

IDENTIFICACIÓN DE CANALES DE TUBIFICACIÓN POR MEDIO DE
TOMOGRFÍA ELÉCTRICA Y SU RELACIÓN CON EL HUNDIMIENTO
SUPERFICIAL EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE CONCORDIA
ANTIOQUIA

Juanita González Londoño

Juan Camilo López González



Departamento de Ciencias de la Tierra

Universidad EAFIT

Medellín

Noviembre de 2019

IDENTIFICACIÓN DE CANALES DE TUBIFICACIÓN POR MEDIO DE
TOMOGRFÁA ELÉCTRICA Y SU RELACIÓN CON EL HUNDIMIENTO
SUPERFICIAL EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE CONCORDIA
ANTIOQUIA

Juanita González Londoño

Juan Camilo López González

Proyecto de grado con el fin de cumplir los requisitos parciales para optar al
grado de Geólogo

Asesor:

Marco Fidel Gamboa Ramírez



Departamento de Ciencias de la Tierra

Universidad EAFIT

Medellín

Noviembre de 2019

Notas de aceptación

Presidefnte del jurado

Jurado

Jurado

Medellín 2019

Agradecimientos

Gratitud por esta labor hecha con empeño, responsabilidad y profesionalismo, conocimiento y reconocimiento que se dirigen hacia nuestro profesor y asesor del proyecto de grado Marco Fidel Gamboa Ramírez, quien nos ha dedicado su tiempo y quien ha estado ahí para corregirnos y dirigirnos en este proceso.

A nuestras familias por apoyarnos siempre y estar presentes en todos nuestros logros.

A Juan Felipe Pascke por su gran paciencia y disposición para orientarnos en este proyecto.

Extendiendo nuestra gratitud a nuestros amigos por habernos acompañado y ayudado cuando lo requerimos, especialmente a Santiago Muñoz, Sebastián Kilby y Karina Martínez.

Finalmente, gracias todos aquellos que de una manera indirecta o directamente nos han aportado para llevar a cabo nuestro proyecto de grado.

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 10 |
| 2 | ANTECEDENTES | 11 |
| 3 | OBJETIVOS | 12 |
| 3.1 | OBJETIVO GENERAL | 12 |
| 3.1.1 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 12 |
| 4 | PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN | 13 |
| 5 | HIPÓTESIS | 13 |
| 6 | GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO | 14 |
| 6.1 | LOCALIZACIÓN..... | 14 |
| 6.2 | COBERTURA..... | 15 |
| 6.3 | GEOLOGÍA REGIONAL..... | 16 |
| 6.4 | GEOLOGÍA ESTRUCTURAL..... | 19 |
| 6.5 | GEOMORFOLOGÍA REGIONAL..... | 20 |
| 7 | MARCO TEÓRICO | 23 |
| 7.1 | GEOELÉCTRICA..... | 23 |
| 7.2 | PROCESO DE TUBIFICACIÓN:..... | 24 |
| 8 | METODOLOGÍA | 27 |
| 8.1 | CONSULTA DE INFORMACIÓN SECUNDARIA | 27 |
| 8.2 | PRE-CAMPO | 28 |
| 8.2.1 | Etapa 1 | 28 |
| 8.2.2 | Etapa 2 | 28 |
| 8.3 | CAMPO | 28 |
| 8.3.1 | Etapa 1 | 28 |
| 8.3.2 | Etapa 2 | 29 |
| 8.4 | POST-CAMPO..... | 32 |
| 9 | COMPONENTE GEOMORFOLÓGICO Y GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO | 40 |
| 9.1 | GEOLOGÍA LOCAL | 40 |
| 9.1.1 | Suelos de la Formación Barroso (Kvb): | 40 |
| 9.1.2 | Depósitos de vertiente (Qf)..... | 41 |
| 9.2 | GEOMORFOLOGÍA LOCAL | 47 |
| 10 | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 58 |
| 10.1 | TER-2-SCH | 59 |
| 10.2 | TER-3-WEN..... | 61 |
| 10.3 | TER-8-WEN..... | 64 |
| 10.4 | TER-9-WEN..... | 66 |

| | | |
|-------------|----------------------------------|-----------|
| 10.5 | TER-11-WEN | 68 |
| 10.6 | TER-12-WEN | 71 |
| 10.7 | TER-13-SCH | 73 |
| 10.8 | TER-16-WEN | 77 |
| 11 | <i>DISCUSIÓN</i> | 80 |
| 12 | <i>CONCLUSIONES</i> | 88 |
| 13 | <i>BIBLIOGRAFÍA</i> | 90 |

TABLA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Mapa de localización..... | 14 |
| Figura 2. Mapa de cobertura..... | 15 |
| Figura 3. Mapa geológico regional del municipio de Concordia. Modificado de Geología de la plancha 146 – Medellín Occidental (Ingeominas, 1983) y Geología de la plancha 166 – Jericó Ingeominas, 1980). Tomado del EOT | 18 |
| Figura 4. Mapa geomorfológico regional de la zona de estudio. (EOT et al., 2017) | 21 |
| Figura 5. Esquema básico de los métodos de resistividad. Tomada de Ontiveros, 2003. | 23 |
| Figura 6. Localización de las tomografías..... | 30 |
| Figura 7. Resistivímetro 4Point Ligth 10W..... | 31 |
| Figura 8. perfil de ruido en los datos medidos. Tomado del software Res2DInv. | 34 |
| Figura 9. Modelo de sensibilidad de bloques de la TER12WEN en el software Res2DInv..... | 38 |
| Figura 10. Modelo de sensibilidad subsuperficial de la TER12WEN en el software Res2DInv..... | 38 |
| Figura 11. Suelos de la formación Barroso. | 41 |
| Figura 12. Flujo de lodos y escombros..... | 42 |
| Figura 13. Flujo de escombros. | 43 |
| Figura 14 Flujo de escombros | 43 |
| Figura 15. Flujos de escombros y lodos | 44 |
| Figura 16. Flujo de lodos con presencia de bloques..... | 44 |
| Figura 17. Mapa de geología del area urbana de Concordia Antioquia | 46 |
| Figura 18 Mapa de geomorfología del área urbana de Concordia Antioquia. | 57 |
| Figura 19. ubicación de las tomografías..... | 58 |
| Figura 19. Perfiles de resistividades aparentes (A) resistividad aparente medida (B) resistividad aparente calculada. Tomada del software Res2DInv a partir de los resultados obtenidos..... | 59 |
| Figura 20. Resultados de la inversión para la TER2SCH. Tomada del software Res2DInv | 60 |
| Figura 21. Interpretación de la tomografía TER2SCH..... | 61 |
| Figura 22. perfiles de resistividades aparentes (A) resistividad aparente medida (B) resistividad aparente calculada. Tomada del software Res2DInv a partir de los resultados obtenidos..... | 62 |
| Figura 23. Resultados de la inversión para la TER3WEN. Tomada del software Res2DInv | 62 |
| Figura 24. Interpretación de la tomografía TER3WEN | 63 |
| Figura 25. perfiles de resistividades aparentes (A) resistividad aparente medida (B) resistividad aparente calculada. Tomada del software Res2DInv a partir de los resultados obtenidos..... | 64 |
| Figura 26. Resultados de la inversión para la TER8WEN. Tomada del software Res2DInv | 65 |
| Figura 27. Interpretación de la tomografíaTER8-WEN | 65 |
| Figura 28. perfiles de resistividades aparentes (A) resistividad aparente medida (B) resistividad aparente calculada. Tomada del software Res2DInv a partir de los resultados obtenidos..... | 66 |
| Figura 29. Resultados de la inversión para la TER9WEN. Tomada del software Res2DInv. | 67 |
| Figura 30. Interpretación de la tomografía TER9WEN | 68 |

| | |
|--|----|
| Figura 31. perfiles de resistividades aparentes (A) resistividad aparente medida (B) resistividad aparente calculada. Tomada del software Res2DInv a partir de los resultados obtenidos..... | 69 |
| Figura 32. Resultados de la inversión para la TER11WEN. Tomada del software Res2DInv | 69 |
| Figura 33. Interpretación de la tomografía TER11WEN. | 70 |
| Figura 34. Perfiles de resistividades aparentes (A) resistividad aparente medida (B) resistividad aparente calculada. Tomada del software Res2DInv a partir de los resultados obtenidos..... | 71 |
| Figura 35. Resultados de la inversión para la TER12WEN. Tomada del software Res2DInv | 72 |
| Figura 36. Interpretación de la tomografía TER12WEN | 73 |
| Figura 37. Perfiles de resistividades aparentes (A) resistividad aparente medida (B) resistividad aparente calculada. Tomada del software Res2DInv a partir de los resultados obtenidos..... | 74 |
| Figura 38. Resultados de la inversión para la TER13SCH. Tomada del software Res2DInv | 75 |
| Figura 39. Interpretación de la tomografía TER13SCH..... | 76 |
| Figura 40. Perfiles de resistividades aparentes (A) resistividad aparente medida (B) resistividad aparente calculada. Tomada del software Res2DInv a partir de los resultados obtenidos..... | 77 |
| Figura 41. Resultados de la inversión para la TER16WEN. Tomada del software Res2DInv | 78 |
| Figura 42. Interpretación de la tomografía TER16WEN | 79 |
| Figura 43. Hundimientos superficiales alargados, estos conservan la forma de un canal.... | 81 |
| Figura 44. En el mapa estan representados 4 hundimientos circulares. La imagen superior muestra el escalonamiento causado por el primer hundimeinto. La imagen inferior representa una perspectiva donde se evidencia el hundimiento del terreno. | 82 |
| Figura 45. Tomografía 3, realizada perpendicular a los hundimientos alargados. Presenta caidas en los valores de resistividad bajo los hundimientos superficiales. | 83 |
| Figura 46. Canal de tubificación colapsado. Este genera una grieta en la superficie del terreno y hundimientos inferiores. | 84 |
| Figura 47: Escalonamiento a través del canal colapsado por tubificación. | 85 |
| Figura 48a: Canal de tubificación colapsado, se evidencia el hundimiento respecto al terreno circundante. Figura 2b: agrietamiento y costados del canal escalonados..... | 85 |
| Figura 49: tomografía número 11, al igual que la tomografía número 3 exhibe caidas en los valores de resistividad justo en las depresiones del terreno (vease ilustración 4). | 86 |

TABLA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Correlación de las unidades geomorfológicas con las macrounidades definidas por Corantioquia, 2002. Tomado y modificado del Estudio Básico de Amenazas para el EOT de Concordia..... | 22 |
| Tabla 2. Lista y descripción de tomografías..... | 32 |
| Tabla 3. Descripción geomorfológica: laderas. | 48 |
| Tabla 4. Descripción geomorfológica: lomos..... | 53 |
| Tabla 5. Descripción geomorfológica: Superficies de depósito. | 54 |
| Tabla 6. Descripción geomorfológica: Topes..... | 56 |
| Tabla 7. Descripción geomorfológica: Intervenciones antrópicas. | 56 |

1 INTRODUCCIÓN

La erosión se refiere a la denudación y transporte de material por procesos físicos dados por la acción de agentes como el agua, el viento, el hielo, entre otros. Los procesos erosivos pueden ser superficiales o subsuperficiales y están íntimamente ligados a la transformación química y/o física de los materiales por meteorización.

La actividad humana se ha convertido en un factor directamente relacionado con la aceleración de procesos erosivos. Alrededor de las ciudades, la constante expansión urbana conduce a la deforestación de bosques y la consecuente la destrucción de la cobertura vegetal e impermeabilización de los suelos.

Las subsecuentes crecientes tasas erosivas en los límites de los centros urbanos pueden impactar negativamente la infraestructura de las ciudades. Entre los procesos erosivos que pueden afectar las ciudades, se encuentra la tubificación, la cual se refiere a un tipo de erosión físico/química de carácter subsuperficial, la cual crea canales internos en los suelos y es visiblemente identificada únicamente tras el colapso de las estructuras.

El municipio de Concordia (Antioquia) se encuentra mayormente localizado sobre una serie de depósitos de vertiente relacionados a la erosión de rocas máficas. La expansión urbana de este poblado del suroeste Antioqueño ha llevado a diversos cambios en el uso del suelo y por ende a la posible aparición de procesos erosivos como podría ser la tubificación.

Debido a la crítica afectación que puede generar la tubificación en la infraestructura, es útil una previa identificación de este fenómeno por métodos indirectos, para así mitigar las posibles afectaciones generadas por este proceso erosivo y así mismo considerarlo como un factor determinante a la hora de la construcción de nuevas obras alrededor de una localidad.

El siguiente trabajo presenta una caracterización de los procesos de tubificación en la parte norte del área urbana del Municipio de Concordia a través de la utilización de tomografías eléctricas. Nuestros datos pretenden proporcionar al municipio el conocimiento y caracterización del fenómeno y así prevenir y realizar una acertada planeación del uso del suelo.

2 ANTECEDENTES

De acuerdo con Herrera Arango, J. y Toro Quijano M.I. (1999) la mayor parte de la zona urbana del municipio de Concordia, Antioquia está sobre un flujo de escombros constituido por bloques de tamaño centimétrico a métricos dentro de una matriz arcillo-arenosa.

Este tipo de suelo, sumado al crecimiento desordenado ha generado un gran número de procesos erosivos superficiales y subsuperficiales antiguos y recientes.

La mayoría de estos procesos superficiales consisten en deslizamientos rotacionales de magnitud variable que frecuentemente están asociados a los drenajes.

Los procesos de erosión subsuperficial generada por las aguas que se infiltran y lavan el material fino o matriz del depósito, producen canales subterráneos que pueden colapsarse y generar asentamientos diferenciales del terreno, como hundimientos. Este proceso, conocido como tubificación, ha sido identificado en la parte alta del municipio en estados avanzados y además en el barrio Restrepo se realizó un apique de 1.9 m de profundidad y 1.5 m de lado que permitió observar el proceso de tubificación en estado crítico, puesto que se han desarrollado oquedades superiores a los 40 cm de ancho y al metro de profundidad; esto no sólo se origina por la infiltración del agua de escorrentía en la parte alta de la cabecera municipal sino también por la mala condición de la infraestructura vial, la cual presenta un alto nivel de agrietamiento, favoreciendo así la infiltración de las aguas. A su vez, los nacimientos de agua han sido cubiertos indiscriminadamente durante el proceso de urbanización y por las fugas de las tuberías de acueducto y alcantarillado. (Herrera Arango y Toro Quijano, 1999).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar canales de tubificación por medio de tomografía eléctrica y su relación con el hundimiento superficial en el área urbana del municipio de concordia Antioquia.

3.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Analizar la geología y geomorfología existente en la zona.
- b. Identificar las expresiones en superficie existentes asociadas a la tubificación en la zona de estudio.
- c. Elaborar mapas preliminares de pendientes y cobertura del suelo.
- d. Describir la geológica y geomorfología local.
- e. Plantear 16 tomografías de resistividad eléctricas en la zona de estudio.
- f. Analizar 16 tomografías de resistividad eléctricas realizadas en la zona de estudio.
- g. Integrar el método de tomografía geoelectrica a la identificación de procesos de erosión interna del suelo y como es la relación de estos con las geoformas superficiales asociadas a tubificación.
- h. Determinar y cuantificar que tipo de expresiones superficiales se asocian a los procesos de tubificación en el área de estudio.
- i. Presentación de mapas temáticos que muestren la relación entre las expresiones en superficie de la tubificación y las tomografías eléctricas.
- j. Entregar de informe con la integración y los análisis de los datos obtenidos.

4 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Qué causa los hundimientos que se presentan en el área urbana de municipio de Concordia Antioquia?

5 HIPÓTESIS

Los hundimientos en el área urbana del municipio de Concordia, Antioquia son producto del colapso del terreno causados por procesos de tubificación.

6 GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO

6.1 LOCALIZACIÓN

El proyecto se realizó en el municipio de Concordia, Antioquia. El cual se encuentra ubicado en la subregión del suroeste antioqueño a 95 km de la ciudad de Medellín. Su extensión total es de 234 km^2 y cuenta con una temperatura promedio de 19° centígrados. Sus límites están definidos por el norte con el municipio de Betulia, al oriente con Armenia, Titiribí y Salgar, en el sur limita con los municipios de Salgar y Venecia y por último al occidente con Salgar (Figura 1) (Alcaldía de Concordia, 2019).

La cabecera municipal donde se enmarca el estudio está a una altura promedio de 2.000 metros sobre el nivel del mar y está ubicada en la vertiente oriental de la Cordillera Occidental, entre las latitudes $6^\circ 02' 17''$ N y $6^\circ 02' 59''$ N y las longitudes $75^\circ 54' 08''$ W y $75^\circ 54' 30''$ W. A su vez hace parte de la cuenca de la quebrada Magallo, la cual es afluente del Rio Cauca.

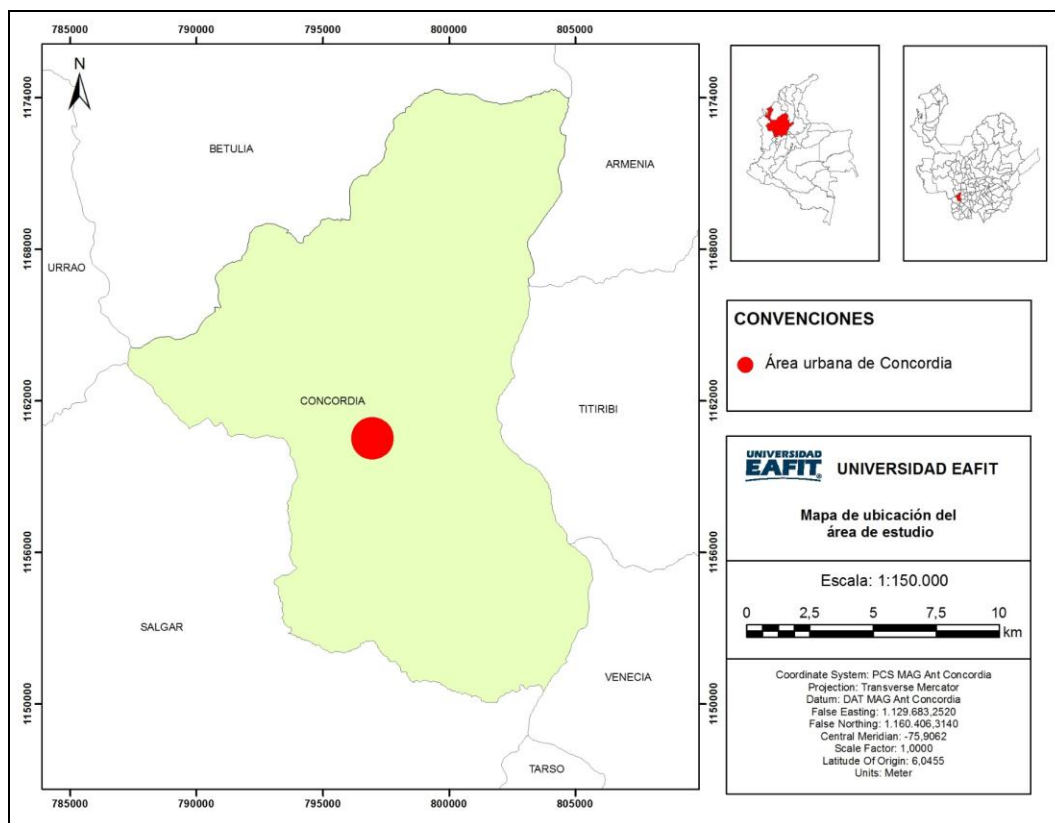


Figura 1. Mapa de localización

6.2 COBERTURA

La cobertura de la tierra es un resultado de la interacción de la dinámica natural geológica, geomorfológica, los suelos, el clima y sistemas de comunidades bióticas, interrumpida por el hombre para su supervivencia y desarrollo. (SGC, 2013)

La cobertura de los suelos en la zona de estudio está dominada por pastos, árboles, matorrales y construcciones civiles. La información utilizada para realizar este mapa (Figura 2) fue tomada de la geodatabase, del IGAC, 2012 con algunos ajustes realizados en campo.

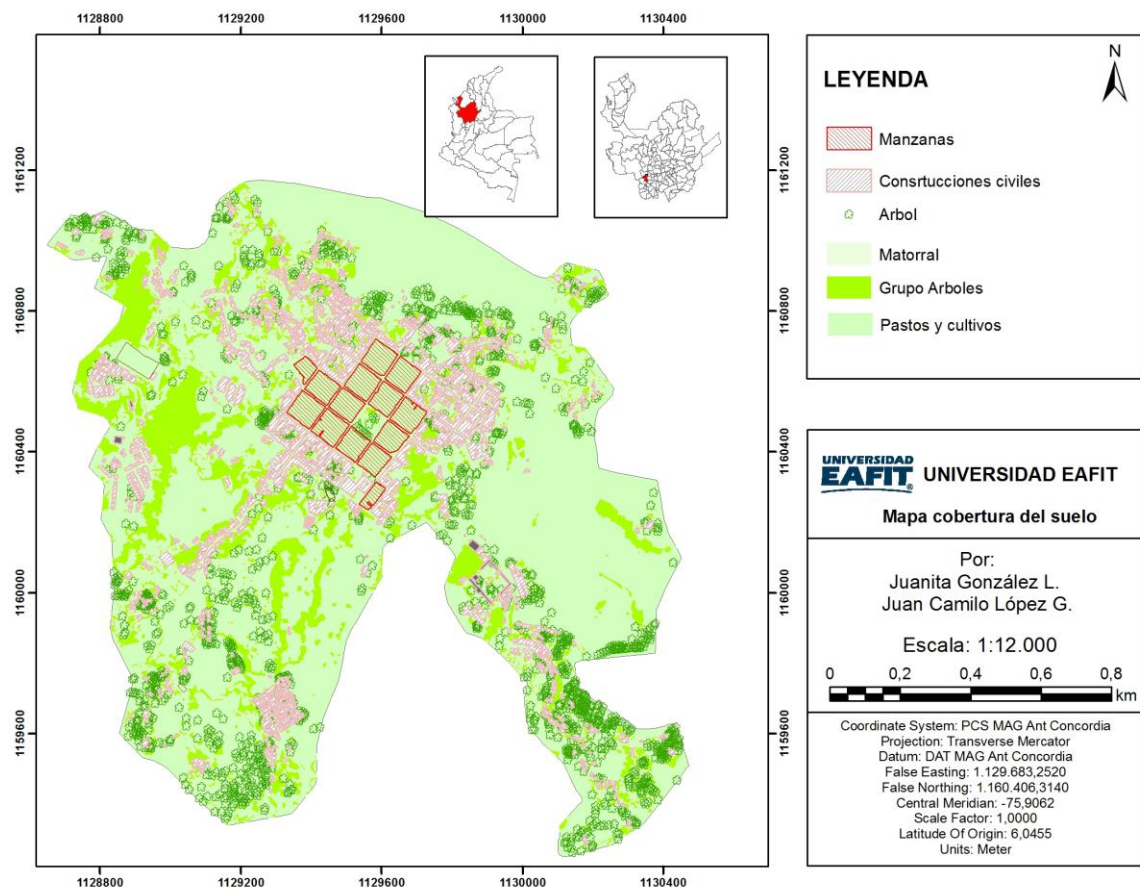


Figura 2. Mapa de cobertura.

