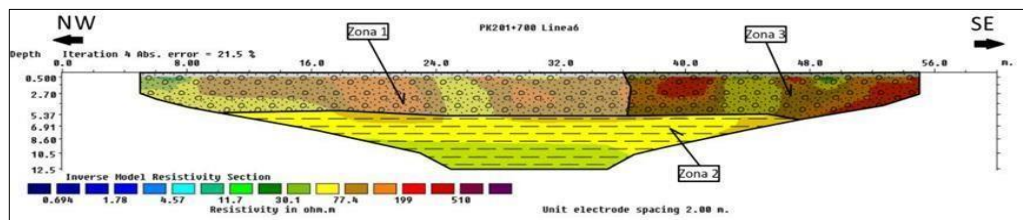
Zona 1 – Depósitos Recientes Saturados: Se presenta como la zona más superficial hacia el costado occidental de la línea, con un espesor no mayor a los 6 m, esta zona presenta valores de resistividad que varían desde los 5 ohm/m hasta los 200 ohm/m, litológicamente estos valores se asocian a zonas de depósitos recientes de origen aluvial con una matriz arenosa según evidencias aportadas en las observaciones de campo, clastos ocasionales de diámetros variables, y material de relleno asociado a la vía que atraviesa el sector. Los valores altos resistivos encontrados en este tramo se pueden relacionar con infraestructura sobre el área de trabajo que puede generar un efecto de pérdida de corriente.

Zona 2 – Rocas de la Formación Los Cuervos (Tplc): Esta zona se identifica infrayaciendo los depósitos recientes, esta zona presenta valores de resistividad con un intervalo entre los 10 ohm/m y los 100 ohm/m. Litológicamente estos valores de resistividad se asocian a rocas alteradas de la Formación Los Cuervos (Tplc) las cuales se presentan en el sector como una intercalación de lodolitas grises, carbonosas, micáceas con intercalaciones de niveles de arenitas.

Zona 3 – Zona de anomalía en valores de resistividad: Esta zona se ubica en la parte central de la sección transversal hacia la parte oriental abarcando desde superficie hasta una

profundidad aproximada de 6 m, y corta abruptamente la continuidad de valores resistivos dentro de la zona 1, generando así una anomalía de valores en esta franja. Presenta los valores de resistividad más altos dentro de la sección transversal ($>$ a los 100 ohm/m). Estos valores altos se relacionan a depósitos recientes con una posible alta influencia o acumulación de hidrocarburo dentro de algunas zonas en la secuencia; estos valores altos de resistividad se pueden asociar también en algunas franjas cerca de superficie a pérdidas de corriente producto de la presencia de obras civiles dentro del área de estudio tal como se identificó en la Zona 1.

