

**CONTRIBUCIÓN EN LA MODIFICACIÓN DEL PLAN DE MANEJO
AMBIENTAL EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA**

**PRACTICA EMPRESARIAL PARA LA ASISTENCIA EN EL ÁREA DE GEOLOGÍA
CON LA EMPRESA HYDROINGENIERIA S.A.S**

ÁNGEL FABIÁN SALAZAR ÁLVAREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2017**

**CONTRIBUCIÓN EN LA MODIFICACIÓN DEL PLAN DE MANEJO
AMBIENTAL EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA**

**PRACTICA EMPRESARIAL PARA LA ASISTENCIA EN EL ÁREA DE GEOLOGÍA
CON LA EMPRESA HYDROINGENIERIA S.A.S**

ÁNGEL FABIÁN SALAZAR ÁLVAREZ

**DIRECTOR:
CARLOS ALBERTO RÍOS REYES
PhD. EN CIENCIAS APLICADAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2017**

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN.....	13
1. OBJETIVOS.....	14
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2. JUSTIFICACIÓN.....	15
3. LOCALIZACIÓN.....	16
4. FLUJO DE TRABAJO	17
4.1 REVISIÓN DE INFORMACIÓN PRELIMINAR	17
4.2 CAMPAÑA DE CAMPO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS.....	17
4.3 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL	17
5. RESULTADOS	19
5.1 Marco geológico.....	19
5.1.1 Estratigrafía	19
5.1.2. Geología estructural.	24
5.1.3. Identificación de amenazas sísmicas.	28
5.2 GEOMORFOLOGÍA.....	30
5.2.1 Morfogénesis y morfoestructura.	30
5.2.2 Descripción de las unidades geomorfológicas.	31
5.3 HIDROGEOLOGÍA.....	37
5.3.1. Unidades hidrogeológicas.	37
5.4 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA	41
5.4.1 Trabajo de campo	41

5.4.2. Interpretación de resultados a partir de Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDT).	52
5.4.3. Estratigrafía obtenida a partir de los resultados de la prospección geofísica.....	75
6. CONCLUSIONES	81

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Sistema taxonómico de las geoformas en el área de influencia del proyecto.	31
Tabla 2. Características de los SEDT realizados en la zona de estudio.	44
Tabla 3. Rango de resistividad de las unidades litoestratigráficas existentes en el área de influencia del proyecto.	52

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Localización.....	16
Figura 2. Mapa geológico del área de influencia del proyecto.	24
Figura 3. Corte geológico esquemático.	27
Figura 4. Mapa de sismicidad del área de influencia del proyecto (1 de Enero de 2010 – 1 de Enero de 2017)	28
Figura 5. Barras sobre el tramo del río Nechí.	33
Figura 6. Delta de desborde junto al río Nechí.....	35
Figura 7. Terraza fluvial sobre el río Nechí.	35
Figura 8. Llanura de inundación sobre el río Nechí.....	36
Figura 9. Mapa hidrogeológico del área de influencia del proyecto.	40
Figura 10. Distribución de los SEDT en el área de influencia del proyecto.	42
Figura 11. Campaña de adquisición de datos en campo correspondientes al SEDT_03.....	43
Figura 12. Campaña de adquisición de datos en campo correspondientes al SEDT_05.....	43
Figura 13. Curva de resistividad aparente (ρ_a) vs. tiempo (t).....	45
Figura 14. Cortes para la caracterización de resistividad en el área de influencia del proyecto.....	47
Figura 15. Correlación de resistividades en el corte A-A'.....	49
Figura 16. Correlación de resistividades en el corte B-B'.....	50
Figura 17. Correlación de resistividades en el corte C-C'.....	51
Figura 18. Interpretación de resultados SEDT01.....	55
Figura 19. Interpretación de resultados SEDT02.....	56
Figura 20. Interpretación de resultados SEDT03.....	57
Figura 21. Interpretación de resultados SEDT04.....	58
Figura 22. Interpretación de resultados SEDT05.....	59
Figura 23. Interpretación de resultados SEDT06.....	60