6.3 GEOLOGÍA REGIONAL

La geología del noroccidente de los Andes tiene su evolución ligada a la interacción de las Placas Caribe, Nazca-Farallón y suramericana (Taboada et al., 2000). La actual configuración geológica de esta región se caracteriza por eventos ocurridos principalmente en el Cenozoico (Piedrahita et al., 2017). La acreción de terrenos alóctonos favoreció un régimen compresional que dio paso a la orogenia Andina y a la subsecuente aparición de depósitos sedimentarios, que se encuentran contralados por fallas N-S ligadas al sistema de fallas Cauca-Romeral (Restrepo y Moreno et al., 2009).

La Cordillera Occidental de Colombia está constituida por rocas de origen oceánico, cuya génesis está ligada a la colisión Cretácica de la Placa Caribe contra la parte noroccidental de la Placa Suramericana (Echeverri et al., 2015). Estas rocas han sido denominadas Formación Barroso y Formación Penderisco, las cuales abarcan principalmente cherts, basaltos y lavas (González et al., 2001).

En el flanco oriental de la Cordillera Occidental se encuentra el municipio de Concordia. Allí afloran rocas desde el Cretácico Superior hasta el cuaternario en franjas de dirección N-S, relacionadas con las fallas Sabanalarga, Remolino, Cauca y Mistrató (Calle y González, 1980; González et al., 2001). Estas fallas se asocian al denominado sistema de fallas Cauca-Romeral. Las principales unidades presentes en el municipio de Concordia son: (1) la Formación Penderisco – Miembro Urrao (Ksaau), la cual se encuentra distribuida en la margen occidental a lo largo de todo el municipio, en sentido N-S, en contacto con las rocas de (2) la Formación Barroso (Ksvb), que conforman una franja en la parte central de la zona de estudio, en la margen oriental, en los límites con el río Cauca, se encuentran las rocas de (3) la Formación Combia – Miembro Volcánico (Tvc), que suprayacen las rocas de la Formación Barroso (Ksvb) y hacia el este del municipio, se encuentran Depósitos Cuaternarios (Ql) asociados a la dinámica del río Cauca (Gamboa et al., 2017 (*Figura 3*)). A continuación, se hace una descripción específica de estas unidades geológicas.

Formación Barroso (Kvb): La formación Barroso es denominada por Álvarez y González (1978), quienes la denominaron así a través del río Barroso. La secuencia volcánica está constituida por basaltos y diabasas, que son de color verde manzana, afaníticas, con numerosas vesículas y microvenas de calcita y localmente epidota, con un diaclasamiento

más o menos constante en tres direcciones y el desarrollo de diferentes estructuras (Calle y González, 1980),

Formación Penderisco (Kaa): Secuencia sedimentaria de materiales arcillosos, arenosos y silíceos como limolitas, lutitas, lito-arenitas y chert. Hacia la base de la secuencia se encuentran estratos de chert de espesores aproximados entre 50 a 80 m. Predominando en la litología limolitas, lodolitas y grauvacas en la parte Este, mientras que a medida que avanza hacia el Oeste las rocas son más arcillosas y fisibles. (Álvarez y González, 1978)

Formación Combia (Tvc): Constituida principalmente por dos miembros, uno volcánico y otro sedimentario. En el nivel inferior se encuentran estratos sedimentarios, compuestos principalmente por conglomerados, areniscas, limolitas (Calle y González, 1980). El miembro volcánico consiste principalmente por derrames basálticos y lavas de composición intermedia (González, 2001).

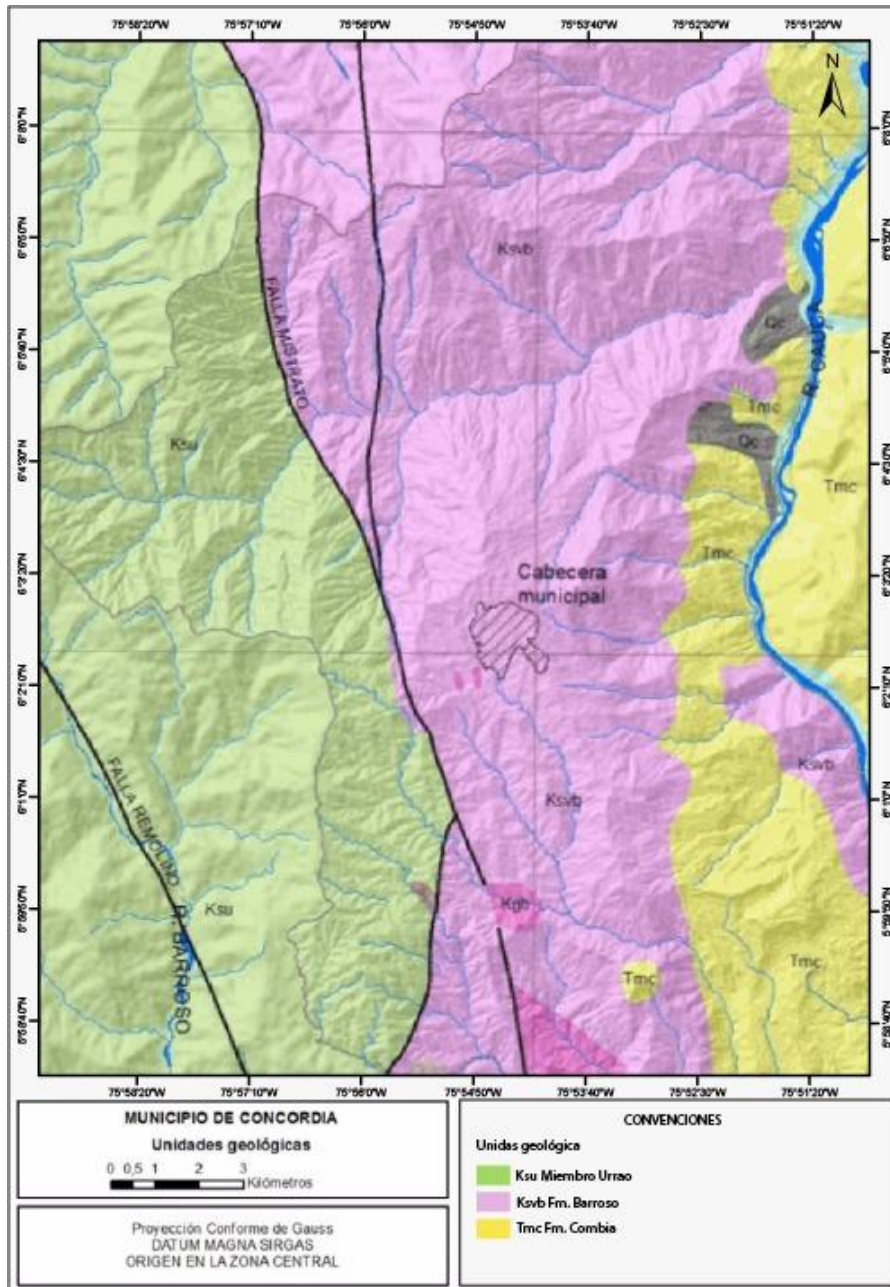


Figura 3. Mapa geológico regional del municipio de Concordia. Modificado de Geología de la plancha). Modificado del EOT Concordia Antioquia., 2017.

6.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El norte de la Cordillera Occidental de Colombia es un área de alta influencia tectónica debido a que está delimitada por la convergencia de las placas Nazca y Caribe por debajo de la placa Suramérica. Debido a esto el área de estudio se encuentra altamente influenciada por el trazo de varias fallas geológicas, como lo es el sistema Cauca-Romeral, con una dirección NNE-SSW la cual concuerda con las direcciones de los principales trenes de fallas de Colombia. El sistema de fallas Cauca-Romeral evidencia la posible génesis de la Cordillera Occidental, ligada a un proceso de acreciones desde el cretácico mostrando una serie de estructuras metamórficas de bajo grado como pliegues de tipo recumbente en las unidades sedimentarias de la formación Penderisco (INGEOMINAS, 1980).

Ligadas a este tren de fallas principal se encuentran fallas menores las cuales están presentes en el municipio, estas presentan direcciones similares al sistema Cauca-Romeral las cuales son SW-NE, SE-NW y S-N y se pueden evidenciar en diferentes rasgos geomorfológicos, cambios litológicos, zonas de brecha y milonitización (Gamboa et al., 2017).

6.5 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

Según el mapa geomorfológico, de amenazas y de áreas degradadas de la jurisdicción de Corantioquia, el municipio de Concordia desde un punto de vista geomorfológico está ubicado dentro de la clasificación de cañones (C) y más específicamente en la unidad del cañón del río Cauca – San Juan (C1) (Corantioquia et al., 2002). A nivel regional los cañones se pueden definir como valles con encajonamientos significativos que se forman por cambios en el nivel base de la erosión, reflejando un aumento de la incisión vertical. El cañón del río Cauca – San Juan está limitado al sur por el departamento de Caldas y al norte por los municipios de Sabanalarga y Toledo. A la altura del municipio de Concordia, este cañón delimita el límite entre la vertiente occidental de la Cordillera Central y la vertiente oriental de la Cordillera Occidental, una zona estructuralmente compleja, definida como una antigua zona de subducción, lo cual se evidencia por medio de rocas de afinidad continental que afloran en la Cordillera Central y rocas de afinidad oceánica que afloran en la Cordillera Occidental.

Desde el punto de vista regional, el municipio agrupa macrounidades con un dominio erosivo y se clasifican en vertientes altas, medias y bajas según su posición dentro del cañón, tomando como referencia la ubicación con respecto al margen del río (*Figura 4*). El municipio al estar ubicado sobre la vertiente oriental de la Cordillera Occidental concuerda con las macrounidades denominadas como vertientes de la margen oeste (Corantioquia et al., 2002).

En el estudio básico de amenazas realizado EOT vigente del municipio se definen una serie de unidades geomorfológicas ubicadas en su jurisdicción, las cuales hacen parte de cada una de las macrounidades presentes. Partiendo desde el oeste del municipio se encuentra la macrounidad que corresponde a vertientes altas de la margen oeste. En la zona media del municipio está presente la macrounidad de vertientes medias del margen oeste y por último al este del municipio y por ende la zona más cercana al fondo del cañón, se encuentran las vertientes bajas del margen oeste (Gamboa et al., 2017). En la

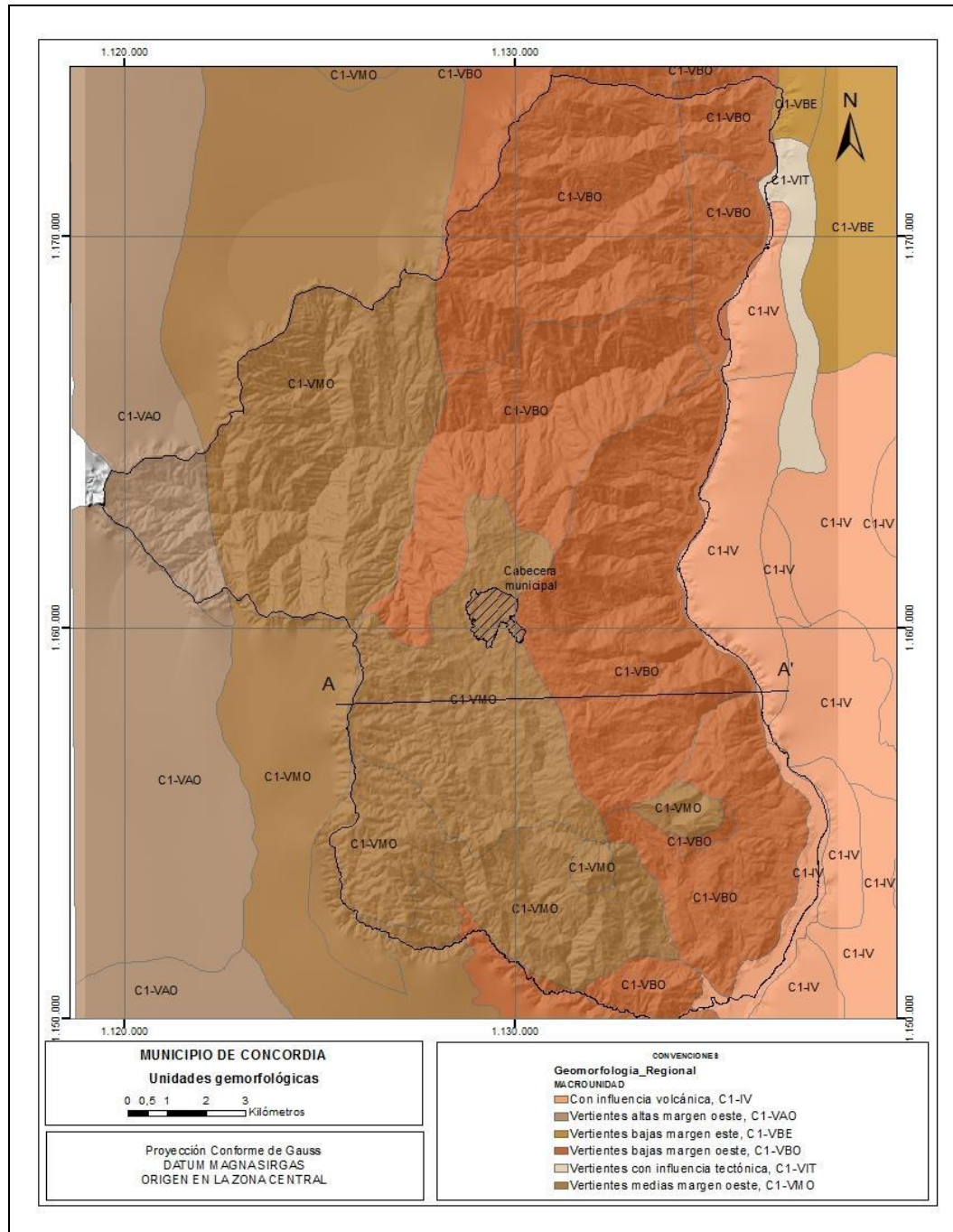


Figura 4. Mapa geomorfológico regional de la zona de estudio. (EOT Concordia Antioquia., 2017)

Tabla 1. Correlación de las unidades geomorfológicas con las macrounidades definidas por Corantioquia, 2002. Tomado y modificado del Estudio Básico de Amenazas para el EOT de Concordia.

| Macrounidad (Corantioquia et al., 2002) | Unidad geomorfológica |
|--|--|
| Vertientes Altas del Margen Oeste | Filos con flancos cortos |
| | Filos de topes subredondeados estrechos |
| | Filos de topes agudos en dirección norte-sur |
| Vertientes Medias del Margen Oeste | Filos de topes planos |
| | Vertiente de baja incisión |
| | Filos de topes subredondeados amplios |
| | Cerro remanente estructural de tope plano |
| | Filos con flancos muy largos |
| | Filos de topes subredondeados estrechos |
| | Cerro de tope subredondeado |
| | Filos con flancos de media inclinación |
| Vertientes Bajas del Margen Oeste | Vertientes de baja incisión |
| | Filos con flancos de fuerte inclinación |
| | Filos de topes subredondeados amplios |
| | Escarpes cortos |
| | Vertientes largas con alta inclinación |
| | Filos con flancos planos y cortos |
| | Vertientes estructurales |
| | Vertientes de baja incisión |

7 MARCO TEÓRICO

7.1 GEOELÉCTRICA

Las técnicas de resistividad geofísica se basan en la respuesta de los diferentes materiales al flujo de corriente eléctrica que pasa por ellos. Consisten en introducir al terreno, un campo eléctrico de corriente continua mediante dos electrodos de corriente (A, B) y dos electrodos (M, N) que miden la diferencia de potencial eléctrica ΔV (Figura 5); parámetro con el cual es posible determinar la resistividad de los materiales del subsuelo a diferentes profundidades (Ontiveros, 2003). La interpretación de dichas mediciones, teniendo en cuenta los cambios de resistividades y anomalías observadas, permite realizar modelos de las características del subsuelo y de su distribución espacial (Arias, 2011).

En los materiales del subsuelo, la resistividad puede variar dentro de amplios límites (entre $1-10^8$ ohm-m) debido a que la conductividad eléctrica y la resistividad, tienen dos componentes: la conductividad electrónica, debida al movimiento de electrones en la masa del material, y la conductividad electrolítica, debida al movimiento de iones en los fluidos que llenan los intersticios del material. Esta última puede predominar, de modo que un material con elevada resistividad puede presentar una muy baja resistividad si se encuentra saturada con agua (Arias, 2011). Por lo tanto, hay diversos factores que pueden afectar la resistividad del material, como la porosidad, la permeabilidad, los fluidos, la presencia de sales, entre otros (Cardimoma, 2002).

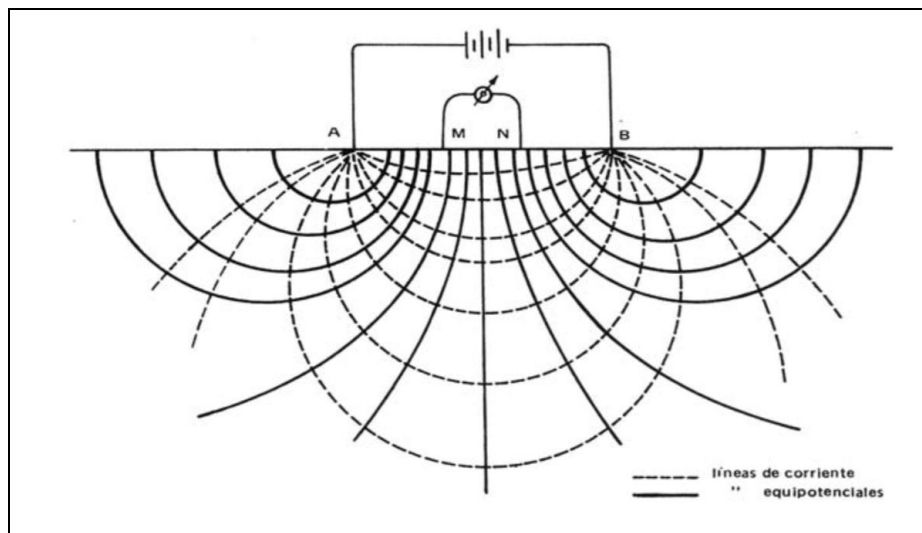


Figura 5. Esquema básico de los métodos de resistividad. Tomada de Ontiveros, 2003.

Tomografía eléctrica (TER)

La Tomografía eléctrica es un método de resistividad multielectrodo, basado en la modelización 2-D de la resistividad del terreno e independientemente de que la TER sea una técnica multielectrodo, la base teórica de su funcionamiento es análoga al de los métodos de resistividad convencionales mencionados anteriormente (Ontiveros, 2003).

Existen diferentes configuraciones para ubicar los electrodos, los más comunes son:

Arreglo Wenner: esta configuración presenta buena sensibilidad vertical lo que indica una mejor resolución en los cambios en la horizontal, es bueno para detectar estructuras horizontales (Loke, 1999). Este arreglo mantiene una distancia igual entre todos los electrodos ($AB = MN = NB$) (Sánchez San Román, 2018).

Arreglo Schlumberger: esta configuración se comporta superficialmente como el arreglo Wenner y hacia la parte profunda tiene mejor sensibilidad horizontal lo que indica una mejor resolución vertical en las resistividades del subsuelo y buena sensibilidad en profundidad (Loke, 1999), presenta una distancia MN pequeña en relación con la abertura de los electrodos AB generalmente $AB/5 > MN > AB/20$ (Sánchez San Román, 2018).

Se utiliza el arreglo Wenner para la mayoría de las tomografías ya que las estructuras estudiadas en el presente trabajo (tubificación) presentan más variaciones en la horizontal, sin embargo, en algunos casos específicos se utiliza el arreglo Schlumberger, ya que presenta puntualmente mejores resultados.

Una vez obtenidos los datos de resistividad aparente, es necesario realizar una inversión de los datos para conocer las resistividades reales del subsuelo (Sasaki, 1992). Para el procesamiento de estos se utiliza el software Rest2Dinv.

7.2 PROCESO DE TUBIFICACIÓN:

La tubificación es un tipo de erosión fisicoquímica de carácter subsuperficial, causada por los flujos de agua a través del suelo (Jones, 1994). Ocurre bajo la superficie del suelo a causa de la infiltración de aguas lluvias las cuales han creado corrientes a favor de la pendiente y han erosionado los materiales subyacentes y esta solo es visible en superficie

cuando el tubo ha colapsado o se encuentran los orificios de entrada y salida de aguas del tubo (Jonnes, 1981)

La tubificación se ve favorecida por características propias del suelo (tamaño de grano, porosidad, presión capilar, etc.) como también factores medioambientales como lo son las precipitaciones y las coberturas vegetales de la zona. A su vez diferentes intervenciones antrópicas a lo largo de la superficie influyen de manera directa en el desencadenamiento y fortalecimiento de dicho proceso, el cual puede influir en la falla de presas (Foster et al. 2000) y se relaciona con cárcavamientos, erosión por infiltración, hundimientos, gullys y desplomes de cavidades subterráneas (Dunne 1990, Fox and Wilson, 2010). Cada uno de estos corresponde a diferentes fallas del terreno. Sin embargo, la interacción de estos procesos es compleja, el estudio de esta ha sido discutido por diferentes autores los cuales han llegado a múltiples conclusiones sobre la naturaleza de formación de la tubificación. (Dunne 1990).

Debido al difícil estudio de la tubificación, el método más común para su detección es el mapeo de tubos colapsados (CPs) el cual ha sido aplicado en un amplio número de ambientes geomorfológicos y pisos térmicos como lo son: grandes depresiones, paramos, turberas y áreas montañosas donde la tubificación desarrolla Cambisoles (Bernatek et al. 2016). Sin embargo, estos métodos solo determinan la existencia de tubos ya existentes o colapsados, pero no dan un acercamiento al descubrimiento de nuevas áreas con presencia de este proceso o a la relación con las diferentes fallas que se pueden generar a partir de este (Bernatek et al. 2016). Otro de los métodos planteados para su detección es de carácter invasivo como lo son las perforaciones o excavación de apiques. (Botschek et al. 2002). Partiendo de estas dificultades se enfoca el objetivo de este proyecto en la geofísica como método de estudio no solo de identificación del fenómeno sino también de la caracterización de este y de su relación con los procesos de hundimiento y subsidencia de las zonas afectadas por este. De esta premisa se genera nuestra hipótesis de correlacionar los hundimientos en el municipio de Concordia, Antioquia con los procesos de tubificación allí presentes y como, por medio de un método indirecto y no invasivo como es la geoelectrónica se puede dimensionar y aproximar a estudios más precisos y que permitan modelamientos de los datos obtenidos y su utilización en otros lugares en los cuales se generen sistemas erosivos de este tipo.

Los métodos geoelectricos, están enfocados en presentar las características del subsuelo en función de sus resistividades eléctricas. Partiendo de esto, múltiples trabajos se han realizado con el fin de investigar las condiciones subterráneas de una zona específica a partir de estos métodos, con el fin de hacer una caracterización adicional a los métodos convencionales. Esto, unido al poco estudio que se ha realizado sobre el fenómeno de tubificación en la zona y la disponibilidad de un método como las tomografías eléctricas en 2 dimensiones, ha sido uno de los antecedentes necesarios para llevar a cabo el proyecto.

8 METODOLOGÍA

La metodología del presente trabajo se divide en 5 fases: consulta de información secundaria, pre-campo, campo, post-campo y la elaboración del trabajo escrito con la presentación de resultados.

8.1 CONSULTA DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

Se realizó la consulta de información secundaria como bibliografía científica enfocada a trabajos donde se reporta el fenómeno de tubificación, documentos de la aplicación del método geofísico para el reconocimiento de este tipo de fenómenos, estudios de suelos para construcciones en el área urbana del municipio, se consultaron bases de datos gubernamentales como el instituto geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Servicio Geológico colombiano (SGC), el municipio de Concordia Antioquia y la Gobernación de Antioquia.