Figura 30: Interpretación Línea 6

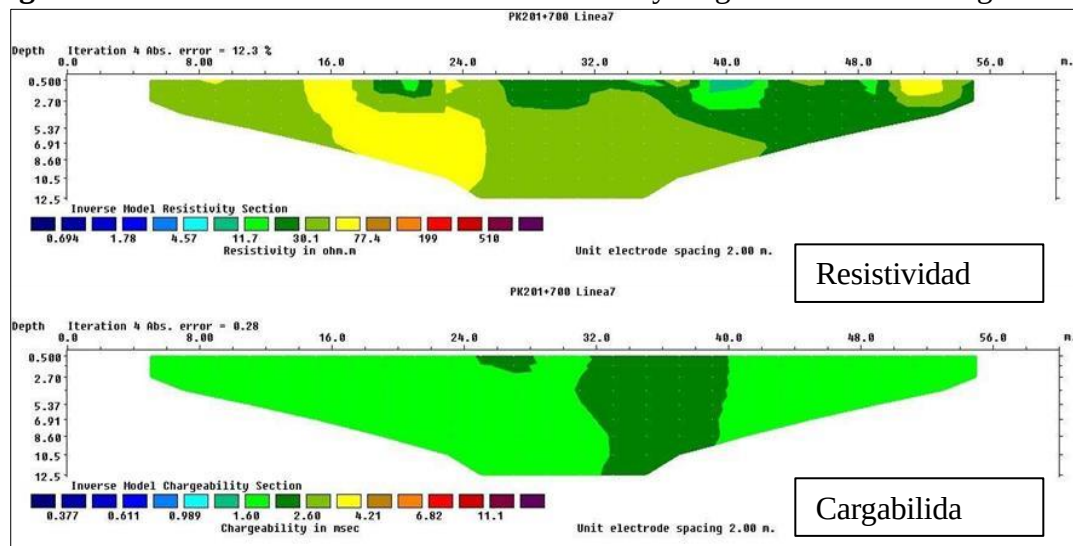


Nota. Fuente: Inversión obtenida con el software RES2DINV.

6.7. Línea 7 (perpendicular al drenaje)

A continuación, se presentan la sección transversal de resistividad y cargabilidad (ver **Figura 31**) adquiridos de la tomografía de la línea 7.

Figura 31. Secciones transversales de Resistividad y cargabilidad de la tomografía 7



Nota. Fuente: Inversión obtenida con el software RES2DINV.

Figura 32. Fotografía de línea 7 con vista hacia el E.



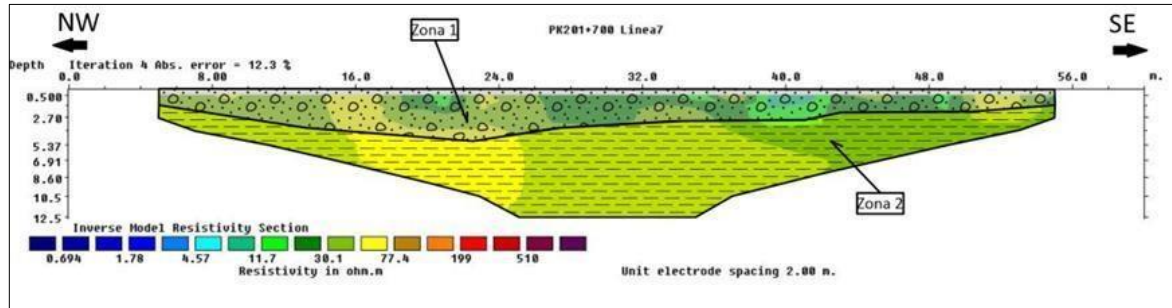
Nota. Fuente: Autor

La **Línea – 7** se realizó con un rumbo NE - SW. En función de los valores de resistividad hallados en el área se identificaron dos zonas, con valores diferenciables:

Zona 1 – Depósitos Recientes Saturados: Se presenta como la zona más superficial hacia el costado occidental de la línea, con un espesor no mayor a los 6 m, esta zona presenta valores de resistividad que varían desde los 5 ohm/m hasta los 80 ohm/m, litológicamente estos valores se asocian a zonas de depósitos recientes de origen aluvial con una matriz arenosa según evidencias aportadas en las observaciones de campo, clastos ocasionales de diámetros variables, y material de relleno asociado a la vía que atraviesa el sector. Adicionalmente los valores bajos de resistividad en esta zona se asocian a presencia de agua dentro de la secuencia

Zona 2 – Rocas de la Formación Los Cuervos (Tplc): Esta zona se identifica infrayaciendo los depósitos recientes, esta zona presenta valores de resistividad con un intervalo entre los 10 ohm/m y los 80 ohm/m. Litológicamente estos valores de resistividad se asocian a rocas alteradas de la Formación Los Cuervos (Tplc) las cuales se presentan en el sector como una intercalación de lodolitas grises, carbonosas, micáceas con intercalaciones de niveles de arenitas.

Figura 33. Interpretación Línea 7



Nota. Fuente: Inversión obtenida con el software RES2DINV.