Figura 24. Interpretación de resultados SEDT07.....	61
Figura 25. Interpretación de resultados SEDT08.....	62
Figura 26. Interpretación de resultados SEDT09.....	63
Figura 27. Interpretación de resultados SEDT10.....	64
Figura 28. Interpretación de resultados SEDT11.....	65
Figura 29. Interpretación de resultados SEDT12.....	66
Figura 30. Interpretación de resultados SEDT13.....	67
Figura 31. Interpretación de resultados SEDT14.....	68
Figura 32. Interpretación de resultados SEDT15.....	69
Figura 33. Interpretación de resultados SEDT16.....	70
Figura 34. Interpretación de resultados SEDT17.....	71
Figura 35. Interpretación de resultados SEDT18.....	72
Figura 36. Interpretación de resultados SEDT19.....	73
Figura 37. Interpretación de resultados SEDT20.....	74
Figura 38. Cortes estratigráficos a partir de la prospección geofísica.	77
Figura 39. Correlación geológica A-A' a partir de SEDT.	78
Figura 40. Correlación geológica B-B' a partir de SEDT.	79
Figura 41. Correlación geológica C-C' a partir de SEDT.....	80

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)

ANEXO A. Resultados obtenidos mediante la técnica SEDT.

RESUMEN

TÍTULO: CONTRIBUCIÓN EN LA MODIFICACIÓN DEL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA. PRACTICA EMPRESARIAL PARA LA ASISTENCIA EN EL ÁREA DE GEOLOGÍA CON LA EMPRESA HYDROINGENIERIA S.A.S*

AUTOR: SALAZAR Á. Àngel F.**

PALABRAS CLAVES: Plan de Manejo Ambiental, Sondeos Electromagnéticos con Dominio del Tiempo, Antioquia, Geología, Hidrogeología, Geomorfología, Geofísica.

DESCRIPCIÓN

El planteamiento y ejecución de estudios geológicos con el objetivo de realizar Planes de Manejo Ambiental está basado en proporcionar características provenientes del subsuelo mediante medidas indirectas que mitiguen el daño a la superficie, como es el caso de la prospección geofísica a partir de Sondeos Electromagnéticos con Dominio del Tiempo (SEDT), con lo cual se ejecutan proyectos enfocados a distintas áreas como en el aprovechamiento de recursos naturales.

Se realizó la descripción geológica, geomorfológica, geofísica e hidrogeológica para efectuar la modificación de un Plan de Manejo Ambiental en el departamento de Antioquia, donde se describieron las unidades geológicas de influencia en el área de estudio, la geología estructural, se identificaron las amenazas por remoción en masa y las unidades geomorfológicas con ayuda de información tomada en campo e información secundaria; por otra parte se realizó una caracterización y distribución de las unidades geológicas a partir del análisis de SEDT y una posterior correlación de los resultados con la geología para así, crear un modelo estratigráfico conceptual que permita identificar la distribución y las características de cada una de las unidades con interés hidrogeológico.

En la modificación del Plan de Manejo Ambiental se corroboró la información secundaria de cada una de las unidades geológicas en el área de influencia del proyecto, analizando también la geología estructural asociada a fallas y pliegues, las principales amenazas por remoción en masa para cada unidad geológica identificada basado en el mapa de sismicidad generado con los datos registrados por la Red Sismológica Nacional, asimismo se generó una descripción geomorfológica referente a la morfogénesis y morfoestructura utilizando información preliminar y fotografías de campo, además se realizó la interpretación de los SEDT generando perfiles geofísicos, columnas litológicas y cortes estratigráficos teóricos. Finalmente, a partir de su distribución y características se identificaron tres unidades hidrogeológicas.

*Trabajo de grado modalidad práctica empresarial

**Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología. Director PhD. RÍOS REYES Carlos Alberto.

ABSTRACT

TITLE: CONTRIBUTION IN THE MODIFICATION OF A ENVIRONMENTAL MANAGEMENT PLAN IN ANTIOQUIA DEPARTMENT. EMPRESARIAL PRACTICE TO THE ASSISTENCE IN THE GEOLOGIC AREA WITH THE COMPAÑY HYDROINGENIERIA S.A.S.