Para el análisis de la información compilada se utilizaron, fotografías aéreas proporcionadas por el IGAC, ortofotos obtenidas de la cartografía básica de la gobernación de Antioquia, el esquema de ordenamiento territorial (EOT) del 2017 realizado por el Municipio de Concordia donde se hizo énfasis el estudio básico de amenazas, lineamientos de la dimensión física para el esquema de ordenamiento territorial de la gobernación de Antioquia del 2004 donde se reporta por primera vez la tubificación en el municipio, estudios hechos por Paioli et al (2016) y Bernatek et al (2016) sobre geoelectrica aplicada al fenómeno de tubificación, entre otros.

Adicionalmente se contó con información SIG como la Geodatabase (GBD) de la Cartografía base de Concordia a escala 1:20.000 que se obtuvo del EOT del 2017, se utilizó la plancha geológica 146 Medellín Occidental escala 1:100.000 elaborada por INGEOMINAS (SGC) el año 1976 y los mapas topográficos de cartografía base 1:2.000 elaborada por el IGAC.

8.2 PRE-CAMPO

8.2.1 Etapa 1

Se realiza un análisis de la información secundaria para delimitar la zona de estudio, teniendo en cuenta la plancha geológica 146 Medellín Occidental escala 1:100.000 y más específicamente los mapas geológicos y geomorfológicos 1:20.000 presentados en el EOT del 2017, se analizaron las fotografías aéreas y las ortofotos que permitieron seleccionar sitios de interés para realizar estaciones de control geológico y geomorfológico, se procedió a elaborar mapas temáticos acudiendo a la información SIG de la información secundaria, todo esto con el fin de realizar la primera salida de campo para la recolección información primaria.

8.2.2 Etapa 2

Teniendo en cuenta la información secundaria descrita para la primera etapa de campo y los resultados obtenidos en esta, se realizan mapas temáticos la geología y geomorfología local del área de estudio a escala 1:200.000, se determinaron los puntos de interés para la aplicación de las Tomografías Eléctricas Resistivas (TER), teniendo en cuenta las geoformas asociadas al fenómeno de tubificación, la litología de la zona, la geomorfología general del área de estudio, la topografía y las vías de acceso. Con las zonas de interés definidas se procedió a precisar el tipo de arreglo y la distribución espacial de los electrodos para la toma y adquisición de datos.

8.3 CAMPO

8.3.1 Etapa 1

En esta etapa se ejecutó la primera salida de campo, donde se realizó el reconocimiento del área de estudio, se analizaron los afloramientos presentes, se describieron los perfiles de meteorización y se describió la geomorfología de la zona, con el fin de hacer una diferenciación geológica de cada uno de los depósitos presentes y buscando la temporalidad relativa de cada uno de estos. Para esto se hizo un recorrido describiendo la litología por los diferentes escalonamientos buscando los lugares donde había un cambio en el relieve y mirando si efectivamente correspondía a un cambio en la litología.

8.3.2 Etapa 2

Se realizó una segunda salida de campo con el fin de llevar a cabo la prospección geofísica y la observación de características en superficie que permitieron la adquisición de datos adicionales para tener en cuenta en el procesamiento de cada línea y finalmente la correlación de estas con los procesos de tubificación (Ver numeral 7.4 de prospección geofísica).

8.3.2.1 Prospección geofísica

Con el fin de cumplir el objetivo principal de este proyecto y a su vez dar viabilidad al estudio no invasivo de fenómenos de erosión interna como lo es la tubificación, se lleva a cabo la utilización de métodos geofísicos como herramienta principal para la identificación de los procesos presentes en la zona de estudio.

Por medio de tomografías eléctricas se hizo la prospección y exploración del área seleccionada. La elección de este método se justifica en su modelo base de funcionamiento; el cual consiste en variaciones de la resistividad de los materiales en profundidad, lo cual es una característica intrínseca y marcada a la hora de buscar variaciones estructurales, geológicamente hablando, partiendo del grado de saturación de los materiales.

La etapa de la prospección geofísica está dividida en dos fases, las cuales corresponden a la adquisición de los datos y posteriormente la inversión de estos por medio de aproximaciones, entregando como resultado datos óptimos para ser interpretados y además correlacionados con las demás características como la geomorfología y geología de la zona. A continuación, se describen las 2 etapas de la prospección e inversión de los datos obtenidos:

Adquisición de los datos

Inicialmente por medio del análisis de geomorfología, geología y ubicación geográfica se seleccionaron los puntos de interés para realizar las líneas de tomografía que concordaran con la naturaleza del proceso objetivo (Figura 6)

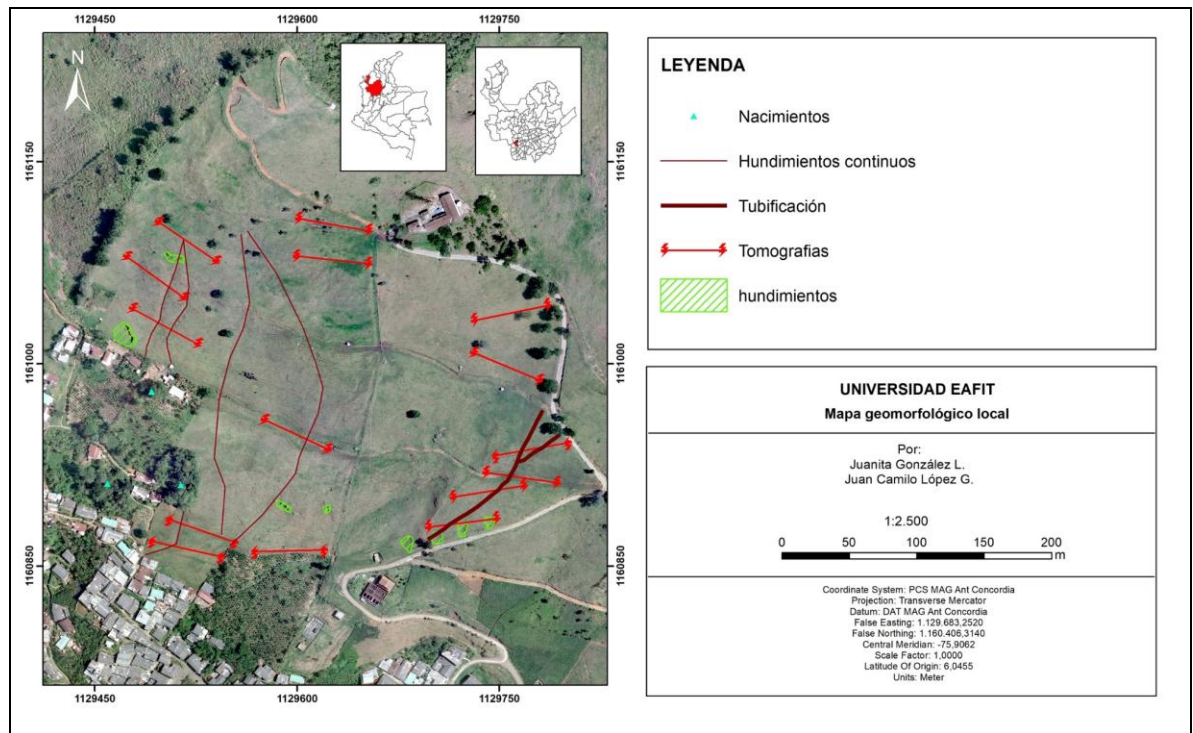


Figura 6. Localización de las tomografías.

A partir de la premisa anterior se realiza la toma de datos por medio del resistivímetro alemán de referencia 4Point Ligth 10W fabricado por la empresa Lippmann (Figura 7). Este a su vez fue operado de forma remota por medio del software Geotest, en el cual se introdujeron los parámetros propios del arreglo como lo son el número de líneas, espaciamento entre electrodos, definición del electrodo inicial y del electrodo final y por último desde cual electrodo se iba a empezar la medida. Físicamente se utilizaron dos líneas de 15 electrodos cada una para un total de 30 electrodos, los cuales se dispusieron a una equidistancia de dos metros entre ellos.



Figura 7. Resistivimetro 4Point Ligth 10W.

Una vez configurados los parámetros básicos de la línea se procedió a escoger el tipo de arreglo bajo el cual se obtuvieron los datos. La geometría en la que se hizo énfasis en este trabajo es la del arreglo Wenner, debido a su alta resolución vertical lo cual se traduce en una mejor resolución horizontal en cuanto a las variaciones en las resistividades (Loke, 1999). Esto se ajusta de forma apropiada a nuestro fin de investigación. Sin embargo, en cada línea también se obtuvo la toma de datos por medio del arreglo Schlumberger, esto con el objetivo de hacer comparaciones entre las pseudosecciones una vez invertidas y definir en cual se presentan mejores resultados que confirmen o refuten nuestra hipótesis de trabajo.

Finalmente, en cada línea se hizo una prueba de resistencia de los contactos de cada electrodo con la tierra y de esta comprobar que el flujo de energía no se viera perturbado por una mala conexión. Teniendo en cuenta cada una de las configuraciones anteriores se obtuvieron las lecturas en dos formatos, en los que se contienen la información base de cada línea en formato .TXT y formato .DAT

En total se realizaron 16 tomografías, de las cuales se muestran las 8 las más representativas (Tabla 2) distribuidas en un área de 80.000 metros cuadrados, distribuidas espacialmente en los sitios de interés seleccionados.

De manera simultánea a la lectura de datos del equipo se obtuvieron los valores de elevación de cada electrodo para incluir la topografía en el perfil de resistividades y obtener una mayor aproximación a las condiciones reales del medio. Estas alturas topográficas fueron ajustadas de manera más precisa con las cotas obtenidas a partir de un modelo digital de elevación con una escala 1:10.000.

Tabla 2. Lista y descripción de tomografías

| No. | Este | Norte | No. de electrodos | Separación de electrodos (metros) | Longitud (metros) | Dirección (grados) |
|------------|---------|---------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|--------------------|
| TER-2-SCH | 1129471 | 1161081 | 30 | 2 | 60 | 138 |
| TER-3-WEN | 1129656 | 1161098 | 30 | 2 | 60 | 128 |
| TER-8-WEN | 1128966 | 1894393 | 30 | 2 | 60 | 116 |
| TER-11-WEN | 1129728 | 1161009 | 30 | 2 | 60 | 80 |
| TER-12-WEN | 1129623 | 1160862 | 30 | 2 | 60 | 278 |
| TER-13-SCH | 1129556 | 1160866 | 30 | 2 | 60 | 289 |
| TER-16-WEN | 1129788 | 1161043 | 30 | 2 | 60 | 81 |

8.4 POST-CAMPO

Procesamiento e inversión de los datos

Una vez se obtienen los datos productos de la adquisición en campo, se prosiguió a la fase del procesamiento de los datos, la cual consiste en ajustar los archivos en una forma óptima para ser cargados en el software de inversión. Posteriormente se asignan diferentes métodos y parámetros para la aproximación de la inversión.

Inicialmente, los archivos de formato .DAT los cuales se consideran datos bases o crudos se modificaron con un editor de texto, en el cual se introdujeron los valores de la posición vertical de cada electrodo, definiendo así la topografía de la línea y su relación con las geoformas presentes posteriormente analizadas.

El software utilizado para la inversión de los datos es Res2DInv el cual funciona bajo el método de mínimos cuadrados el cual es solucionado a través del algoritmo Gauss-Newton

el cual busca una optimización mínima de las resistividades aparentes para hacer una aproximación a las resistividades reales (Loke et al., 1996).

El problema inverso está conformado por un modelo, el cual lo definen parámetros que están compuestos por las resistividades aparentes medidas en campo y cada uno de los factores externos que lo componen (Sanín y Briceño, 2000).

El modelo de inversión que plantean Loke y Barker (1995) está basado en la metodología de dividir la pseudosección en rectángulos con dimensiones específicas y a su vez cada uno de estos rectángulos estará regido por parámetros de resistividad aparente y real, a partir de los cuales se obtendrá el perfil final (Sanín y Briceño, 2000).

La solución del problema inverso que se lleva a cabo por medio del software RES2DINV, concreta un conjunto de ecuaciones conformadas por parámetros definidos y una matriz jacobiana que contiene las derivadas parciales que son calculadas para cada bloque del perfil. La ecuación principal que utiliza el software RES2DINV se conoce como el método “smoothness-constrained, least-squares inversion” (Ecuación 1) y a través de esta se calculan cada una de las matrices jacobianas (Sanín y Briceño, 2000).

$$(J^T J + \lambda C^T C)p = J^T g$$

Ecuación 1: Solución del problema inverso, tomado de Sanín y Briceño, 2000).

Los parámetros y variables de la anterior ecuación están definidos por Sasaki (1992) como: J es la matriz jacobiana, la cual contiene cada una de las derivadas parciales de los bloques contenidos en el modelo.

λ corresponde al factor de amortiguamiento o damping factor. Este funciona matemáticamente como un multiplicador de Lagrange.

g es el vector de discrepancia que contiene las diferencias logarítmicas entre las resistividades aparentes medidas y calculadas.

p es el vector de corrección de los parámetros del modelo.

C corresponde a una matriz que actúa como filtro suavizando cada uno de los parámetros de inversión.

Cuando se corre una inversión estándar el software por defecto asigna valores de amortiguación, filtros y corrección de ruidos los cuales dan aproximaciones acertadas a las resistividades reales. Para llegar a estos resultados la interfaz del software primero muestra

la pseudosección de resistividades medidas, luego las calculadas y finalmente el perfil de resistividades reales. Sin embargo, en este trabajo se variaron algunas características del software para hacer una aproximación concordante con las características geológicas y valores de resistividad aparente. Cada uno de los parámetros utilizados se describe a continuación:

Exterminate bad data points:

Con esta opción se pueden observar las variaciones relativas de la resistividad y eliminar datos con una variación excesiva de resistividad lo que demuestre claramente un valor erróneo de la adquisición o posiblemente causado por un ruido eléctrico. No obstante, por las condiciones geológicas de la zona y el objetivo del trabajo no se tomó en cuenta la eliminación de datos debido a que las variaciones se justifican con características propias del terreno como la litología, saturación y compactación del medio (Figura 8).

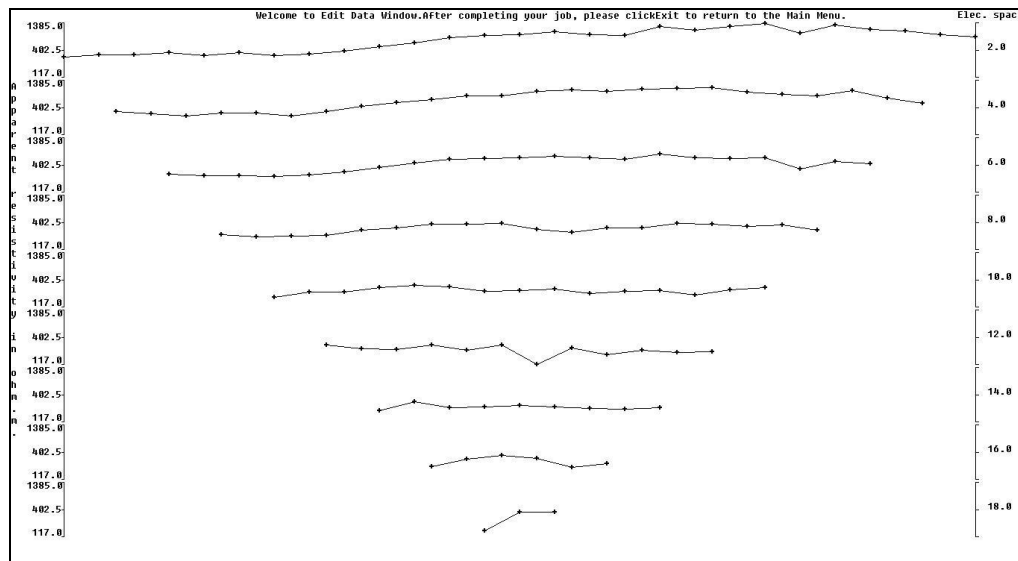


Figura 8. perfil de ruido en los datos medidos. Tomado del software Res2Dinv.

Inversion Damping Parameters:

Damping factors: Este valor se utiliza para normalizar la cantidad de ruido y contaminación que hay presente en el perfil, a su vez permite utilizar un valor de amortiguación para la primera capa. El desarrollador del software define un valor máximo de 0.3 para secciones que presentan altos niveles de ruido y valores mínimos de 0.1 para menor ruido. Dentro del algoritmo de Gauss-Newton el damping factor se define como un multiplicador de Lagrange caracterizado por λ . Basándose en el perfil de ruido de cada una

de las tomografías realizadas y en su pseudosección de resistividades aparentes, se utilizaron valores de 0.15 para las tomografías con niveles de ruido normales y valores de 0.25 para los perfiles que presentaban mayores variaciones en el perfil de ruido.

Change of damping factor with depth: Este valor define el incremento del Damping factor en profundidad. Esto con el fin de disminuir la pérdida de resolución de resistividad que se da con el aumento de la profundidad. Los valores normales de incremento varían entre 1.05 y 1.10. Debido a que la profundidad de estudio es relativamente somera en todas las tomografías, el valor utilizado fue de 1.06, el cual es cercano al valor mínimo utilizable.

Vertical to horizontal flatness filter ratio: Representa la proporción de dominancia de anomalías verticales u horizontales en la pseudosección de resistividades aparentes. Cuando predominan los cambios horizontales se pueden utilizar pesos más bajos para el filtro (por ejemplo 0.5) por el contrario cuando los cambios se dan de manera vertical se busca una proporción más alta (2.0) dichos valores son sugeridos por el software. En base a la disposición de los valores de resistividad aparentes, los cuales aparecen ubicados con una tendencia horizontal, se utilizaron valores bajos de entre 0.5 y 0.8 en el proceso de inversión.

Forward modeling method settings: Esta ventana permite definir los parámetros para la aplicación del modelo directo, dentro de esta encontramos las siguientes variables: tamaño del mallado horizontal, vertical y la elección del método para realizar el modelo directo.

En el tamaño de mallado horizontal y definición en la vertical buscamos obtener una mejor calidad en cuanto a los valores a calcular en el momento de correr la inversión. En la elección del método para el modelo directo, se encuentran dos opciones que corresponden a elementos y diferencias finitos. En este estudio se realizaron cada una de las inversiones bajo el método de elemento finito, el cual corresponde a una aproximación en resolución de ecuaciones utilizando un modelo de polígonos uniformes.

Inversion Progress Settings: En esta sección definimos cada uno de los procesos que determinan el tiempo de cálculo de la inversión. Los parámetros considerados para la inversión de los datos obtenidos en campo fueron:

Convergence limit: Este nos indica la variación del error medio cuadrático entre una iteración y otra. En el programa se ingresan el porcentaje mínimo de cambio entre cada una de las iteraciones y el porcentaje mínimo de error medio cuadrático (RMS). El cambio

definido para la inversión de los datos se definió en una variación de 0,1% para cada una de las tomografías.

Number of iterations: Para alcanzar el límite de convergencia de 0,1% en la variación del RMS, definido anteriormente; se utilizaron entre 4 y 8 iteraciones según correspondiera a las propiedades de cada perfil (ver tablas de resultados).

Inversion: Dentro de esta ventana encontramos cada uno de los parámetros necesarios para definir el método de inversión y los procesos que lo regirán (Bustamante et al., 2018).

Inversion methods and settings:

Select robust inversión: Esta opción nos permite definir si queremos correr una inversión más sensible a los datos ruidosos o menos sensibles. Esto se obtiene a partir del contraste en el error medio cuadrático entre las resistividades aparentes medidas y calculadas. Para las inversiones del presente estudio se utilizó el contraste robusto de datos. Además, no se redujo el efecto de los bloques laterales debido a que esto suavizaría los valores de resistividad en el perfil, lo cual no es adecuado para diferenciar los posibles procesos de tubificación presentes.

Modify smoothness constrained least-squares method:

Esta opción nos permite utilizar una variación del método de mínimos cuadrados al suavizarla por medio de restricciones en los vectores que definen el algoritmo. Con la combinación del algoritmo de Marquardt se obtiene una mejor resolución en cuanto a estructuras compactas como cavernas y cuerpos mineralizados (Loke, 1996). Por tal motivo en las inversiones llevadas a cabo se utilizó el contraste de mínimos cuadrados suavizado con el fin de obtener mejores resultados en cuanto a la resolución de las estructuras presentes.

Choose logarithm of apparent resistivity:

Esta opción nos permite la forma en la que queremos visualizar los valores de la resistividad aparente. Incluye la opción de distribución lineal o logarítmica. Basados en la naturaleza y propiedades de aumento de la resistividad, la cual varía en el orden de cientos a miles $\Omega.m$, se determinó la distribución logarítmica como la opción correcta.

Type of method to solve the least-square equation:

El método seleccionado para resolver el problema inverso fue el método Gauss-Newton estándar (o completo), el cual calcula la matriz jacobiana para cada una de las iteraciones.

Debido a que el número de datos adquiridos fue relativamente pequeño (<1000) para cada línea se consideró el método adecuado para la inversión.

Model discretization: En cada uno de estos ajustes se tienen en cuenta parámetros que se verán reflejados en el tamaño del modelo de bloques y la forma del modelo final (Bustamante et al., 2018).

Change tickhness of layers:

Con este parámetro se modifica la proporción de cambio en el espesor a medida que incrementa la profundidad. Los valores que se utilizaron generalmente fueron cercanos al estándar que corresponden a una tasa de incremento de 1.1 y una proporción del espesor de la primera capa con respecto a la separación de electrodos de 0.5. Además, el factor de incremento del rango de profundidad del modelo se determinó entre 1.05 y 1.1 hasta obtener resultados similares a los datos adicionales obtenidos.

Use extended model:

Esta opción no se consideró adecuado utilizarla en la inversión de los perfiles debido a que funciona bajo el principio de la extrapolación de los datos que están fuera del área de los datos medidos. Por tanto, puede tener influencia en el resultado final y distorsionar el perfil de resistividades reales.

Model sensitivity options:

Dentro de esta opción encontramos las opciones de desplegar los gráficos que contienen la información del modelo de sensibilidad del perfil. El valor de sensibilidad de cada bloque está definido por la cantidad de información obtenida para cada bloque, esto se concreta en un modelo de confiabilidad entre los resultados obtenidos en el perfil final y los datos iniciales de entrada. A su vez, este modelo de bloques de sensibilidad también nos da una idea o previsualización de los datos sin necesidad de llevar a **cabo** la inversión (GEOTOMOSOFT, 2010).

De manera general, los valores de sensibilidad hacia la superficie siempre serán mayores debido a la energía y cercanía al sistema de electrodos, a diferencia de los datos laterales en profundidad que en su mayoría son extrapolados.

El software permite observar dos modelos que consisten en el modelo de sensibilidad y el modelo de sensibilidad subsuperficial (Figura 9 y Figura 10).