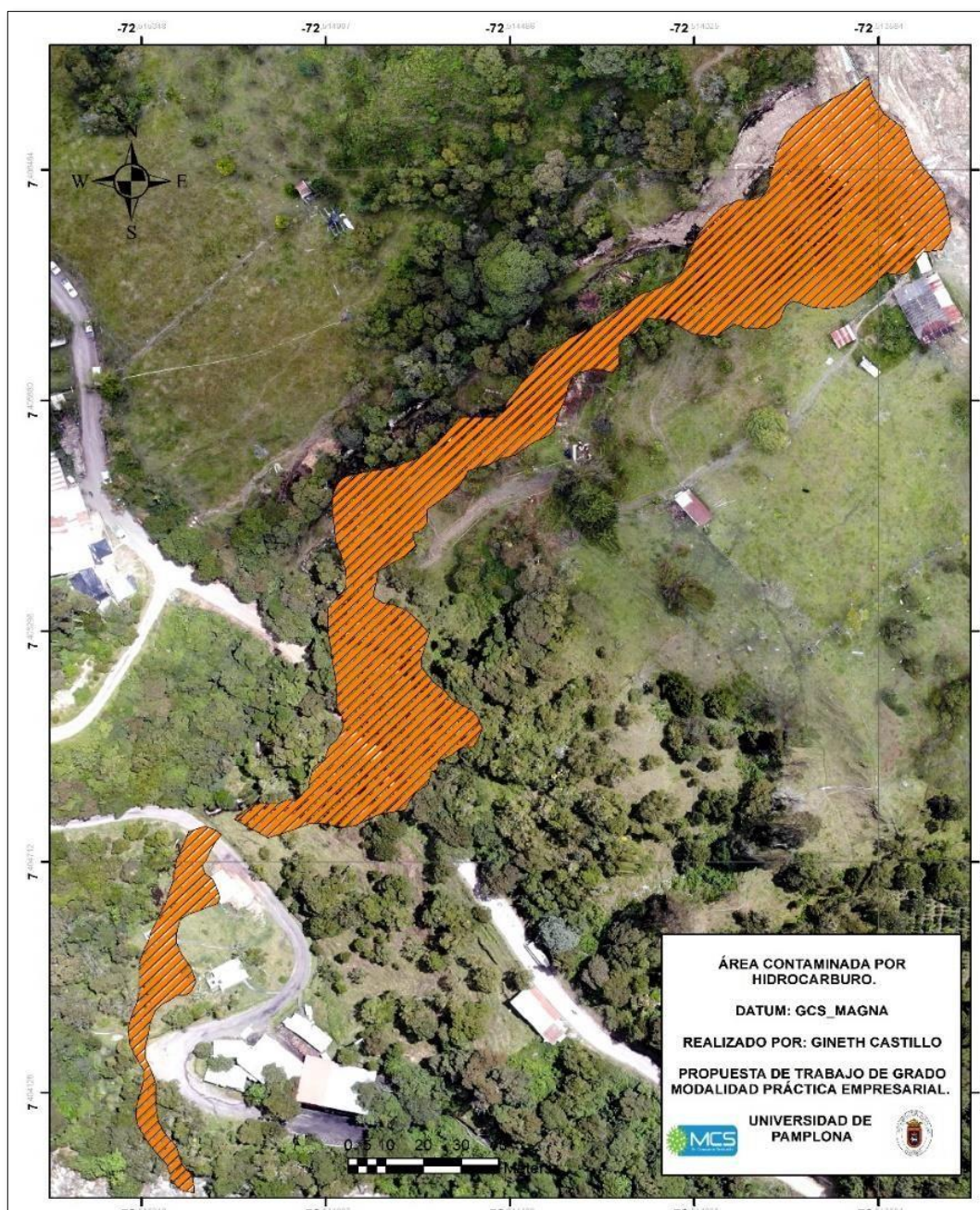
6.8. Delimitación zona contaminada

La delimitación de la zona contaminada se llevó a cabo mediante una estrategia integrada que combinó el análisis minucioso de las tomografías eléctricas en busca de posibles anomalías indicativas de la presencia de hidrocarburos y áreas de baja resistividad eléctrica, con la información proporcionada por las ortofotos obtenidas a través de un dron. Estas dos herramientas se complementaron de manera sinérgica, permitiendo un trazado inicial de la zona afectada con base en las ortofotos, el cual posteriormente fue validado y refinado mediante la corroboración de la información primaria de las tomografías eléctricas. Este enfoque integral garantizó una delimitación precisa y acorde con las condiciones reales del área contaminada, como se observa en la **Figura 34**.