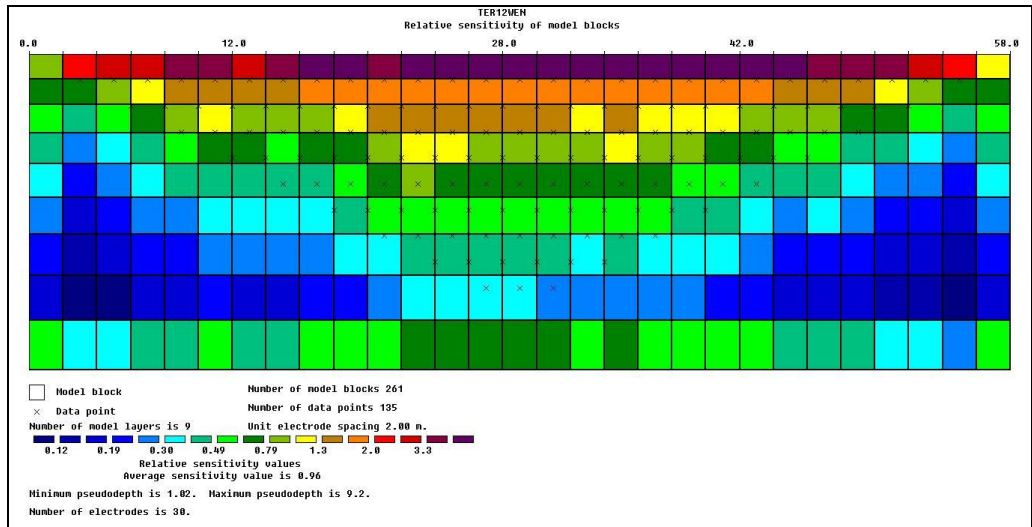


Figura 9. Modelo de sensibilidad de bloques de la TER12WEN en el software Res2DInv.

En este modelo podemos observar que, en la zona central, donde hay una mayor concentración de datos medidos los valores de sensibilidad son altos, lo que puede significar una mayor optimización en el perfil de resistividad obtenido a partir de la inversión. Del mismo modo, en la superficie se concentran los mayores valores debido a la cercanía a los electrodos. En profundidad también hay bloques con mayores valores de sensibilidad debido a que su tamaño es mayor y se acerca a la diferencia finita del modelo (GEOTOMOSOFT, 2010).

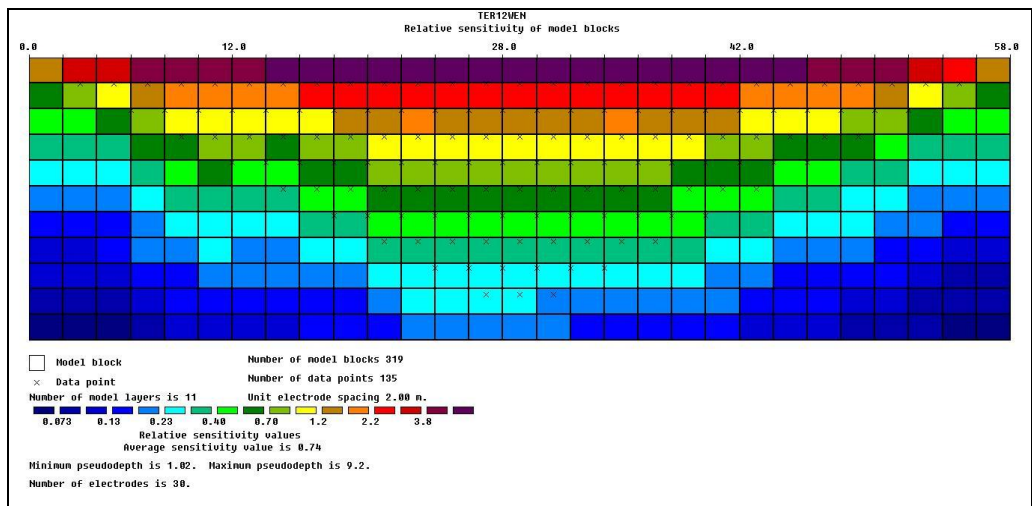


Figura 10. Modelo de sensibilidad subsuperficial de la TER12WEN en el software Res2DInv.

En el modelo de sensibilidad subsuperficial, el tamaño de los bloques es igual, lo que resulta en un valor más ajustado de la sensibilidad a medida que se gana profundidad, al

igual que en el primer perfil de sensibilidad, los datos laterales más profundos adquieren valores menores de sensibilidad ya que en esta área no hay datos medidos.

9 COMPONENTE GEOMORFOLÓGICO Y GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

A continuación, se presentarán las condiciones geológicas y geomorfológicas locales comprendidas en el área de estudio.

9.1 GEOLOGÍA LOCAL

En el área urbana del municipio de Concordia no se observan afloramientos de roca fresca de las unidades geológicas anteriormente mencionadas. Estas rocas han generado múltiples depósitos y perfiles de meteorización, los cuales están principalmente ligados a la erosión de la Formación Barroso.

Los depósitos vertiente corresponden a flujos de lodos, escombros y/o bloques con una concentración mayor de dichos depósitos hacia el área central y sur del pueblo, y puntualmente depósitos aluviales ubicados en la quebrada La Bomba y quebrada Magallo (Figura 17).

Las características de estos depósitos son variables y es común la presencia de escalonamientos que indican diferentes periodos para los eventos de deposición y en general los clastos presentan composiciones basálticas con se encuentran con baja redondez y mala selección; evidenciando así una su cercanía al área fuente. A continuación, se describen desde el evento más antiguo al más joven:

9.1.1 Suelos de la Formación Barroso (Kvb):

El perfil de meteorización es descrito según Dearman (1991). Se observa un horizonte de suelo VI con un espesor de hasta 1 m, seguido por un horizonte V, de coloraciones más rojizas, en los cuales se observan materiales completamente meteorizados, pero conservando la estructura original, con presencia puntual de bloques de roca, se presenta la transición al horizonte IV, en el cual es posible observar muy débilmente y de forma puntual la textura original de la roca. Hacia la base se observa el horizonte III, el cual se encuentra considerablemente meteorizado y es posible observar la textura original de la roca (Figura 11). Estos se ubican en norte, oriente y occidente del área de estudio.



Figura 11. Suelos de la Formación Barroso.

9.1.2 Depósitos de vertiente (Qf)

Flujos de lodos y escombros (Qfle): Se encuentran tres flujos de lodos y escombros en la parte medio-sur del área de estudio. Estos se encuentran separados por el escalonamiento observado, evidenciando diferentes periodos de deposición; son depósitos consolidados con una selección moderada, relación clastos/matriz de 30/70, matriz lodo arenosa y bloques subredondeados a subangulares, con tamaños de clastos entre 2 y 15 cm de composición basáltica (Figura 12).



Figura 12. Flujo de lodos y escombros

Flujos de escombros (Qfe): Se observan 5 flujos de escombros con características similares que representan diferentes periodos de deposición evidenciados en el escalonamiento presente. Son depósitos grano soportados, con clastos subangulares a sub redondeados, de composición basáltica, altamente alterados (Figura



13).

Estos flujos se ubican: uno en parte sur del área de estudio, otro hacia el oriente y tres en la parte alta de la cabecera municipal. Estos últimos presentan bloques de hasta 2 metros a clastos centimétricos matriz soportados. (Figura 14)



Figura 13. Flujo de escombros.



Figura 14 Flujo de escombros

Flujo de escombros y lodos (Q_{fel}): Se clasifica un depósito flujo de escombros en la parte central de la zona de estudio, donde se ubica prioritariamente el área del pueblo. Este presenta una mala selección, con una relación clastos/matriz de 80/20, ; los clastos son de material basáltico provenientes de la Formación Barroso, con baja esfericidad, mala selección, tamaños entre 2 y 80 cm y matriz lodo arenosa (

Figura 15 y Figura 16)



Figura 15. Flujos de escombros y lodos



Figura 16 Flujos de escombros y lodos

Aluviones recientes (Qar): Se observan dos depósitos aluviales, uno ubicado en la quebrada La bomba, el cual se encuentra mal seleccionado poco consolidado con bloques subangulosos de hasta 1 metro, este depósito presenta una matriz arenosa.

El segundo deposito se encuentra ubicado en la quebrada Magallo, presenta una selección moderada y pobremente consolidada, con clastos entre 3 y 5 cm, los cuales están redondeados a subredondeado

El espesor real de ambos depósitos no es evidente en campo, sin embargo, el espesor en superficie para la quebrada La Bomba es de 1 m y en la quebrada Magallo 1,50 m.

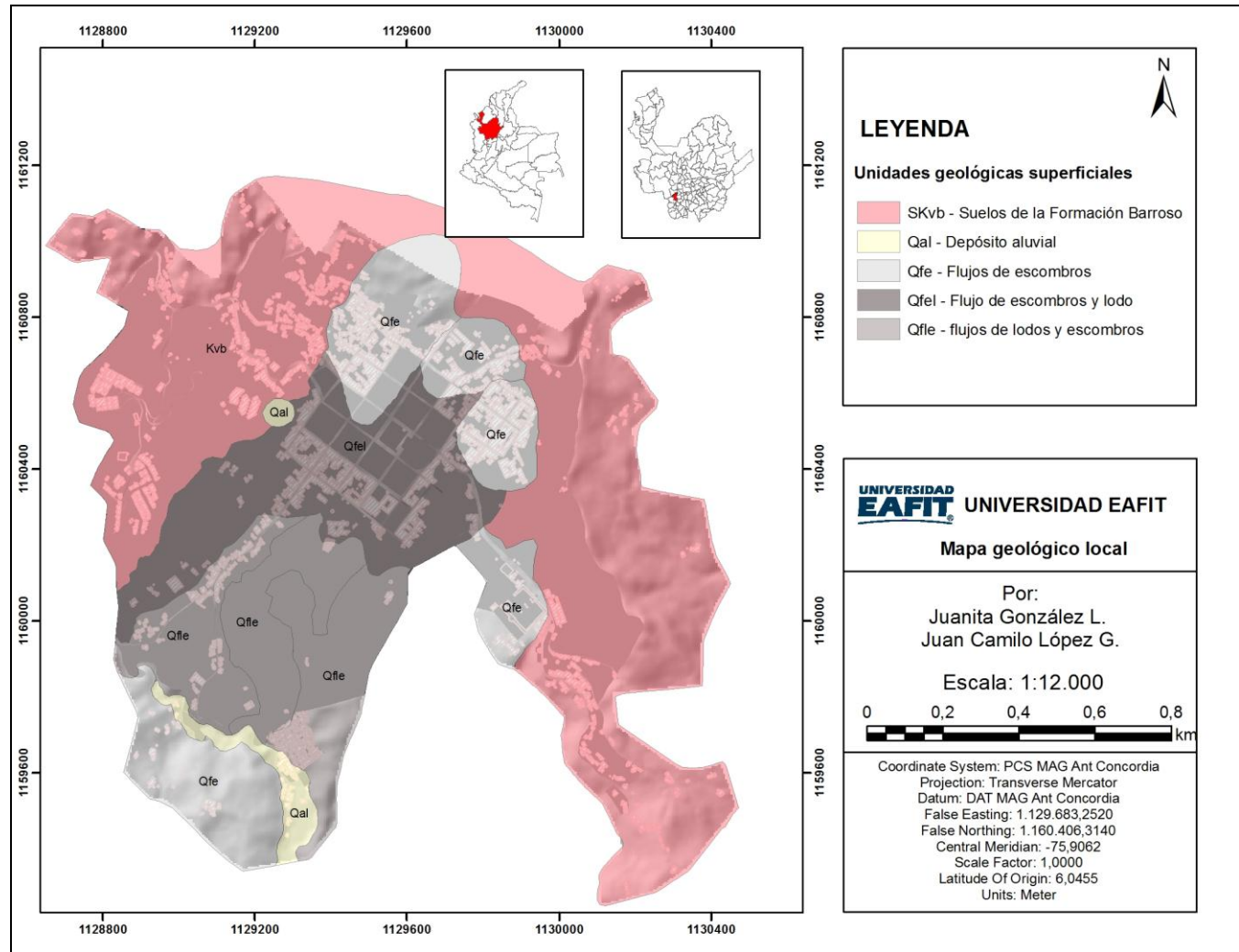


Figura 17. Mapa de geología del área urbana de Concordia Antioquia

9.2 GEOMORFOLOGÍA LOCAL

La geomorfología local se realiza a partir del levantamiento en campo y la interpretación de curvas de nivel debido a que gran parte de la zona de estudio está cubierta por el casco urbano del pueblo. A su vez, se conserva la cartografía base con una escala 1:2.000, de esta manera se evita la pérdida de resolución espacial, lo cual es esencial para el objetivo del proyecto. En la Figura 18 se presentan las diferentes unidades geomorfológicas correspondientes al área urbana y sus alrededores y se da una descripción de cada una de estas.

De manera conjunta el área urbana del municipio se encuentra rodeada de cerros con pendientes fuertes las cuales están directamente relacionadas a sus materiales y génesis, lo que corresponde a rocas in situ de la Formación Barroso, cubiertas por suelos rojizos ricos en hierro. Al interior de este relieve de fuertes pendientes se encuentran las superficies de depósitos demarcadas por los cambios en la inclinación del terreno y se puede observar cómo se sobreponen diferentes eventos que se clasifican temporalmente según la cercanía de la fuente de proveniencia y el grado de transporte que presenten sus materiales.

El principal ambiente geomorfológico presente en el área urbana del Municipio de Concordia corresponde al ambiente denudacional, el cual controla y modela el relieve en diferentes sistemas de lomos, superficies de depósito y a su vez en laderas con diferentes morfologías y medidas que dan evidencia de las diferentes génesis de cada una de estas geoformas. De igual manera se evidencian geoformas antrópicas las cuales corresponden a superficies de explanación y pequeñas excavaciones, las cuales han sido elaboradas para la construcción de obras civiles como vías, casas, establecimientos deportivos y de salud.

En las siguientes tablas se presentan las diferentes geoformas y su localización en el área urbana:

a. Laderas:

Estas hacen parte de un gran sistema denudacional, las cuales están clasificadas por su longitud, su pendiente y su forma (Tabla 3). De manera general, en la parte alta del municipio se ubican las laderas con pendientes más fuertes, lo cual evidencia los diferentes procesos que han dado paso a su formación, como lo son las tasas de levantamiento y la energía potencial generada por la diferencia de altura cada vez

mayor, a su vez, esto se ve reflejado en una mayor competencia por parte de los agentes hídricos que actúan sobre estas unidades. En la zona de transición entre la parte alta del municipio y la zona central se observa un patrón de cambio de morfologías, las cuales en la parte alta son de predominio convexo y cuando su pendiente se suaviza se presentan de forma cóncava y con longitudes medias que se extienden conforme al material que las conforma.

En la zona baja del municipio las pendientes se suavizan generalmente, excepto en las cercanías a los canales debido a la incisión que estos presentan. De tal forma, con una pendiente más suave y una proveniencia más lejana de la zona fuente de los materiales las morfologías son más rectas y regulares, extendiéndose por la pendiente y delimitadas al sur por la quebrada Magallo.

Tabla 3. Descripción geomorfológica: laderas.

| LADERAS | | |
|-----------------------|--|---|
| Longitud | Geoforma | Localización |
| Laderas cortas | Ladera corta cóncava e inclinada (Lcci) | Corresponde a una unidad ubicada en la zona noroeste, en el km 1 de la vía que conduce hacia el municipio de Betulia. |
| | Ladera corta cóncava y muy abrupta (Lccma) | Está ubicada en la parte alta de la cabecera municipal en el barrio Hoyo Frío y rodea el nacimiento del Caño de la Bomba. Se asocian algunos movimientos en masa a esta unidad. |
| | Ladera corta cóncava y muy inclinada (Lccmi) | Representa una pequeña sección al frente del barrio Salazar, cruzando la quebrada Magallo. |
| | Ladera corta convexa y muy abrupta (Lccxa) | Se ubica al Este de las laderas inclinadas en la vía que conduce hacia Betulia. |
| | Ladera corta convexa y muy abrupta (Lccxma) | En la vía que conduce hacia Betulia a 100 metros de la estación de bomberos municipal. |

| LADERAS | | |
|--------------------------|--|---|
| Longitud | Geoforma | Localización |
| | Ladera corta convexa y muy inclinada (Lccxmi) | Se ubica al sur del barrio Salazar, sobre el margen derecho de la quebrada Magallo. |
| | Ladera corta irregular y abrupta (Lcia) | Esta al norte de la cancha municipal, justo donde se ubica la estación de bomberos. |
| | Ladera corta irregular y muy inclinada (Lcimi) | Ubicada en la parte sur de la cancha municipal, justo donde está el barrio La Cordialidad. |
| | Ladera corta recta e inclinada (Lcri) | Están ubicadas al sur en el barrio Salazar y al noreste del municipio en la zona conocida como el Alto. |
| | Ladera corta recta y abrupta (Lcra) | Es una pequeña ladera al sur del barrio La Cordialidad. |
| | Ladera corta recta y muy abrupta (Lcrma) | Ubicada sobre la margen derecha del tramo de la vía que va desde la Bomba de la entrada al municipio hasta el sector conocido como el Puente. En esta se presentan movimientos en masa de menor tamaño. |
| | Ladera corta recta y muy inclinada (Lcrmi) | Ubicada principalmente al norte del municipio, detrás de la zona de las antenas de radio |
| Laderas moderadas | Ladera moderada cóncava e inclinada (Lmci) | Se localiza al sur del barrio Salazar, cruzando la quebrada Magallo a 200 metros. |
| | Ladera moderada cóncava y abrupta (Lmca) | Localizada al sur del Colegio de Jesús. Se asocian asentamientos del terreno y pequeños movimientos en masa |

| LADERAS | | |
|-----------------|--|---|
| Longitud | Geoforma | Localización |
| | | alrededor del drenaje que esta rodea. |
| | Ladera moderada cóncava y muy inclinada (Lmcmi) | Esta se ubica en la división de la zona central del municipio y el barrio Hoyo Caliente. Se evidencia el cambio de pendiente demarcado por esta geoforma entre un flujo al oeste y otro más plano al este |
| | Ladera moderada convexa y abrupta (Lmcxa) | Localizada en la zona Este del municipio, al rededor un tope redondeado. |
| | Ladera moderada convexa y muy abrupta (Lmcxma) | Está en la zona norte del municipio y demarca un escalonamiento, esta ladera se puede asociar a depósitos y suelos de la Formación Barroso. Además, hay un movimiento de masa que se inicia en esta unidad. |
| | Ladera moderada convexa y muy inclinada (Lmcxmi) | Se localizan al sur después de cruzar la quebrada Magallo por el barrio Salazar. |
| | Ladera moderada irregular y abrupta (Lmia) | Representan las zonas bajas del casco urbano y se puede evidenciar un escalonamiento en estas, sin embargo no es posible definir si son flujos o suelos debido a que no hay presencia de afloramientos. |

| LADERAS | | |
|-----------------------|---|---|
| Longitud | Geoforma | Localización |
| | Ladera moderada irregular y muy abrupta (Lmima) | Se encuentran principalmente bordeando la quebrada Magallo a la altura del barrio Peñitas y la cancha, además, hay algunos movimientos de masa asociados a esta unidad. |
| | Ladera moderada irregular y muy inclinada (Lmimi) | Localizada en la salida hacia Betulia, después de pasar el barrio peñitas. |
| | Ladera moderada recta y abrupta (Lmra) | Corresponde gran parte del flanco Este del cerro en el que se ubica la antena de radio, en la zona conocida como La Manguita. |
| | Ladera moderada recta y muy inclinada (Lmrmi) | Ubicada en la zona sur del barrio Salazar en el margen izquierdo de la quebrada Magallo. |
| Laderas largas | Ladera larga cóncava e inclinada (Llci) | Esta ladera se ubica sobre la salida hacia el sector conocido como el Alto y se asocia uno de los movimientos en masa más grandes que se presentan en el municipio. |
| | Ladera larga cóncava y abrupta (Llca) | Está ubicada en la parte sur del barrio Ernesto Garcés. |
| | Ladera larga cóncava y muy inclinada (Llcmi) | Estas contienen todo el barrio El Guamo y gran parte del barrio Salazar. |
| | Ladera larga cóncava y suave (Llcs) | Esta ladera corresponde a una superficie relativamente plana y está delimitada por otras laderas más inclinadas. A su vez contiene todo el barrio Hoyo Caliente. |
| | Ladera larga convexa e inclinada (Llcsi) | Se ubica en la vía hacia el barrio Salazar, en la margen izquierda del caño La |

| LADERAS | | |
|-----------------|--|---|
| Longitud | Geoforma | Localización |
| | | Chucha. |
| | Ladera larga convexa y muy abrupta (Llcxma) | Es una ladera que abarca desde el barrio Peñitas hasta uno de los costados de la cancha municipal por la vía que conduce al barrio La Cordialidad. |
| | Ladera larga irregular e inclinada (Llii) | Se ubica sobre el sector conocido como la quinta, al sur del nacimiento del caño La Chucha. |
| | Ladera larga irregular y abrupta (Llia) | Corresponde a las partes altas del municipio y contiene gran parte del barrio Hoyo Frío, esta contiene varios de los nacimientos de agua del municipio. |
| | Ladera larga irregular y muy abrupta (Llima) | Se ubica en la parte más alta del municipio, justo al noroeste del barrio Hoyo Frío. |
| | Ladera larga irregular y muy inclinada (Llimi) | Presenta la división de la zona central del municipio con el barrio Hoyo Frío y está asociada al cambio de pendiente de un depósito. |
| | Ladera larga recta y muy abrupta (Llrma) | Corresponde a todo el flanco Este del municipio y limita la pendiente suave del barrio Hoyo Caliente. |

b. Lomos

Corresponde a un grupo de unidades que hacen parte de un ambiente denudacional, las cuales se disponen perpendiculares a las direcciones de los canales y flujos de agua y no superan alturas de más de 250 metros relativas al punto más bajo de la unidad (Gamboa

et al., 2017). Estos sistemas varían en su forma según los procesos a los que han estado expuestos y a las tasas de levantamiento de la zona.

Las diferentes morfologías presentes, al igual que en todas las unidades existentes se clasifican en función de su longitud, forma y pendiente (Tabla 4). A partir de esto se pueden inferir e interpretar distancias a la fuente y los agentes que han moldeado el relieve.

Tabla 4. Descripción geomorfológica: lomos.

| LOMOS | | |
|------------------|--|---|
| Longitud | Geoforma | Localización |
| Cortas | Lomos de laderas cortas convexas y abruptas (Llccxa) | Están ubicados en la margen izquierda de la vía de entrada al municipio, entre el cementerio y el sector conocido como el volcán. A esta geoforma se asocian algunos movimientos en masa. |
| Moderadas | Lomos de laderas moderadas irregulares y abruptas (Llmia) | Contiene la zona alta del barrio El Porvenir y corresponde a un sistema de ondulaciones irregulares. |
| Largas | Lomos de laderas largas cóncavas e inclinadas (Lllci) | Ubicada en la zona sureste del municipio, sobre el margen derecho de la vía principal de ingreso, antes del barrio El Porvenir. |
| | Lomos de laderas largas cóncavas y muy inclinadas (Lllcmi) | Al igual que la anterior geoforma, se encuentra en la vía principal de ingreso al municipio, a aproximadamente 1 kilómetro del parque principal. |

c. Superficies de depósito

Superficies correspondientes a la acumulación de materiales provenientes de procesos como lo son flujos de lodos y escombros. La forma que presentan estas superficies son de pendientes suaves, lo cual demuestra el asentamiento de materiales con el cambio de pendiente y pérdida de energía a la vez que se aleja de sus áreas fuentes; las cuales corresponden a los afloramientos rocosos de la Formación Barroso. De igual forma estos depósitos presentan un retrabajamiento y moldeado posterior a su deposición que puede ser observado en los grados de incisión de los afluentes que discurren por ellos (Tabla 5).