La distribución de la pluma de contaminación en la zona, está influenciado por la diferencia de elevaciones y las características litológicas de la zona, el relieve del sitio contaminado es poco pronunciado pero suficiente para que el movimiento de la pluma de contaminación se vea favorecido para moverse de la zona norte cercano al punto de fuga con una elevación de 1968 msnm hacia las partes más bajas del sitio con elevaciones de 1834 msnm. El evento se presentó en una ladera por la que corre una quebrada, evidenciando que el producto llegó a un sector de la vía, posteriormente continuó por las cunetas de la vía hasta un drenaje que desciende, por lo cual el

remanente que se encuentra en superficie se termina desplazando favorecido por las aguas de escorrentía que drenan hasta llegar al río más próximo del área de estudio.

Figura 34. Zonificación de área contaminada



Nota. Fuente: Autor

7. Conclusiones y Recomendaciones

Las siete (7) secciones transversales analizadas presentan valores de resistividad desde los 0,7 hasta los 800 ohm/m aproximadamente. Estos valores se relacionan con la litología predominante en el sector, la cual se divide en dos unidades: la unidad más superficial se encuentra relacionada con depósitos coluviales recientes de espesor variable y predominantemente compuestos por una matriz arenosa con presencia de clastos ocasionales de diversos diámetros; en algunos sectores se puede identificar un dominio de clastos en proporción con la matriz. La unidad infrayacente se compone de lodolitas, ligeramente carbonosas con presencia de micas e intercalaciones de niveles menores de arenitas dentro de la secuencia. Estratigráficamente esta unidad se identifica como Formación Los Cuervos (Tplc).

Los valores de resistividad asociados a los depósitos recientes de origen coluvial varían desde los 0,7 hasta los 200 ohm/m, este rango de resistividades se asocia a la presencia de niveles arenosos conglomeráticos, con saturación variable de agua dentro de la secuencia. En algunas franjas se identificaron valores altos de resistividad que pueden estar asociados a la contaminación de hidrocarburo o fenómenos de pérdida de corriente relacionados con la presencia de metales (como varillas y alambres) de obras civiles existentes y adelantadas en el sector de estudio.

Los valores de resistividad asociados a las rocas de la Formación Los Cuervos (Tplc) se encuentran entre los 0,7 y los 80 ohm/m aproximadamente, este rango de resistividades se asocia principalmente al aspecto litológico de grano fino y la presencia de agua dentro de la secuencia.

Para el caso particular de la Línea – 7 se evidencia dentro de las secciones transversales interpretadas, que no hay influencia de contaminantes debido a que los valores se presentan dentro de los rangos normales asociados a las litologías presentes en el área.

Para las Líneas 1, 3, 4 y 5 se interpretan unas posibles tendencias de flujo de contaminantes hacia el subsuelo, estas zonas pueden estar relacionadas con la presencia de áreas de fractura o fallas dentro de la secuencia rocosa, generando un aumento la porosidad y como consecuencia un aumento de las posibilidades de flujo de contaminantes en estos tramos.

Este trabajo de grado proporciona a la empresa una herramienta para la gestión ambiental y la mitigación de impactos en el subsuelo, facilitando la obtención de información detallada sobre la distribución espacial de contaminantes en Norte de Santander y otras regiones del país afectadas por derrames de hidrocarburos. Además, sirvió como guía metodológica para optimizar recursos y esfuerzos al focalizar las áreas más afectadas.

Con respecto a las recomendaciones, inicialmente extender una invitación al Gobierno Nacional para que respalde la actividad científica en la región, asegurando la adquisición de los equipos esenciales requeridos para llevar a cabo estos estudios. Esto se vuelve crucial para abordar de manera inmediata contingencias, considerando la ausencia de dichos recursos en la zona.

Así mismo, se recomienda implementar una red de monitoreo en tiempo real en los oleoductos de la región, permitiendo una respuesta inmediata ante contingencias, para que de esta manera su pueda mitigar posibles daños mayores.

Por otro lado, realizar un estudio hidrogeológico en el área de estudio con el objetivo de evaluar la calidad del agua e identificar posibles niveles de contaminación en los cuerpos hídricos circundantes para así tener un monitoreo que permita realizar un seguimiento continuo.

Finalmente, realizar perforaciones las cuales proporcionan la oportunidad de obtener información detallada sobre las capas geológicas y la estructura del subsuelo en el área afectada, lo que puede ayudar a comprender mejor cómo se han propagado los contaminantes y cuál es su impacto potencial en el medio ambiente.

9. Referencias

- Griffiths, D., & Barker, R. (1993). Two-Dimensional Resistivity Imaging and Modeling in Areas of Complex Geology. *Journal of Applied Geophysics*. *Journal of Applied Geophysics* (Elsevier)-Vol. 29, Edición: 34, pp 211-226. doi: 10.1016/0926-9851(93)90005-J
- Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química [INGEOMINAS] (2001). Geología y química de la plancha 111 Toledo – Norte de Santander a escala 1:100 000, memoria explicativa. p. 9-31.
- Lastra, C. (2013). Determinación de una pluma contaminante por hidrocarburo mediante tomografía eléctrica en el municipio de texistepec, Veracruz. Universidad Nacional Autónoma De México. México D.F Informe escrito para obtener el título de: ingeniero geofísico. p.14-16.
- López, A. (2004). La Tomografía Geoelectrica Como Herramienta De Diagnóstico Ambiental Del Subsuelo. Instituto Geofísico Sismológico. Universidad Nacional de San Juan. Argentina. P. 5-6,7-9
- López, A. (2010). El método de polarización inducida aplicado a problemas de contaminación en la ciudad de México. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad De Ingeniería MÉXICO, D. F. p. 6-7,9-10,21-22,25.
- Osorio, N. (2020). Análisis de los costos de atención de las emergencias derivados de los atentados a la infraestructura petrolera: Oleoducto Caño Limón Coveñas. Bogotá, Colombia. Universidad de Los Andes. p.24-38
- Pacheco, A. (2015). Caracterización Geoelectrica de suelos contaminados por hidrocarburos. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla – México. p. 22

- Pérez, A., Garnica, P., Delgado V., Landaverde, N. (2010). Evaluación de la resistividad en campo y en laboratorio y su aplicación a pavimentos. Secretaría de comunicaciones y transportes Instituto mexicano del transporte. Publicación Técnica No. 325. Sanfandila - Qro. P. 13-15
- Reyes, R. (2011) Polarización inducida y resistividad eléctrica aplicados en la prospección minera. Universidad Nacional de ingeniería, Facultad de ingeniería física. Lima – Perú. 18-19 p.
- Royero, J. Clavijo, J. (2001). Memoria explicativa del Mapa Geológico generalizado departamento de Santander. INGEOMINAS
<https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010040002295/documento/pdf/0101022951101000.pdf>
- Servicio Geológico Colombiano [SGC] (2014). Memoria Explicativa Del Mapa Geomorfológico Aplicado A Movimientos En Masa Escala 1:100.000 Plancha 111 – Toledo, Departamento De Norte De Santander. Bucaramanga – Colombia. P. 45-48
- Van Der Hammen, T., (1960). Estratigrafía del terciario y maestrichtiano continentales y tectonogénesis de los Andes Colombianos. Inventario Geológico Nacional. Boletín Geológico 6 (1-3). P.25
- Vargas, E. (2015). Tomografía eléctrica aplicada a caracterizar la cantera La Joya ubicada en el municipio de Ixtacuixtla, Tlaxcala. Benemérita Universidad Autónoma De Puebla – Puebla. P. 14-16-20
- Zúñiga, R. (2012). Detección de zonas de riesgo en la Ciudad de Guatemala. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. P.16.

Anexos

Se presentan todos los productos obtenidos de la Caracterización geofísica a través de tomografías eléctricas 2D para el municipio de Toledo – Norte de Santander, Colombia.

Anexo A. Secciones trasnversales de resistividad y cargabilidad de las 7 líneas adquiridos de la tomografía.

Anexo B. Video del área de estudio

Anexo C. Fotografías tomadas en la etapa de campo.

Anexo D. Mapa de ubicación de líneas de las tomografías eléctricas.

Anexo E. Mapa de la delimitación zona contaminada