Tabla 5. Descripción geomorfológica: Superficies de depósito.

| SUPERFICIES DE DEPÓSITO | | |
|--------------------------------|--|---|
| Longitud | Geoforma | Localización |
| Corta | Superficie de depósito corta irregular y muy inclinada, (Sdcimi) | Se localiza en la entrada del municipio, frente al cementerio. Por fotointerpretación y análisis de geomorfología puede corresponder a un antiguo movimiento en masa. |
| | Superficie de depósito corta irregular y suave, (Sdcis) | Consiguiente a la geoforma anterior, esta contiene al cementerio municipal y demarca el cambio de pendiente respecto a las laderas que se encuentran a una mayor altura. |
| Moderada | Superficie de depósito moderada irregular e inclinada, (Sdmii) | Esta se localiza en la zona sur del casco urbano, agrupando zona baja del barrio central y alargándose hasta el principio del barrio La Amelí. Esta superficie de depósito y las siguientes presentan un escalonamiento el cual esta demarcado por cambios de pendiente que se suavizan en cada depósito. |

| SUPERFICIES DE DEPÓSITO | | |
|--------------------------------|--|--|
| Longitud | Geoforma | Localización |
| Larga | Superficie de depósito larga cóncava y muy inclinada, (sdlcmi) | Contiene la zona central del pueblo e inicia en el cambio de pendiente que se da en el pie del cerro conocido como El Alto de la Cruz. |
| | Superficie de depósito larga irregular e inclinada, (sdlii) | Estas corresponden a unidades de mayor tamaño las cuales presentan pendientes más suaves que las de la zona central del pueblo y se ubican al sur, entre los barrios La Amelí y El Salazar. |
| | Superficie de depósito larga recta e inclinada, (sdlri) | Contiene en su mayoría al barrio La Amelí y al igual que las geoformas anteriores presenta una menor pendiente que las que están en la zona alta y central del municipio. |
| | Superficie de depósito larga recta y muy inclinada, (Sdlrmi) | Esta superficie se encuentra en el barrio Hoyo Frío y es de las que presenta mayor pendiente, a su vez contiene algunos de los nacimientos de agua provenientes de la infiltración que se da en zonas más altas de la montaña. |
| | Superficie de depósito larga recta y suave, (Sdlrs) | Esta superficie se da sobre el margen derecho de la quebrada Magallo, justo después de pasar el barrio Salazar. Tiene una pendiente suave y su origen es aluvial. |

d. Topes

Corresponden a superficies sobre las cuales finalizan laderas o sistemas de lomos, estos son redondeados y de pendientes muy suaves a suaves. Además, estos pueden ser redondeados o alargados (Tabla 6).

Tabla 6. Descripción geomorfológica: Topes.

| TOPES | | |
|-----------------|---------------------------------------|---|
| Longitud | Geoforma | Localización |
| Corto | Tope corto redondeado y suave, (Tcrs) | Corresponde a la parte superior de un grupo de laderas y lomos ubicados al sur del barrio Salazar, pasando la quebrada Magallo. |

e. Intervenciones antrópicas

Son superficies las cuales han obtenido una morfología producto de las intervenciones humanas para el desarrollo de obras estructurales e ingenieriles para la disposición de centros institucionales, deportivos y de salud. Las intervenciones más notorias en el área corresponden a explanaciones y excavaciones para el trazado de vías y asentamiento de las edificaciones anteriormente mencionadas. Estas se realizan a partir de llenos y cortes de laderas, dando lugar a taludes empinados con superficies planas en su base (Tabla 7). Las intervenciones de mayor tamaño contienen al hospital San Juan de Dios, la cancha municipal, el colegio de Jesús, la piscina municipal y las vías de acceso al municipio.

Tabla 7. Descripción geomorfológica: Intervenciones antrópicas.

| INTERVENCIONES ANTROPICAS | |
|----------------------------------|---|
| Geoforma | Localización |
| Superficie de explanación, (Se) | Sobre estas se ubican determinadas obras civiles como lo son el colegio, el hospital y los cortes para algunas vías, a su vez establecimientos deportivos como la cancha municipal. |

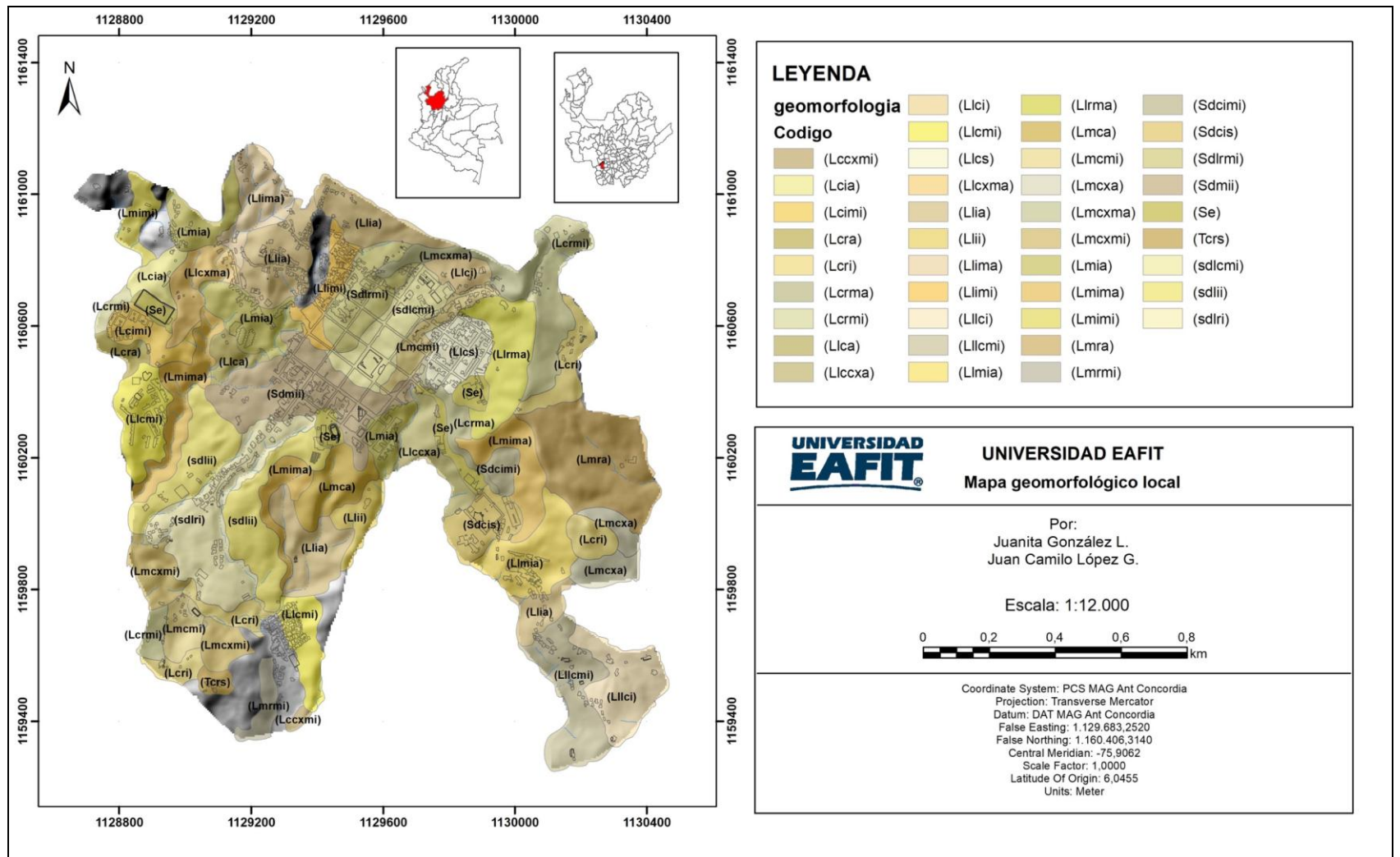


Figura 18 Mapa de geomorfología del área urbana de Concordia Antioquia.

10 ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación, se describen las tomografías obtenidas, la ubicación dentro del área de estudio (Figura 19) y los resultados arrojados a partir del proceso de inversión de cada una de estas:

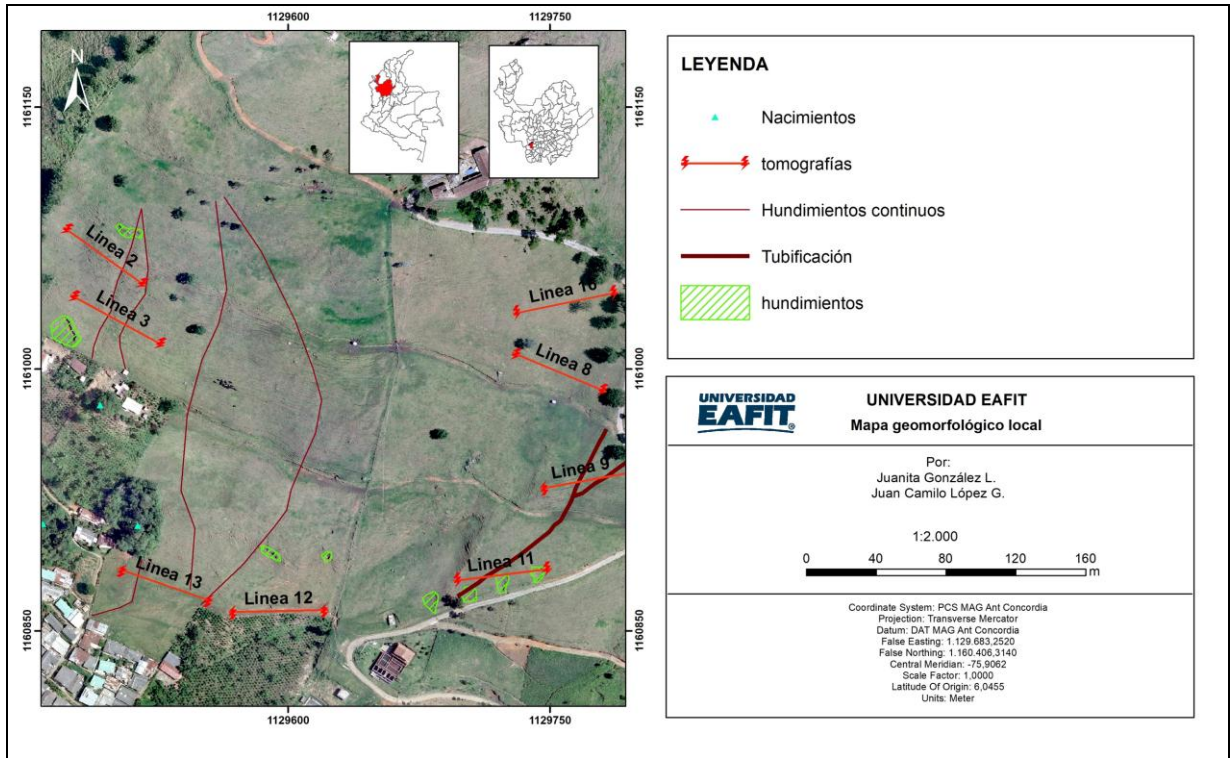


Figura 19. ubicación de las tomografías.

10.1 TER-2-SCH

La línea está ubicada en zona noroccidente del área de estudio (Figura 19). Esta línea cuenta con un total de 30 electrodos y un espaciado entre estos de 2 metros, obteniendo así una línea con una longitud de 60 metros. Con una dirección de 138° , la línea se encuentra perpendicular al sentido de la pendiente con el fin de observar los cambios laterales a través de esta. El modelo utilizado y presentado a continuación es el arreglo Schlumberger.

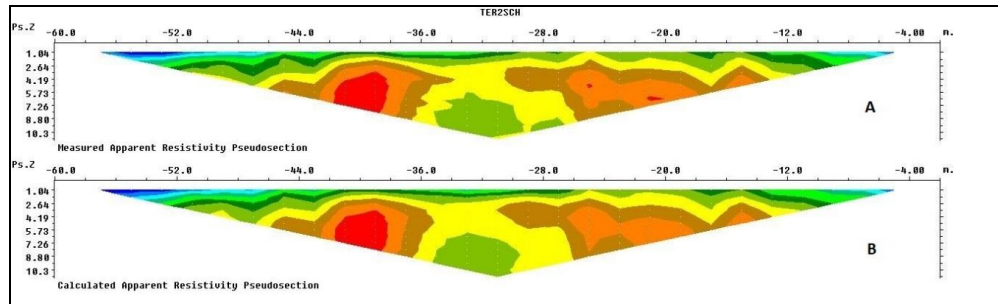


Figura 20. Perfiles de resistividades aparentes (A) resistividad aparente medida (B) resistividad aparente calculada. Tomada del software Res2DInv a partir de los resultados obtenidos.

En la Figura 20 podemos observar las pseudosecciones A y B, correspondientes al perfil de resistividad aparente medida y resistividad aparente calculada, respectivamente. Con base en los valores de resistividad aparente y en la configuración geométrica de estos se pueden establecer los parámetros de inversión para finalmente llegar al perfil aproximado de resistividad real y con esto realizar la debida interpretación.

Como se evidencia en el perfil A, los niveles más someros conservan una geometría lateral de isovalores de resistividad aparente medida y a medida que la profundidad aumenta se curvan hacia la vertical, lo cual nos define los valores a usar en los filtros de horizontalidad de la pseudosección. Una vez llevada a cabo la inversión con los parámetros definidos con anterioridad a partir de la pseudosección de resistividad aparente, se obtienen los resultados que son presentados en la Figura 21.

```
TER2SCH
Electrode spacing is 2.000.
Wenner-Schlumberger array
No user defined model depths.
Total number of datum points is 196.
Position of mid-point of array is given.
196 -31.000 2.000 14.000 1457.2
Electrode locations are -60.00 and -56.00.
Minimum and maximum electrode locations are -60.00 and -2.00.
Minimum and maximum electrode locations are -60.0 and -2.0.
Line length is 58.0.
Minimum electrode spacing is 2.0.
Sorting data points.
Number of data levels is 14.
Number of electrodes is 30.
Reading inversion results.
The model has 23 layers and 345 blocks.
Iteration 1 : RMS error 14.09.
Iteration 2 : Abs. error 4.50.
Iteration 3 : Abs. error 3.32.
Iteration 4 : Abs. error 3.07.
Iteration 5 : Abs. error 2.99.
Iteration 6 : Abs. error 2.95.
Reference resistivity used is 1470.619
Topographical data present in inversion file.
Damped topography was incorporated into inversion model.
Blocks sensitivity information present.
Average sensitivity is 1.382.
Inversion constraints information present.
```

Figura 21. Resultados de la inversión para la TER2SCH. Tomada del software Res2DInv

En la Figura 21 se compilan cada uno de los factores importantes que fueron resultado del modelo inverso. Se tuvo un total de 196 puntos de datos, los cuales se distribuyeron en 14 niveles verticales. El modelo a su vez cuenta con 23 capas y 345 bloques. El número de iteraciones llevadas a cabo hasta alcanzar la convergencia del modelo fueron 6, esta convergencia se logró con un cambio en el error absoluto de 0,4.

Como resultado de los procesos anteriores se obtiene el perfil de resistividad real (Figura 22). Se debe tener en cuenta que las resistividades reales en este modelo son aproximadas y nunca exactas.

Interpretación:

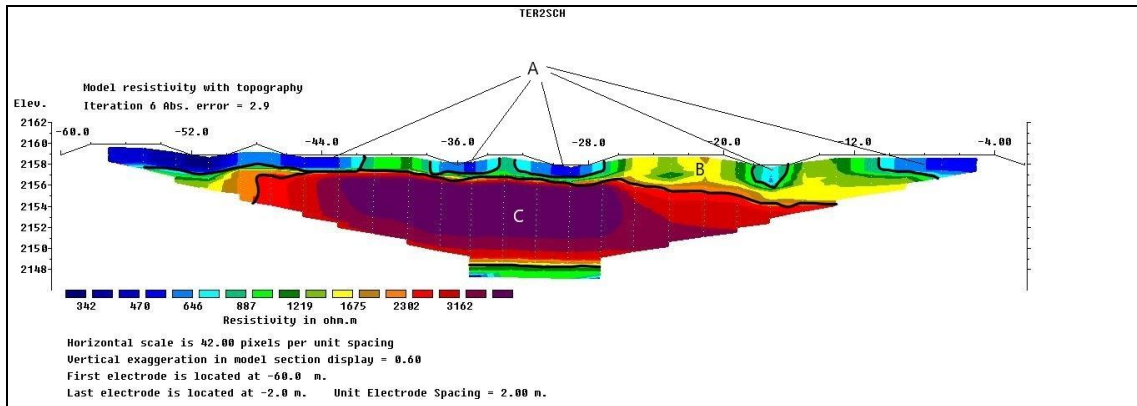


Figura 22. Interpretación de la tomografía TER2SCH

- A. Corresponde a los puntos de interés, con resistividades entre 342 y 646 ohm-m aproximadamente, corresponden a los puntos de menor resistividad del perfil y se caracterizan como material limo-arenosos propensos a flujos de agua.
- B. Las resistividades para estos puntos varían entre 887 y 1675 ohm-m. Basados en los valores de resistividad, la geología de superficie y el fuerte aumento de la resistividad respecto a la zona C se interpreta como un depósito de escombros y bloques no saturado sobre rocas de Formación Barroso
- C. Con un intervalo de resistividad entre 2302 y 3162 ohm-m, se interpreta como rocas pertenecientes a la Formación Barroso y basados en afloramientos cercanos, se describen como basaltos verdes oceánicos.

10.2 TER-3-WEN

La línea está ubicada en zona noroccidente del área de estudio (Figura 19). Cuenta con un total de 30 electrodos y un espaciado entre estos de 2 metros, obteniendo así una línea con una longitud de 60 metros. Con dirección de 128°, la línea se encuentra perpendicular al sentido de la pendiente con el fin de observar los cambios laterales a través de esta. El modelo utilizado y presentado a continuación es el arreglo Wenner

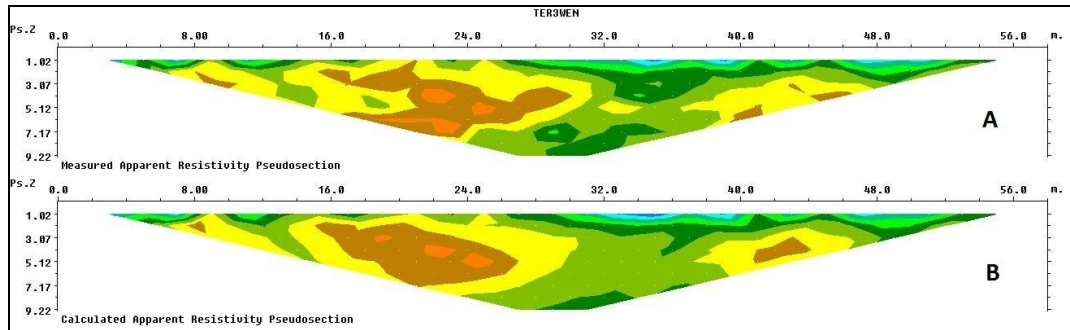


Figura 23. perfiles de resistividades aparentes (A) resistividad aparente medida (B) resistividad aparente calculada. Tomada del software Res2DInv a partir de los resultados obtenidos.

En el perfil A de la Figura 23, el cual corresponde a la pseudosección de resistividad aparente medida, se puede observar la distribución espacial en profundidad de la resistividad aparente. Esta conserva elongaciones horizontales en general y un aumento de la resistividad en la mitad izquierda de la pseudosección. De igual manera, la pseudosección B conserva el mismo patrón de resistividades, con cambios parciales en esta. Una vez llevada a cabo la inversión con los parámetros definidos con anterioridad a partir de la pseudosección de resistividad aparente, se obtienen los resultados que son presentados en la Figura 24.

```

TER3WEN
Electrode spacing is 2.000.
Wenner array
No user defined model depths.
Total number of datum points is 135.
Position of mid-point of array is given.
135 31.000 18.000 723.2
Electrode locations are 0.00 and 4.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 58.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.0 and 58.0.
Line length is 58.0.
Minimum electrode spacing is 2.0.
Sorting data points.
Number of data levels is 9.
Number of electrodes is 30.
Reading inversion results.
The model has 19 layers and 319 blocks.
Iteration 1 : RMS error 13.36.
Iteration 2 : Abs. error 7.68.
Iteration 3 : Abs. error 6.53.
Iteration 4 : Abs. error 6.05.
Iteration 5 : Abs. error 5.84.
Iteration 6 : Abs. error 5.73.
Reference resistivity used is 884.161
Topographical data present in inversion file.
Damped topography was incorporated into inversion model.
Blocks sensitivity information present.
Average sensitivity is 0.792.
Inversion constraints information present.

```

Figura 24. Resultados de la inversión para la TER3WEN. Tomada del software Res2DInv

Para esta inversión se tuvo un total de 135 puntos de datos, los cuales se distribuyeron en 9 niveles verticales de datos. Además de esto, el modelo contó con 19 capas y 319 bloques. El número de iteraciones necesarias para alcanzar la convergencia del modelo fue de 6, con una variación en el error absoluto de 0,11%. Posterior a la inversión, se incluyó la información topográfica del perfil. Finalmente se llega al perfil aproximado de resistividad real (Figura 25) y con esto realizar la debida interpretación

Interpretación:

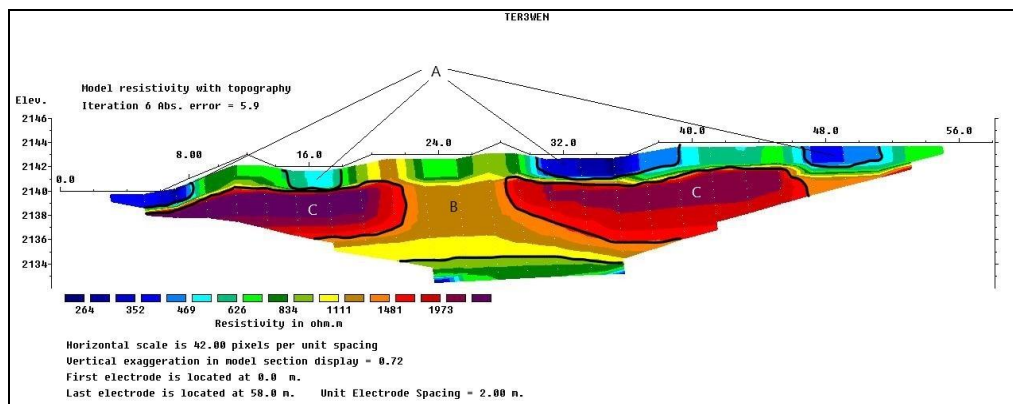


Figura 25. Interpretación de la tomografía TER3WEN

- A. Las resistividades para esta zona varían entre 264 y 469 ohm-m, corresponden a los puntos de mayor interés, con las menores resistividades del perfil lo cual evidencia las zonas de mayor humedad que son causadas por posibles flujos de agua infiltrada.
- B. Con un rango de resistividades entre 626 y 1481 ohm-m, esta zona se interpreta como producto de la meteorización diferencial de los bloques caracterizados en la zona C. Espacialmente esta zona se concentra en centro del perfil y hacia la base se extiende lateralmente.
- C. Esta zona presenta resistividades de 1481 y 1973 ohm-m. Se interpreta como bloques provenientes de la Formación Barroso de composición basáltica oceánica, con geometría alargada.

10.3 TER-8-WEN

La línea está ubicada en zona nororiente del área de estudio (Figura 19). Cuenta con un total de 30 electrodos, un espaciado entre estos de 2 metros, obteniendo así una línea con una longitud de 60 metros. Con dirección de 116°, la línea se encuentra perpendicular al sentido de la pendiente con el fin de observar los cambios laterales a través de esta. El modelo utilizado y presentado a continuación es el arreglo Wenner

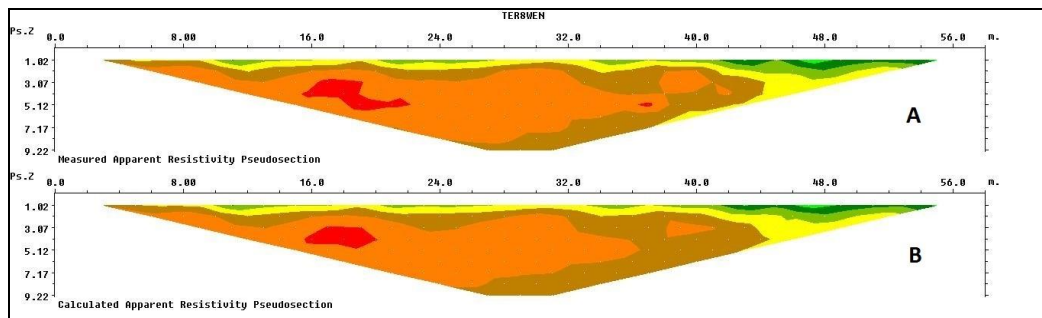


Figura 26. *perfiles de resistividades aparentes (A) resistividad aparente medida (B) resistividad aparente calculada. Tomada del software Res2DInv a partir de los resultados obtenidos.*

En la Figura 26, correspondiente a los perfiles de resistividad aparente medida y calculada, podemos observar cómo se conserva una homogeneidad general de los valores de resistividad aparente que se extienden por gran parte de la pseudosección. Partiendo de estos valores similares que conservan un patrón horizontal distribuido por el perfil, se definieron valores de mayor peso para los filtros de horizontalidad, aumentando así nuestra resolución en cuanto a estructuras buscadas. Posteriormente, una vez realizada la inversión con los parámetros anteriormente definidos, se obtiene el perfil aproximado de resistividad real (Figura 28).

Además, en la siguiente tabla se presentan los resultados del cálculo realizado durante la inversión y los parámetros que la conforman la Figura 27.


```

TER8WEN
Electrode spacing is 2.000.
Wenner array
No user defined model depths.
Total number of datum points is 135.
Position of mid-point of array is given.
135 31.000 18.000 546.9
Electrode locations are 0.00 and 4.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 58.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.0 and 58.0.
Line length is 58.0.
Minimum electrode spacing is 2.0.
Sorting data points.
Number of data levels is 9.
Number of electrodes is 30.
Reading inversion results.
The model has 19 layers and 319 blocks.
Iteration 1 : RMS error 8.33.
Iteration 2 : Abs. error 4.17.
Iteration 3 : Abs. error 3.29.
Iteration 4 : Abs. error 3.00.
Iteration 5 : Abs. error 2.92.
Iteration 6 : Abs. error 2.88.
Iteration 7 : Abs. error 2.87.
Reference resistivity used is 556.943
Topographical data present in inversion file.
Damped topography was incorporated into inversion model.
Blocks sensitivity information present.
Average sensitivity is 0.788.
Inversion constraints information present.

```

Figura 27. Resultados de la inversión para la TER8WEN. Tomada del software Res2DInv

Al igual que en la tomografía anterior, en esta se obtuvo un total de 135 puntos de datos, 9 niveles verticales y un modelo de 19 capas y 319 bloques. Se llevaron a cabo un total de 7 iteraciones para alcanzar la convergencia del modelo, el error absoluto en esta última iteración fue de 2,87%, que en comparación con el error de 2,88 % en la sexta iteración, nos indica la convergencia de la inversión. Este perfil no cuenta con datos de elevación topográfica.

Interpretación:

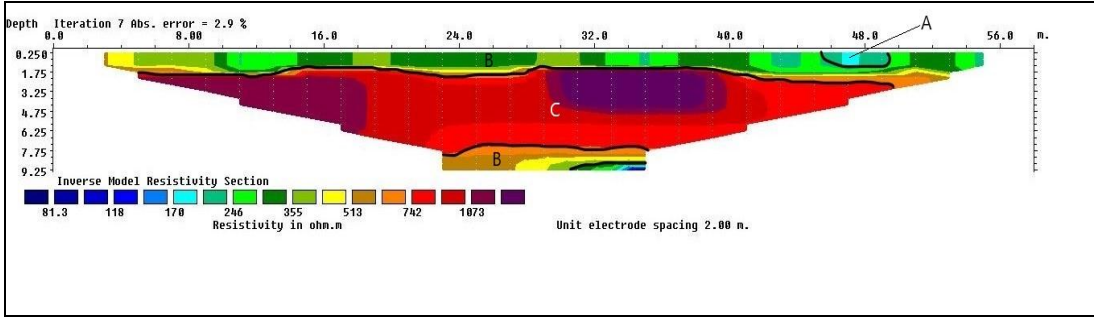


Figura 28. Interpretación de la tomografía TER8-WEN

- A. Se observan resistividades entre 170 y 246 ohm-m aproximadamente. Esta corresponde a la única zona en este perfil donde se presentan bajas resistividades que concuerdan con las zonas preferenciales de flujo de agua. Sin embargo, al no tener un perfil topográfico no se evidencia claramente si concuerda con las áreas de tubificación.
- B. Presenta resistividades entre 246 y 513 ohm-m, corresponde a una capa superficial caracterizada como suelos de la Formación Barroso y una capa hacia la base del perfil que corresponde a roca meteorizada, con mayor grado de meteorización que la zona C.
- C. Con un intervalo de resistividades entre 742 y 1073 ohm-m, se interpreta como basaltos pertenecientes a la Formación Barroso.

10.4 TER-9-WEN

La línea está ubicada en zona suroriente del área de estudio (Figura 19). Cuenta con un total de 30 electrodos y un espaciado entre estos de 2 metros, obteniendo así una línea con una longitud de 60 metros. Con dirección de 082°, la línea se encuentra perpendicular al sentido de la pendiente con el fin de observar los cambios laterales a través de esta. El modelo utilizado y presentado a continuación es el arreglo Wenner

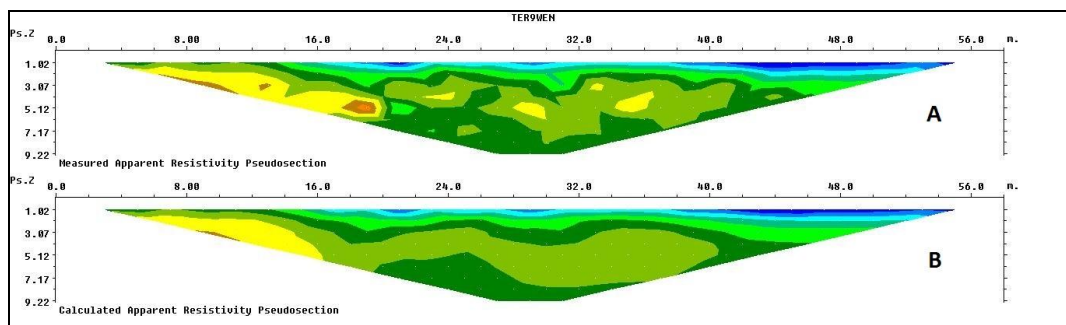


Figura 29. perfiles de resistividades aparentes (A) resistividad aparente medida (B) resistividad aparente calculada. Tomada del software Res2DInv a partir de los resultados obtenidos.

En el perfil A de la Figura 29 que corresponde a la pseudosección de resistividad aparente medida, se observa un patrón de resistividad distribuido horizontalmente y redondeado, esto conlleva a una prevalencia en los valores de peso de los filtros horizontales. En el perfil B, que corresponde a la pseudosección de resistividad aparente calculada, se conserva el patrón horizontal en los valores de resistividad, sin embargo, a diferencia del perfil de

resistividad aparente medida no se presenta redondez en los contornos de isovalores de resistividad.

```
TER9WEN
Electrode spacing is 2.000.
Wenner array
No user defined model depths.
Total number of datum points is 135.
Position of mid-point of array is given.
135 31.000 18.000 560.9
Electrode locations are 0.00 and 4.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 58.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.0 and 58.0.
Line length is 58.0.
Minimum electrode spacing is 2.0.
Sorting data points.
Number of data levels is 9.
Number of electrodes is 30.
Reading inversion results.
The model has 19 layers and 319 blocks.
Iteration 1 : RMS error 11.06.
Iteration 2 : Abs. error 6.07.
Iteration 3 : Abs. error 5.25.
Iteration 4 : Abs. error 5.03.
Reference resistivity used is 532.442
Topographical data present in inversion file.
Damped topography was incorporated into inversion model.
Blocks sensitivity information present.
Average sensitivity is 0.775.
Inversion constraints information present.
```

Figura 30. Resultados de la inversión para la TER9WEN. Tomada del software Res2DInv.

En esta tomografía se conservan valores y parámetros similares a las anteriores inversiones. En la Figura 30, se muestran los resultados con un total de 135 puntos de datos, un número de 9 niveles distribuidos en la vertical y 19 capas con 319 bloques.

A diferencia de las anteriores tomografías, el número de iteraciones necesarias para alcanzar la convergencia en la inversión fue menor, con un total de 5 iteraciones y un error absoluto de 5,03%.

Posteriormente al llevar a cabo la inversión con los parámetros definidos se obtiene el perfil de resistividad real (Figura 31).

Interpretación:

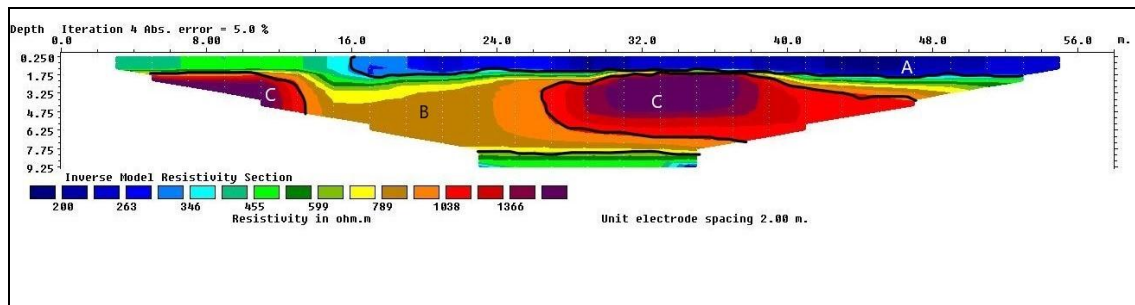


Figura 31. Interpretación de la tomografía TER9WEN

- A. La zona presenta resistividades entre 200 y 263 ohm-m, los cuales corresponden a una capa superficial alargada con los valores más bajos de resistividad del perfil, lo cual indica una posible saturación y un material arenoso con presencia de gravas.
- B. Presenta resistividades entre 346 y 789 ohm-m y corresponde a una capa de depósito de escombros, no saturada, con presencia de bloques descritos en la zona C.
- C. Esta zona corresponde a bloques de composición basáltica, poco meteorizados, provenientes de la Formación Barroso, presenta resistividades entre 1038 y 1366 ohm-m.

10.5 TER-11-WEN

La línea está ubicada en zona suroriente del área de estudio (Figura 19). Cuenta con un total de 30 electrodos espaciados 2 metros entre ellos, obteniendo una línea con longitud de 60 metros. Se realizó con una dirección de 80° y se encuentra perpendicular al sentido de la pendiente, con el fin de observar los cambios laterales a través de esta. El modelo utilizado y presentado a continuación es el arreglo Wenner.

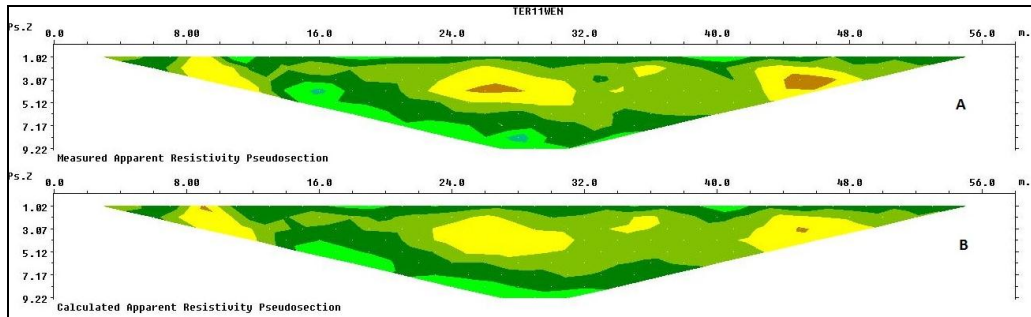


Figura 32. perfiles de resistividades aparentes (A) resistividad aparente medida (B) resistividad aparente calculada. Tomada del software Res2DInv a partir de los resultados obtenidos.

En la Figura 32 se observan las pseudosecciones A y B, donde A corresponde al perfil de resistividad aparente medida y B corresponde a resistividad aparente calculada, respectivamente. Con base en los valores de resistividad aparente y en la configuración geométrica de estos se pudieron establecer los parámetros de inversión para finalmente llegar al perfil aproximado de resistividad real y con esto realizar la debida interpretación. Como se observa en el perfil A, en todos los niveles se conserva primordialmente una geometría lateral de isovalores de resistividad aparente medida, lo cual nos define los valores a usar en los filtros de horizontalidad de la pseudosección. Una vez llevada a cabo la inversión con los parámetros definidos, a partir de la pseudosección de resistividad aparente, se obtienen los resultados que son presentados en la Figura 33.

```

TER11WEN
Electrode spacing is 2.000.
Wenner array
No user defined model depths.
Total number of datum points is 135.
Position of mid-point of array is given.
135 31.000 18.000 444.7
Electrode locations are 0.00 and 4.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 58.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.0 and 58.0.
Line length is 58.0.
Minimum electrode spacing is 2.0.
Sorting data points.
Number of data levels is 9.
Number of electrodes is 30.
Reading inversion results.
The model has 19 layers and 319 blocks.
Iteration 1 : RMS error 14.89.
Iteration 2 : Abs. error 8.00.
Iteration 3 : Abs. error 6.82.
Iteration 4 : Abs. error 6.28.
Iteration 5 : Abs. error 5.68.
Iteration 6 : Abs. error 5.41.
Reference resistivity used is 565.078
Topographical data present in inversion file.
Damped topography was incorporated into inversion model.
Blocks sensitivity information present.
Average sensitivity is 0.831.
Inversion constraints information present.

```

Figura 33. Resultados de la inversión para la TER11WEN. Tomada del software Res2DInv

En la Figura 33, se compilan cada uno de los factores importantes que fueron resultado del modelo inverso. Se tuvo un total de 135 puntos de datos, los cuales se distribuyeron en 9 niveles verticales. El modelo a su vez cuenta con 19 capas y 319 bloques. El número de iteraciones llevadas a cabo hasta alcanzar la convergencia del modelo fueron 6, esta convergencia se logró con un cambio en el error absoluto de 5,4.

Como resultado de los procesos anteriores se obtiene el perfil de resistividad real (Figura 34). Se debe tener en cuenta que las resistividades reales en este modelo son aproximadas y nunca exactas.

Interpretación:

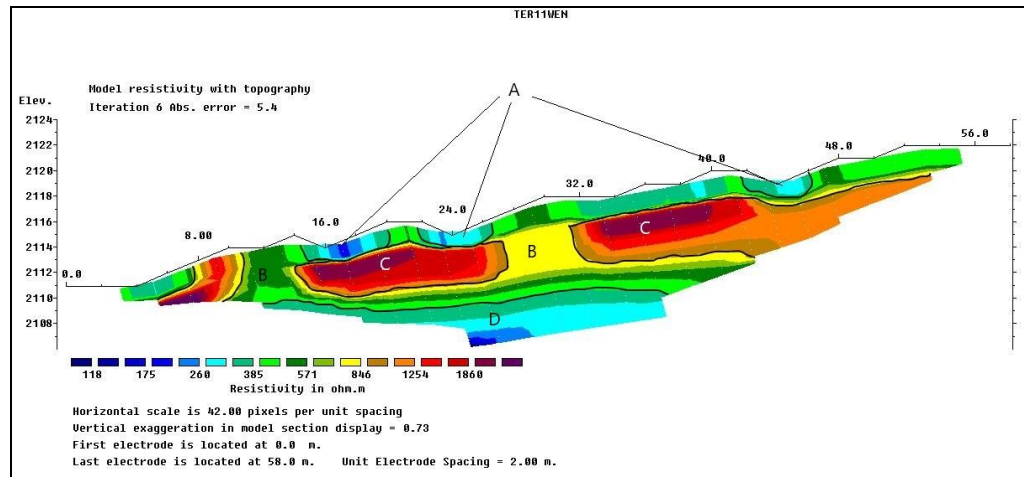


Figura 34. Interpretación de la tomografía TER11WEN.

- A. Corresponde a las zonas someras con bajos valores de resistividad que varían entre 118 y 385 ohm-m aproximadamente, estas corresponden a zonas saturadas o zonas preferenciales de flujo. Hacen parte de la capa superficial de un depósito de bloques y escombros.
- B. Con un intervalo de resistividades entre 385 y 846 ohm-m, se interpreta esta zona como un depósito escombros no saturado con presencia de bloques descritos en la zona C.
- C. Esta zona corresponde a los bloques que conforman el depósito de escombros y bloques, de composición basáltica, característicos de la Formación Barroso, con valores de resistividad que varían entre 1254 y 1860 ohm-m.

- D. Se observa un decaimiento de la resistividad en profundidad, con resistividades entre 118 y 385 ohm-m, lo cual puede indicar una mayor permeabilidad del depósito y por lo tanto un mayor grado de saturación.

10.6 TER-12-WEN

La línea está ubicada en zona suroccidente del área de estudio (Figura 19). Cuenta con un total de 30 electrodos espaciados 2 metros entre ellos, obteniendo una línea con longitud de 60 metros. Se realizó con una dirección de 278° y se encuentra perpendicular al sentido de la pendiente, con el fin de observar los cambios laterales a través de esta. El modelo utilizado y presentado a continuación es el arreglo Wenner.

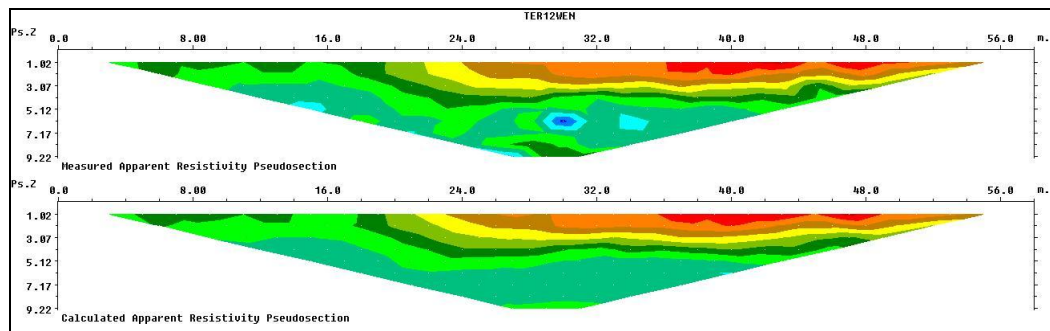


Figura 35. Perfiles de resistividades aparentes (A) resistividad aparente medida (B) resistividad aparente calculada. Tomada del software Res2DInv a partir de los resultados obtenidos.

En la Figura 35 se observan las pseudosecciones A y B, donde A corresponde al perfil de resistividad aparente medida y B corresponde a resistividad aparente calculada, respectivamente. Con base en los valores de resistividad aparente y en la configuración geométrica de estos se pudieron establecer los parámetros de inversión para finalmente llegar al perfil aproximado de resistividad real y con esto realizar la debida interpretación.

En el perfil A se observan algunas zonas levemente horizontales, siendo más evidentes entre 16 y 24 m de distancia entre electrodos, sin embargo, se conserva primordialmente una geometría lateral de isovalores de resistividad aparente medida, lo cual nos define los valores a usar en los filtros de horizontalidad de la pseudosección. Una vez llevada a cabo la inversión con los parámetros definidos, a partir de la pseudosección de resistividad aparente, se obtienen los resultados que son presentados en la Figura 36.

```
TER12WEN
Electrode spacing is 2.000.
Wenner array
No user defined model depths.
Total number of datum points is 135.
Position of mid-point of array is given.
135 31.000 18.000 370.3
Electrode locations are 0.00 and 4.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 58.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.0 and 58.0.
Line length is 58.0.
Minimum electrode spacing is 2.0.
Sorting data points.
Number of data levels is 9.
Number of electrodes is 30.
Reading inversion results.
The model has 19 layers and 319 blocks.
Iteration 1 : RMS error 21.13.
Iteration 2 : Abs. error 11.94.
Iteration 3 : Abs. error 10.21.
Iteration 4 : Abs. error 9.39.
Iteration 5 : Abs. error 8.72.
Iteration 6 : Abs. error 8.19.
Iteration 7 : Abs. error 7.81.
Iteration 8 : Abs. error 7.51.
Reference resistivity used is 385.896
Topographical data present in inversion file.
Damped topography was incorporated into inversion model.
Blocks sensitivity information present.
Average sensitivity is 0.905.
Inversion constraints information present.
```

Figura 36. Resultados de la inversión para la TER12WEN. Tomada del software Res2DInv

En la Figura 36, se compilan cada uno de los factores importantes que fueron resultado del modelo inverso. Se tuvo un total de 135 puntos de datos, los cuales se distribuyeron en 9 niveles verticales. El modelo a su vez cuenta con 19 capas y 319 bloques. El número de iteraciones llevadas a cabo hasta alcanzar la convergencia del modelo fueron 8, esta convergencia se logró con un cambio en el error absoluto de 7,5

Como resultado de los procesos anteriores se obtiene el perfil de resistividad real (Figura 37). Se debe tener en cuenta que las resistividades reales en este modelo son aproximadas y nunca exactas.

Interpretación

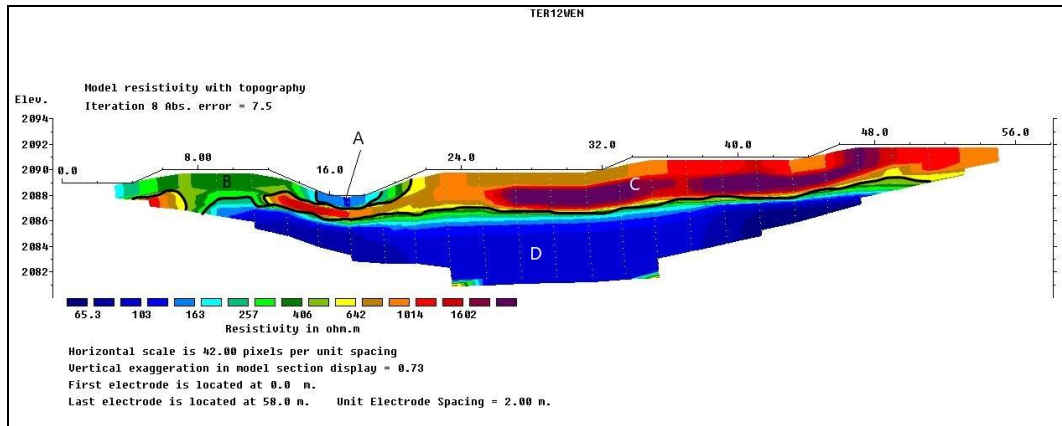


Figura 37. Interpretación de la tomografía TER12WEN

- Zona de baja resistividad, con valores entre 103 y 163 ohm-m. Se define como una zona preferencial de flujo de agua. Presenta una litología limo-arenosa.
- Esta zona presenta resistividades entre 257 y 406 ohm-m, no se encuentra saturada y corresponde a un depósito de escombros.
- presenta las mayores resistividades del perfil, entre 642 y 1602 ohm-m. Hace parte del depósito de escombros mencionado en la zona B, sin embargo, a partir de las observaciones hechas en campo se evidencio una alta compactación y sin ningún grado de saturación, lo cual concuerda con los altos valores de resistividad.
- Se observa en esta zona los valores más bajos de resistividad del perfil, con un intervalo entre 65,3 y 163 ohm-m aproximadamente. En el área de la tomografía se da un cambio de pendiente en el relieve lo cual indica una zona de mayor saturación, adicionando que en las cercanías de la línea se encuentra un nacimiento de agua, por lo tanto, la zona D corresponde a depósito de escombros saturado.

10.7 TER-13-SCH

La línea está ubicada en zona suroccidente del área de estudio (Figura 19). Cuenta con un total de 30 electrodos espaciados 2 metros entre ellos, obteniendo una línea con longitud de 60 metros. Se realizó con una dirección de 289° y se encuentra perpendicular al sentido de

la pendiente, con el fin de observar los cambios laterales a través de esta. El modelo utilizado y presentado a continuación es el arreglo Schlumberger.

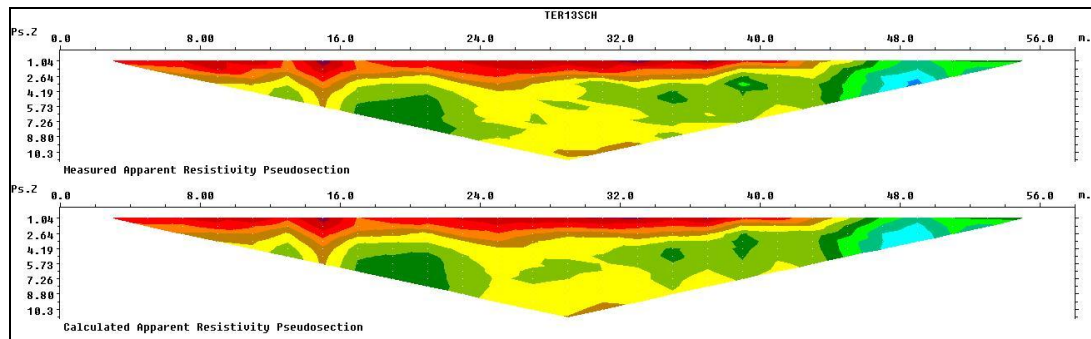


Figura 38. Perfiles de resistividades aparentes (A) resistividad aparente medida (B) resistividad aparente calculada. Tomada del software Res2DInv a partir de los resultados obtenidos.

En la Figura 38 se observan las pseudosecciones A y B, donde A corresponde al perfil de resistividad aparente medida y B corresponde a resistividad aparente calculada, respectivamente. Con base en los valores de resistividad aparente y en la configuración geométrica de estos se pudieron establecer los parámetros de inversión para finalmente llegar al perfil aproximado de resistividad real y con esto realizar la debida interpretación. Como se observa en el perfil A, en todos los niveles se observa una geometría levemente horizontal de isovalores, lo cual nos define los valores a usar en los filtros de horizontalidad de la pseudosección. Una vez llevada a cabo la inversión con los parámetros definidos, a partir de la pseudosección de resistividad aparente, se obtienen los resultados que son presentados en la Figura 39.

```
TER13SCH
Electrode spacing is 2.000.
Wenner-Schlumberger array
No user defined model depths.
Total number of datum points is 196.
Position of mid-point of array is given.
196 29.000 2.000 14.000 337.1
Electrode locations are 0.00 and 4.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 58.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.0 and 58.0.
Line length is 58.0.
Minimum electrode spacing is 2.0.
Sorting data points.
Number of data levels is 14.
Number of electrodes is 30.
Reading inversion results.
The model has 23 layers and 345 blocks.
Iteration 1 : RMS error 17.03.
Iteration 2 : Abs. error 6.02.
Iteration 3 : Abs. error 4.66.
Iteration 4 : Abs. error 4.23.
Iteration 5 : Abs. error 3.97.
Iteration 6 : Abs. error 3.84.
Iteration 7 : Abs. error 3.80.
Reference resistivity used is 319.245
Topographical data present in inversion file.
Damped topography was incorporated into inversion model.
Blocks sensitivity information present.
Average sensitivity is 1.528.
Inversion constraints information present.
```

Figura 39. Resultados de la inversión para la TER13SCH. Tomada del software Res2DInv

En la Figura 39, se compilan cada uno de los factores importantes que fueron resultado del modelo inverso. Se tuvo un total de 196 puntos de datos, los cuales se distribuyeron en 14 niveles verticales. El modelo a su vez cuenta con 23 capas y 345 bloques. El número de iteraciones llevadas a cabo hasta alcanzar la convergencia del modelo fueron 7, esta convergencia se logró con un cambio en el error absoluto de 3,8.

Como resultado de los procesos anteriores se obtiene el perfil de resistividad real (Figura 40). Se debe tener en cuenta que las resistividades reales en este modelo son aproximadas y nunca exactas.

Interpretación

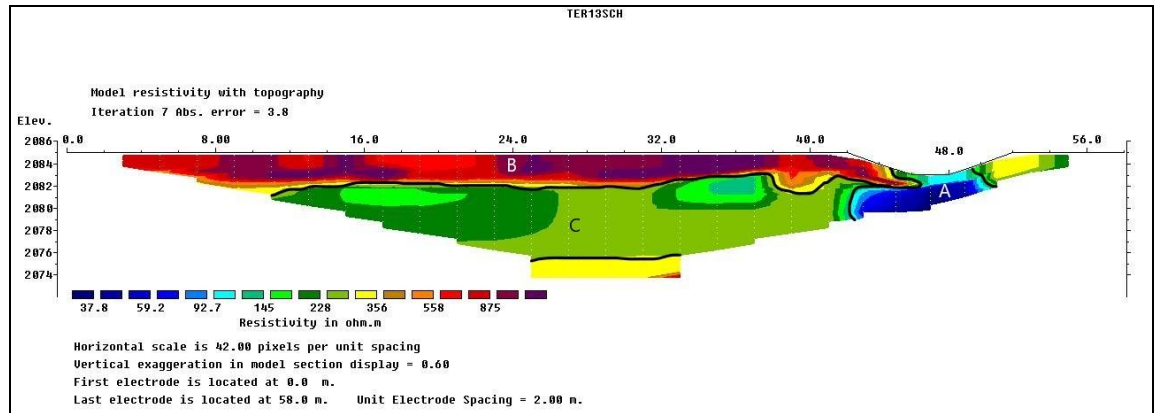


Figura 40. Interpretación de la tomografía TER13SCH

- A. Zona de baja resistividad con valores entre 37,8 y 92,7 ohm-m aproximadamente. Se define como zona preferencial de flujo de agua subsuperficial.
- B. Con resistividades entre 356 y 875 ohm-m, se caracteriza como depósitos no saturados con presencia de bloques.
- C. Se observan resistividades que varían entre 145 y 228 ohm-m aproximadamente los cuales corresponden a un depósito con baja saturación y basados en los valores de resistividad se puede inferir que no hay presencia de bloques en este.

10.8 TER-16-WEN

La línea está ubicada en zona nororiente del área de estudio (Figura 19). Cuenta con un total de 30 electrodos espaciados 2 metros entre ellos, obteniendo una línea con longitud de 60 metros. Se realizó con una dirección de 298° y se encuentra perpendicular al sentido de la pendiente, con el fin de observar los cambios laterales a través de esta. El modelo utilizado y presentado a continuación es el arreglo Wenner.

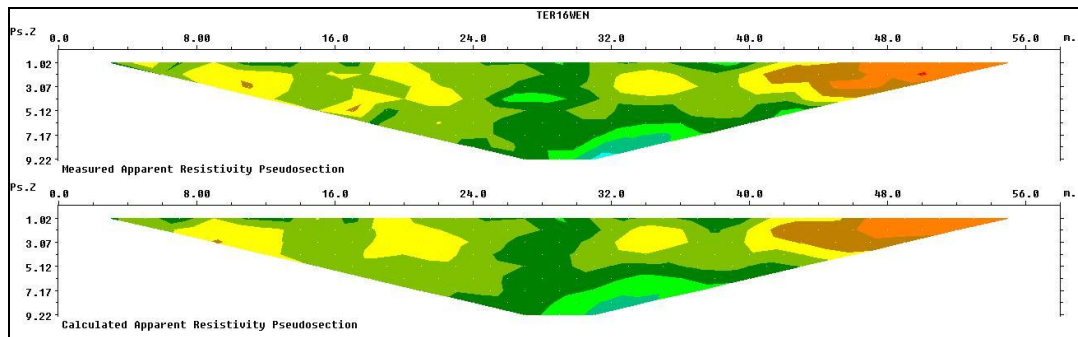


Figura 41. Perfiles de resistividades aparentes (A) resistividad aparente medida (B) resistividad aparente calculada. Tomada del software Res2DInv a partir de los resultados obtenidos.

En la Figura 41, se observan las pseudosecciones A y B, donde A corresponde al perfil de resistividad aparente medida y B corresponde a resistividad aparente calculada, respectivamente. Con base en los valores de resistividad aparente y en la configuración geométrica de estos se pudieron establecer los parámetros de inversión para finalmente llegar al perfil aproximado de resistividad real y con esto realizar la debida interpretación.

En el perfil A, se observa una geometría horizontal y en algunos puntos vertical de isovalores de resistividad aparente medida, lo cual nos define los valores a usar en los filtros de horizontalidad de la pseudosección. Una vez llevada a cabo la inversión con los parámetros definidos, a partir de la pseudosección de resistividad aparente, se obtienen los resultados que son presentados en la Figura 42.

```
TER16WEN
Electrode spacing is 2.000.
Wenner array
No user defined model depths.
Total number of datum points is 135.
Position of mid-point of array is given.
135 31.000 18.000 331.5
Electrode locations are 0.00 and 4.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 58.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.0 and 58.0.
Line length is 58.0.
Minimum electrode spacing is 2.0.
Sorting data points.
Number of data levels is 9.
Number of electrodes is 30.
Reading inversion results.
The model has 19 layers and 319 blocks.
Iteration 1 : RMS error 16.46.
Iteration 2 : Abs. error 9.54.
Iteration 3 : Abs. error 8.30.
Iteration 4 : Abs. error 7.69.
Iteration 5 : Abs. error 7.37.
Iteration 6 : Abs. error 7.17.
Iteration 7 : Abs. error 7.05.
Iteration 8 : Abs. error 6.97.
Reference resistivity used is 798.319
Topographical data present in inversion file.
Damped topography was incorporated into inversion model.
Blocks sensitivity information present.
Average sensitivity is 0.867.
Inversion constraints information present.
```

Figura 42. Resultados de la inversión para la TER16WEN. Tomada del software Res2DInv

En la Figura 42, se compilan cada uno de los factores importantes que fueron resultado del modelo inverso. Se tuvo un total de 135 puntos de datos, los cuales se distribuyeron en 9 niveles verticales. El modelo a su vez cuenta con 19 capas y 319 bloques. El número de iteraciones llevadas a cabo hasta alcanzar la convergencia del modelo fueron 8, esta convergencia se logró con un cambio en el error absoluto de 7,0.

Como resultado de los procesos anteriores se obtiene el perfil de resistividad real (Figura 43). Se debe tener en cuenta que las resistividades reales en este modelo son aproximadas y nunca exactas.

Interpretación:

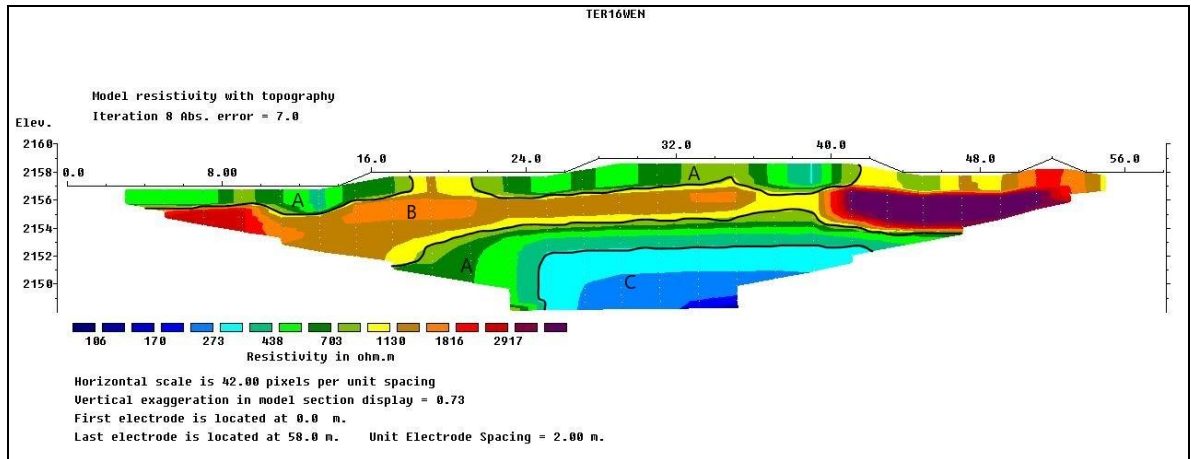


Figura 43. Interpretación de la tomografía TER16WEN

- A. Esta zona presenta resistividades entre 438 y 703 ohm-m correspondientes mayormente a la parte superficial del depósito, con materiales poco saturados y presencias de arenas y gravas. En la parte intermedia se encuentran estas resistividades asociadas a roca con un grado mayor de saturación que la zona B.
- B. Bloques de rocas pertenecientes a la Formación Barroso, de composición basáltica, los cuales tienen un alto rango de resistividades con valores entre 1130 y 2917 ohm-m, evidenciando diferentes fases de meteorización de la roca.
- C. En esta zona observa un decaimiento en la resistividad con valores entre 106 y 273 ohm-m aproximadamente que pueden corresponder a la parte de mayor saturación en el depósito o una disminución en el tamaño de los materiales.

11 DISCUSIÓN

Las zonas en las que se concentra la mayor densidad de estructuras producto de los procesos de tubificación, están ubicadas en la parte alta de la cabecera municipal, favorecidas por las características físicas del suelo, la alta pendiente y el tipo de cobertura vegetal, representada fundamentalmente en pastos.

En un área de 70.000 metros cuadrados se observan hundimientos superficiales alargados en forma de canal (Figura 44), con medidas de hasta 200 metros de longitud y 5 metros de ancho, estos se disponen a favor de la pendiente extendiéndose por esta. A lo largo de estas estructuras se localizan escalonamientos del terreno y parcialmente vaguadas características de hundimientos por erosión interna. Además de estos hundimientos alargados, hay presencia de hundimientos circulares puntuales que no conservan el patrón alargado en forma de canal, sino que por el contrario se asemejan a colapsos de la superficie (Figura 45). Adicionalmente, existe un canal colapsado que corresponde a una geoforma propia de los procesos de tubificación esta es conocida como “gully” o “barranco”; la cual se da en las etapas avanzadas de erosión interna, cuando el material superficial colapsa y crea una depresión en la superficie delimitada por escalas laterales.

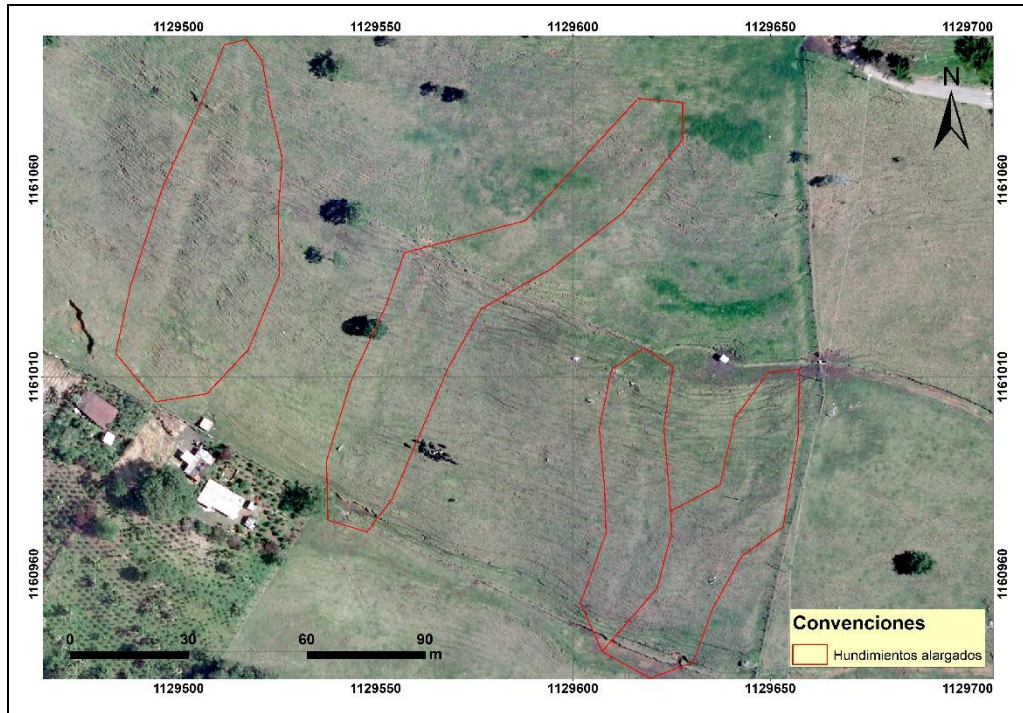


Figura 44. Hundimientos superficiales alargados, estos conservan la forma de un canal.

De igual manera, en la Figura 44 es posible reconocer y dimensionar las zonas donde se presenta la recarga e infiltración del agua en el subsuelo basándose en los colores de la vegetación presente que se observan en un color verde más fuerte y aumenta su abundancia. Asimismo, sobre estos sitios de mayor vegetación se presentan cambios de pendiente los cuales favorecen la retención de agua y la disminución en la escorrentía. A partir de estas zonas de infiltración se empiezan a demarcar los hundimientos superficiales hasta las zonas de menos pendiente donde inician las zonas intervenidas por infraestructura urbana.

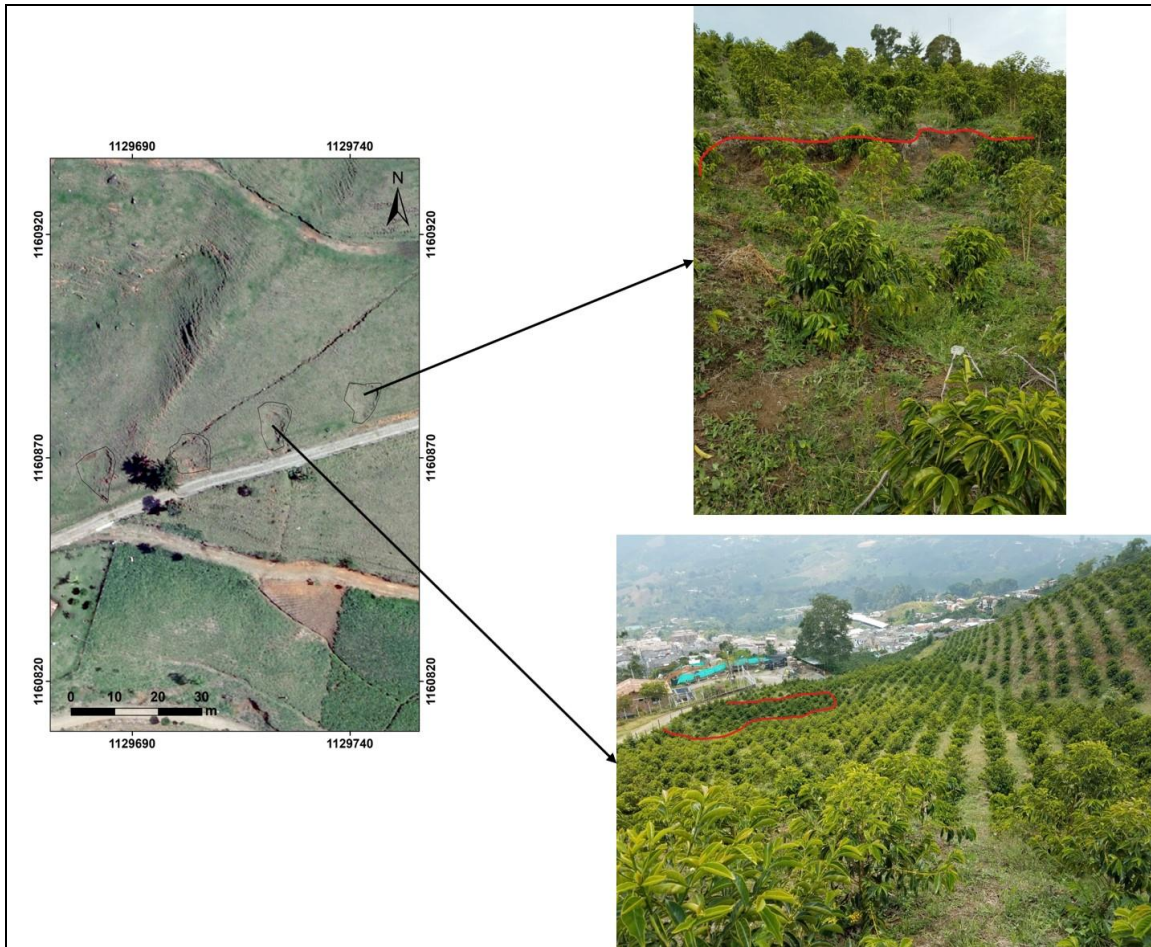


Figura 45. En el mapa estan representados 4 hundimientos circulares. La imagen superior muestra el escalonamiento causado por el primer hundimiento. La imagen inferior representa una perspectiva donde se evidencia el hundimiento del terreno.

Por medio de las tomografías de resistividad eléctrica se puede observar la relación entre cada una de las geformas en superficie que tienen su origen en de los procesos de tubificación. Esto está fundamentado en las caídas de la resistividad bajo los sitios donde se encuentran los hundimientos evidenciados en superficie y la susceptibilidad de los materiales de la zona a ser infiltrados por los flujos de agua.

La tomografía número 3 (TER-3-WEN) realizada perpendicular a dos de los hundimientos alargados, presenta caídas en la resistividad bajo las zonas en las que se ubican las depresiones en la topografía (Figura 46). Estas variaciones en la resistividad se deben a las saturaciones de los materiales bajo la superficie, representando así, la preferencia de los flujos subsuperficiales a concentrarse en estas zonas.

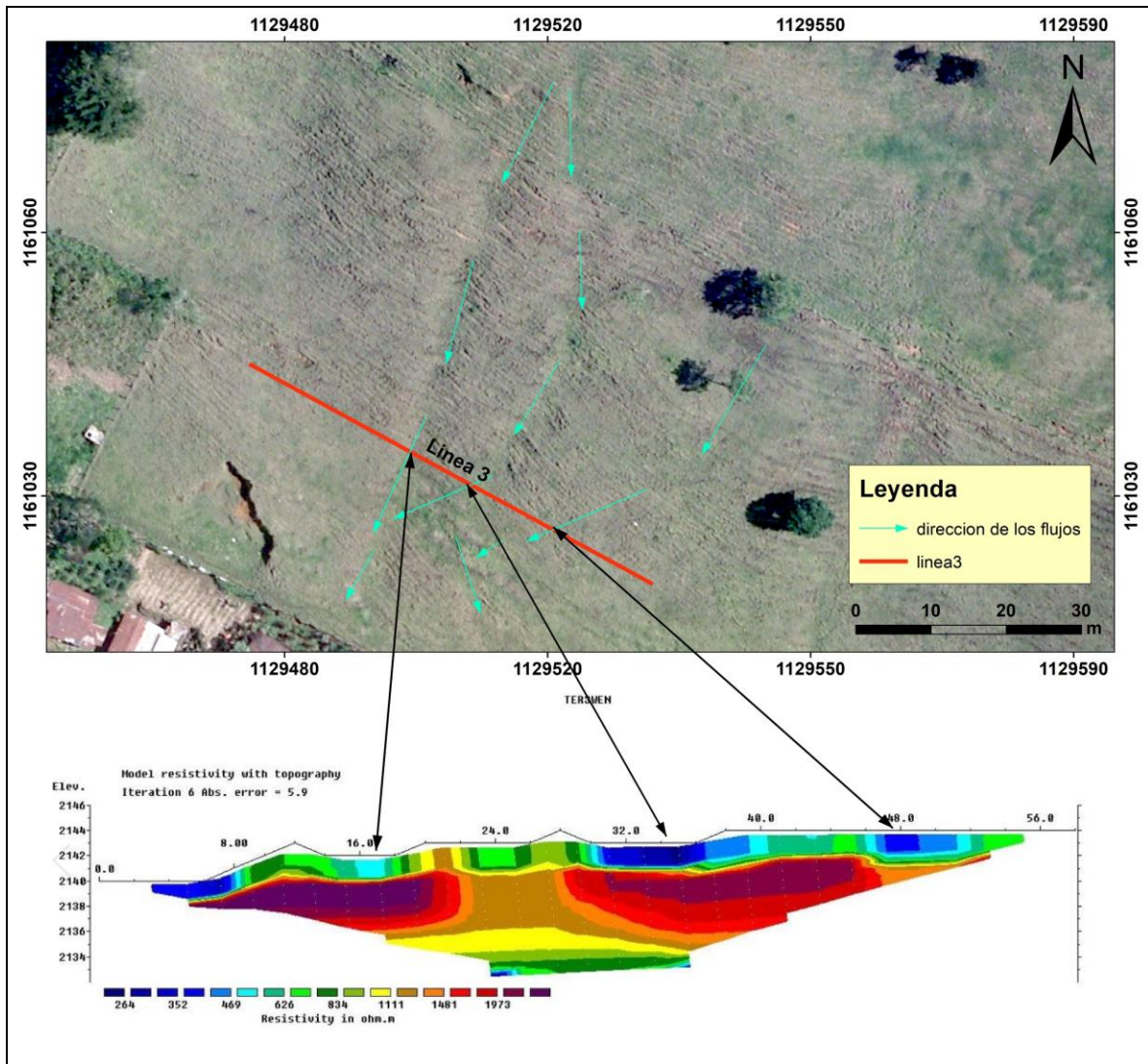


Figura 46. Tomografía 3, realizada perpendicular a los hundimientos alargados. Presenta caídas en los valores de resistividad bajo los hundimientos superficiales.

Al norte de la zona donde se ubica la tomografía número 11 (TER-11-WEN) se presenta un canal de tubificación colapsado (Figura 47) el cual está delimitado por bordes abruptos de 50 a 70 centímetros de alto. Este es caracterizado como el resultado de avanzados procesos de tubificación que producen el colapso del techo de las cavidades produciendo así una grieta en superficie de 75 metros de longitud y aproximadamente 60 centímetros de profundidad. En las Figura 48 y Figura 49 a y b, se evidencia el escalonamiento creado dentro de esta grieta por los flujos de agua y la diferencia en la topografía respecto al área no colapsada. A su vez, este canal en superficie es un factor categórico para el entendimiento de como los procesos erosivos del subsuelo se ven representados en la superficie y de qué forma afectan las posibles estructuras sobre esta; al combinar las

evidencias físicas superficiales con métodos indirectos como lo son las tomografías geoelectricas realizadas en el área se observa una correlación entre la caída de la resistividad y las zonas que exhiben hundimientos en superficie, con una concurrencia espacial entre ambos factores.

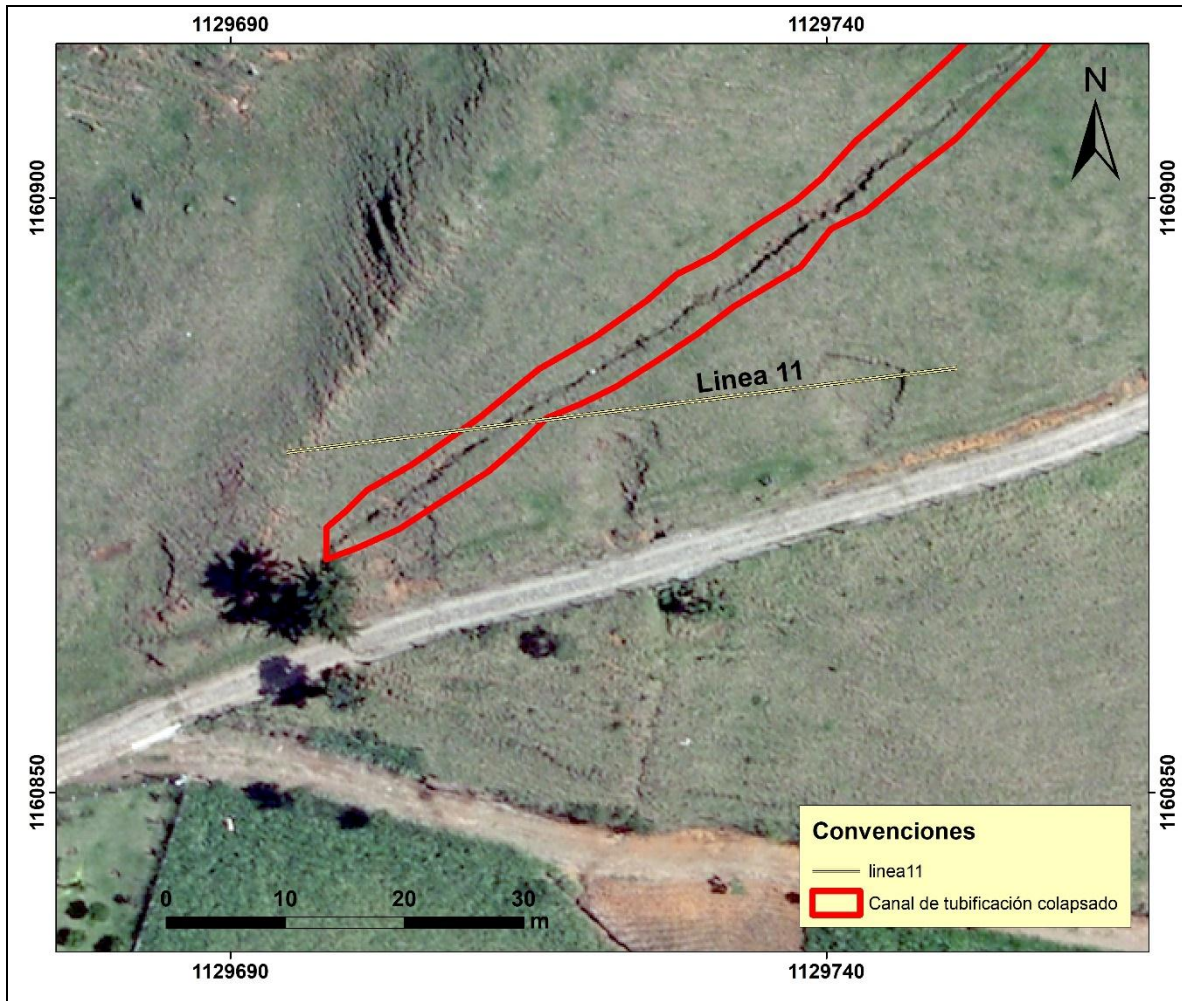


Figura 47. Canal de tubificación colapsado. Este genera una grieta en la superficie del terreno y hundimientos inferiores.



Figura 48: Escalonamiento a través del canal colapsado por tubificación.

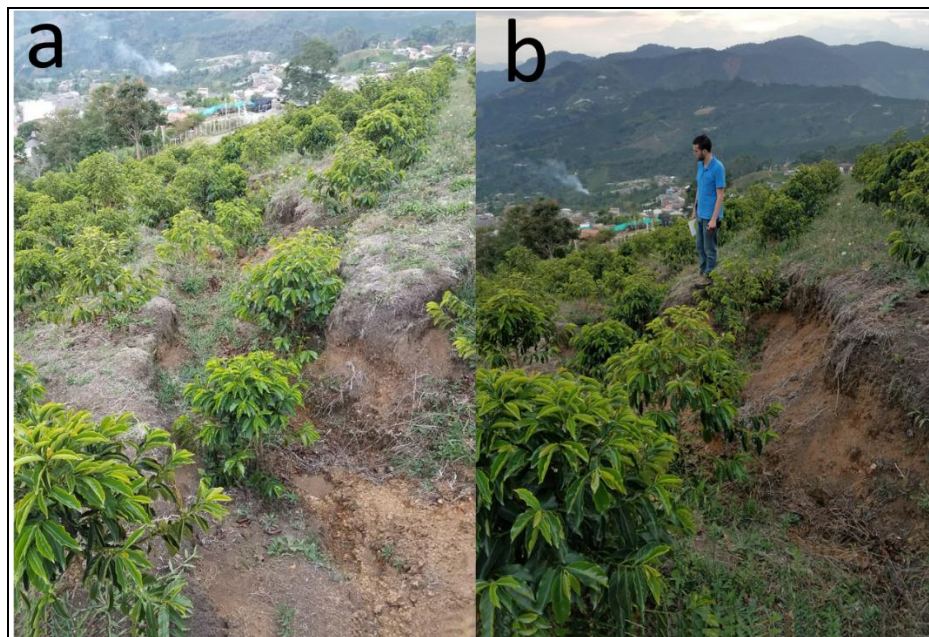


Figura 49a: Canal de tubificación colapsado, se evidencia el hundimiento respecto al terreno circundante. Figura 2b: agrietamiento y costados del canal escalonados.

Adicionalmente, se puede observar que en la zona de la representación superficial del canal colapsado (Figura 50), está ubicada la línea 11 (TER-11-WEN), la cual corta de manera central un primer hundimiento redondeado, la cabecera de otro de los hundimientos y finalmente el canal de tubificación colapsado. Esto nos da un entendimiento unificado de tres de las geofomas de interés, permitiendo correlacionar la acción de flujos subsuperficiales de agua con la superficie.

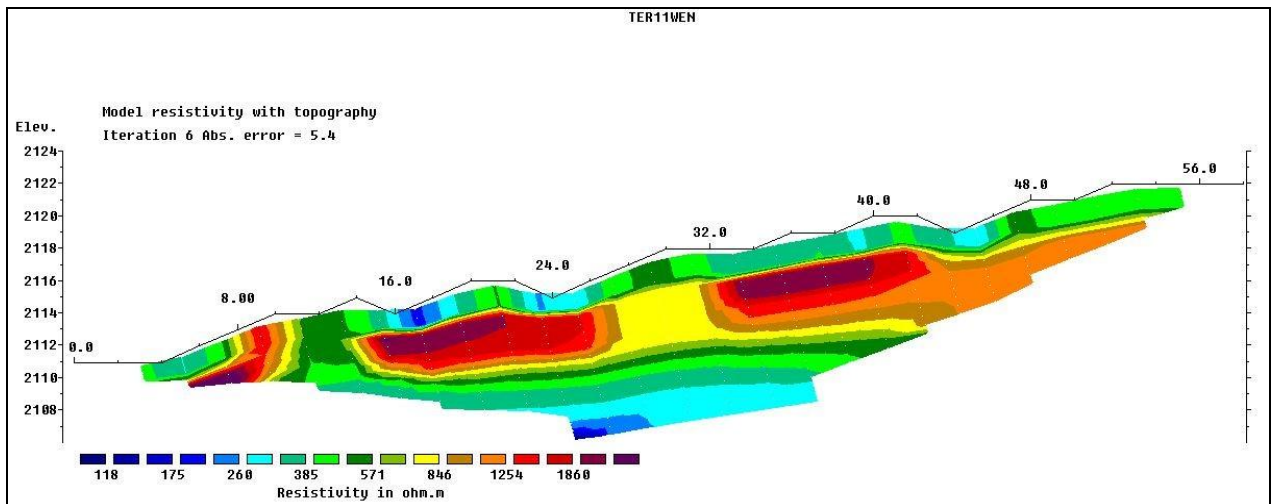


Figura 50: tomografía número 11, al igual que la tomografía número 3 exhibe caídas en los valores de resistividad justo en las depresiones del terreno (vease ilustración 4).

En la tomografía número 11 (Figura 50), se encuentran directamente relacionados los hundimientos presentes a los 16 metros, 24 metros y 44 metros de la línea, con las caídas de resistividad que tienen valores menores a los 260 Ω .m. En comparación con los valores normales de resistividad en el perfil son significativamente menores, aun así, conservando litologías similares; lo cual es una evidencia clara de la humedad concentrada en estos sitios y la preferencia del agua a fluir bajo los mismos. Generalmente en los niveles más profundos de los perfiles de resistividad real se observan valores bajos en la resistividad, lo cual puede ser un factor que representa la concentración de saturación del material en estos niveles menos someros y al estar sometidos a pendientes inclinadas, estimula los flujos de agua y la remoción de material en el subsuelo.

A pesar de que existen pocos estudios geofísicos para determinar y describir la tubificación y teniendo en cuenta que dichos estudios arrojan datos aproximados y no determinísticos, hay autores como Bernatek-Jakiel y Kondracka (2016) y Paioli, et.,al (2016), los cuales

realizan una descripción de la tubificación por medio de métodos geofísicos, como tomografías eléctricas, en los que se muestran los perfiles de resistividad y es posible notar que las variaciones de isovalores y las formas presentadas por las tomografías, son similares para los puntos descritos como tubificación en el presente estudio, muestran formas ovaladas con isovalores de coloraciones azules que corresponden resistividades bajas en comparación con los demás materiales de la zona.

Otro punto para analizar son las expresiones morfológicas en superficie para la tubificación y es posible notar que los autores mencionados anteriormente hacen referencia a hundimientos, que vistos en planta se les puede ver una continuidad alargada en la forma del tubo o posteriormente su colapso (gully), en el presente trabajo se observan ambas expresiones geomorfológicas las cuales, con los resultados arrojados por las tomografías apoyan la existencia de este proceso erosivo.

Cabe destacar que los análisis y resultados presentados dentro de este estudio son una base de partida a un problema mencionado ligeramente en el Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio, sin embargo, es una caracterización cualitativa y resulta en un acercamiento al entendimiento de los procesos erosivos y dinámicos subsuperficiales que dan cavidad a problemas geotécnicos de las áreas con presencia de dichos procesos y por consiguiente afectaciones a la infraestructura superpuesta sobre estos lugares. Es de importancia mencionar que para el entendimiento completo de como la tubificación afecta el terreno y a su vez la infraestructura, se deben utilizar métodos determinísticos que permitan una caracterización cuantitativa y con un mayor grado de proximidad a la naturaleza intrínseca de este proceso, para ello se sugieren análisis directos como lo son las perforaciones y apiques, y métodos de modelamiento y seguimiento a la hidrogeología e hidráulica de la zona.

12 CONCLUSIONES

- A pesar de que los métodos geofísicos presentan datos aproximados. Los resultados obtenidos de tomografías eléctricas, como las bajas resistividades y las formas de los isovalores concuerdan con las expresiones morfológicas en superficie como los gullys y estructuras alargadas en forma de tubo.
- En la parte norte de la zona de estudio existe una gran concentración de procesos erosivos, identificándose a rededor de 10 estructuras características de tubificación en un área de 77.000 m^2 .
- En la cabecera municipal no es posible observar la continuidad de la tubificación por las construcciones presentes, aunque cabe resaltar que son reportados continuamente hundimientos que podrían concordar con los gullys generados por la tubificación.
- La escasa cobertura vegetal, las altas pendientes y los depósitos de vertiente poco consolidados de la parte norte de la zona de estudio permiten una fácil infiltración de agua en el subsuelo lo cual favorece el fenómeno de tubificación.
- En la parte final de algunos hundimientos alargados, se presentan afloramientos de agua en superficie; esto concuerda con las bajas resistividades presentadas por las tomografías e indica un posible flujo subterráneo en el área.
- En cada uno de los lugares donde la pendiente se suaviza se identificaron zonas de mayor saturación, además, a partir de la zona alta donde hay cambios de pendiente se generan los hundimientos alargados que se extienden por toda la ladera.
- El método de tomografía geoelectrica fue seleccionado gracias a su principio básico de funcionamiento, el cual guarda una relación directa con la saturación de los materiales, siendo esta un determinante en el valor de resultados obtenidos.
- La dirección perpendicular de las TER con respecto a las estructuras de interés se definió con el fin de obtener un contraste entre la estructura como tal y el medio circundante a esta.
- La amplia gama de valores de resistividad obtenidos (orden de cientos a miles $\Omega.m$) corresponde a la meteorización diferenciada presente y a su vez a la presencia de bloques de basaltos verdes de gran tamaño dentro de los depósitos de vertiente. La

presencia de estos bloques de grandes dimensiones se debe a la cercanía que existe a su área fuente.

- Basados en los datos recolectados, se puede afirmar que los hundimientos que se presentan en el área urbana del municipio de Concordia, Antioquia están asociados a los procesos de tubificación y pueden ser evidenciados mediante tomografías eléctricas.

13 BIBLIOGRAFÍA

Arias, D. E. (2011). Exploración geotécnica - Relaciones geoelectricas. Medellín: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Alcaldía de Concordia. (2017). Esquema de Ordenamiento Territorial. Concordia, Antioquia.

Álvarez, E. & González, H., 1978. Geología y geoquímica del Cuadrángulo I-7 (Urrao). Ingeominas. Informe 1761. Medellín. 347p.

Bernatek, A. Kondracka M. (2016). Combining geomorphological mapping and near Surface geophysics (GPR and ERT) to study piping systems. Jagiellonian University. *Geomorphology* 274. 193-209.

Botschek, J. Krause, S. Abel, T. Skowronek, A. (2002). Hydrological parameterization of piping in loess-rich soils in the Bergisches Land, Nordrhein-Westfalen, Germany. *J. Plant. Nutr. Soil. Sc* 165, 506-510.

Bustamante, M. Hidalgo, R. (2018). Introducción al manejo de resistividad. Prospección Sísmica y Eléctrica. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Tabasco - México.

Calle, B., & González, H. (1980). Geología y geoquímica de la plancha 166. Jericó: Medellín, Ingeominas, 1-232.

Cappadonia, C. Coco, L. Buccolini, M. Rotigliano, E. (2015). From slope morphometry to morphogenetic processes: an integrated approach of field survey, Geographic information system morphometric analysis and statistics in Italian. *Land Degrad.*

Cardimona, S. (2002). Electrical resistivity techniques for subsurface investigation. *Department of Geophysics, university of Missouri Rolla-Mo.*

CORANTIOQUIA, Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química, INGEOMINAS. 2002. Mapa geomorfológico, de amenazas y de áreas degradadas de la jurisdicción de CORANTIOQUIA a escala 1:100.000. Informe Final. Medellín. 143 pág.

Dunne, T. (1990). Hydrology, mechanics, and geomorphic implications of erosion by Subsurface flow. In: Higgins. C.G., Coates, D.R. (Eds), Groundwater Geomorphology. The Role of Subsurface Water in Earth-Surface Processes and Landforms. Boulder, Colorado, Geological society of America, Special Paper Vol. 252, pp. 1-28.

Foster, M. Fell, R. Spannagle, M. (2000). A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping. *Can, Geotech, J.* 37 (5), 1025-1061.

Fox, G. Wilson, G. (2010). The role of subsurface flow in hillslope and stream bank erosion: a review. *Soil Sci. J.*, 74.

Gamboa, M. Hoyos, E. López, L. (2017). Estudios Básicos de Amenaza del Municipio de Concordia, Antioquia. Revisión y actualización del EOT. Concordia.

GEOTOMO SOFTWARE, (2010). Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method Wenner (α, β, γ), dipole-dipole, inline pole-pole, poledipole, equatorial dipole-dipole, offset pole-dipole, Wenner-Schlumberger, gradient and non-conventional arrays On land, water and cross-borehole surveys. RES2DINV 3.59. MALAYSIA.

González, H., 2001. Memoria explicativa del Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. Escala 1:400.000. INGEOMINAS, 240 p. Medellín.

Herrera, J. Toro, M. (2001). Lineamientos de la dimension física para el esquema de ordenamiento territorial Del Municipio de Concordia, Antioquia. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.

Jones, J.A.A., (1981). *The nature of Soil Piping. A Review of Research.* Geobooks, Norwich.

Jones, J.A.A., (1994). Soil piping and its hydrogeomorphic function. *Cuaternario y Geomorfología* 8 (3-4), 77-102.

Julien, P. Y. (2010). *Erosion and sedimentation.* Cambridge University Press.

Loke, M. Barker, R. (1995). Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections *Geophysics*, Vol 60:1682-1690.

Loke, M. Barker, R. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geotomo*, Malaysia.

Loke, M. (1999). *A Practical Guide to 2D and 3D Surveys. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies.* Cangkat Minden Lorong. Geotomo. Malaysia.

Ontiveros, J. S., & Ponsanti, A. C. (2003). *Caracterización geofísica de filtraciones de agua en el subsuelo* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica, 2003 (Enginyeria Geològica)).

Piedrahita, V. A., Bernet, M., Chadima, M., Sierra, G. M., Marín-Cerón, M. I., & Toro, G. E. (2017). Detrital zircon fission-track thermochronology and magnetic fabric of the Amagá Formation (Colombia): Intracontinental deformation and exhumation events in the northwestern Andes. *Sedimentary geology*, 356, 26-42.

Restrepo-Moreno, S. A., Foster, D. A., Stockli, D. F., & Parra-Sánchez, L. N. (2009). Long-term erosion and exhumation of the “Altiplano Antioqueño”, Northern Andes (Colombia) from apatite (U–Th)/He thermochronology. *Earth and planetary science letters*, 278(1-2), 1-12.

Sanin, C. Y Briceno, L. (2000). Tomografía geoelectrica: dos ejemplos en la Sabana de Bogota. Geofis. Colomb. 4:7378. ISSN 0121-2974. Santa Fe de Bogotá, D.C. - Colombia.

Sasaki, Y. (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation, Geophysical Prospecting. 40:453-463.

Sanchez San Román, J. (20 de 8 de 2018). Prospección eléctrica: Sondeos Eléctricos Verticales. Obtenido de Universidad de Salamanca

Taboada, A.; Rivera, L.A.; Fuendaliza, A.; Cisternas, A.; Philip, H.; Bijwaard, H.; Olaya, J. y Rivera, C., 2000. Geodynamics of the northern Andes: Subductions and Intracontinental deformation (Colombia). Tectonics. Vol. 19. No. 5. pp. 787-813.