AUTHOR: SALAZAR ÁLVAREZ Ángel F.**

KEY WORDS: environmental management plan, electromagnetic surveys with time domain, Antioquia, geology, hydrogeology, geomorphology, geophysics.

DESCRIPTION

The approach and execution of the geological studies with the purpose of carrying out environmental management plans is based on providing characteristics supplied by the subsoil through indirect measures that mitigate the damage of the surface such as the electromagnetic geophysical survey with time domain (EGSTD) which is used to execute projects focused different areas like in the natural resources utilization.

It was carried out the geological description, geomorphology, geophysics and hydrogeology to conduct an adjustment in the environmental management plan in the region of Antioquia, by describing the geological units of influence in the area of study, the structural geology, the threat identification by mass wasting and the geomorphic units with the information taken from the field and secondary information; apart from that it is also sought to carry out a characterization and distribution of the geological units based on the EGSTD analysis and a subsequent correlation between the results and the geology in order to create a conceptual stratigraphic model that allows to identify the distribution and the characteristics of each one of the units with hydrogeological interest.

In the adjustment of the environmental management plan the secondary information of each one of the geological units in the project influence area was verified by analysing also the structural geology associated with faults, the main treats by mass wasting for each geological unit identify based on the seismicity map generated with the data registered by the Red Sismológica Nacional, additionally, a geomorphic description regarding the morphogenesis and morpho structure was generated using the preliminary information and photos taken in the field , moreover, it was carried out the interpretation of the EGSTD by generating the geological profiles, lithologies and the theoretical stratigraphic cuts, Finally with all this information, based on its distribution and characteristics, three hydrological units were identify.

*Degree work modality bussines practice

** Universidad Industrial de Santander, Faculty of Physical and Chemical Engineering. Geology School. Director Dc. RÍOS REYES Carlos Alberto.

INTRODUCCIÓN

El planteamiento y ejecución de estudios geológicos con el objetivo de desarrollar Planes de Manejo Ambiental está basado en proporcionar características de los materiales del subsuelo que se encuentran en la zona de estudio a partir de prospección geofísica, campañas de campo e información secundaria, esto con el fin de proporcionar la información necesaria y válida para ejecutar proyectos posteriores enfocados a distintas áreas como aprovechamiento de recursos naturales. La creación de la modificación de un Plan de Manejo Ambiental se crea por la necesidad de mejorar los estudios anteriores o focalizar la realización de proyectos en zonas aledañas al mismo.

El presente trabajo muestra estudios geológicos, geomorfológicos, geofísicos e hidrogeológicos realizados a través del convenio Universidad Industrial de Santander, HYDROINGENIERÍA S.A.S. y el autor, donde se realizó un estudio para generar la modificación del Plan de Manejo Ambiental Explotación Aluvial por Dragado del Río Nechí en el departamento de Antioquia con la ayuda de Sondeos Eléctricos con Dominio del Tiempo (SEDT) realizados por la empresa.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Estructurar el componente geológico, geomorfológico, geofísico e hidrogeológico para la modificación del Plan de Manejo Ambiental para la explotación aluvial por dragado del Río Nechí, en el departamento de Antioquia, a través de la integración de información de geología de superficie y prospección geofísica por medio de Sondeos Electromagnéticos con Dominio en el Tiempo (SEDT).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Referir las unidades geológicas, la geología estructural e identificación de amenazas sísmicas del área de influencia del proyecto a partir de información secundaria.
- Analizar e interpretar la geomorfología a partir de fotografías tomadas a partir de la campaña de campo realizada por la empresa Hydroingeniería S.A.S.
- A partir de la identificación y distribución de las unidades geológicas, reconocer las unidades de interés hidrogeológico.
- Realizar, a partir de los SEDT generados por la empresa Hydroingeniería S.A.S., una correlación de las unidades geológicas encontradas en el área de influencia del proyecto con la interpretación de los resultados generados a partir de los SEDT, creando posteriormente un modelo estratigráfico conceptual.

2. JUSTIFICACIÓN

La modificación del Plan de Manejo Ambiental se crea para, a partir de estudios anteriores e información primaria y secundaria, la mejora de estudios realizados en la zona de estudio con el fin de prevenir, mitigar y corregir los posibles impactos causados en la zona de estudio.

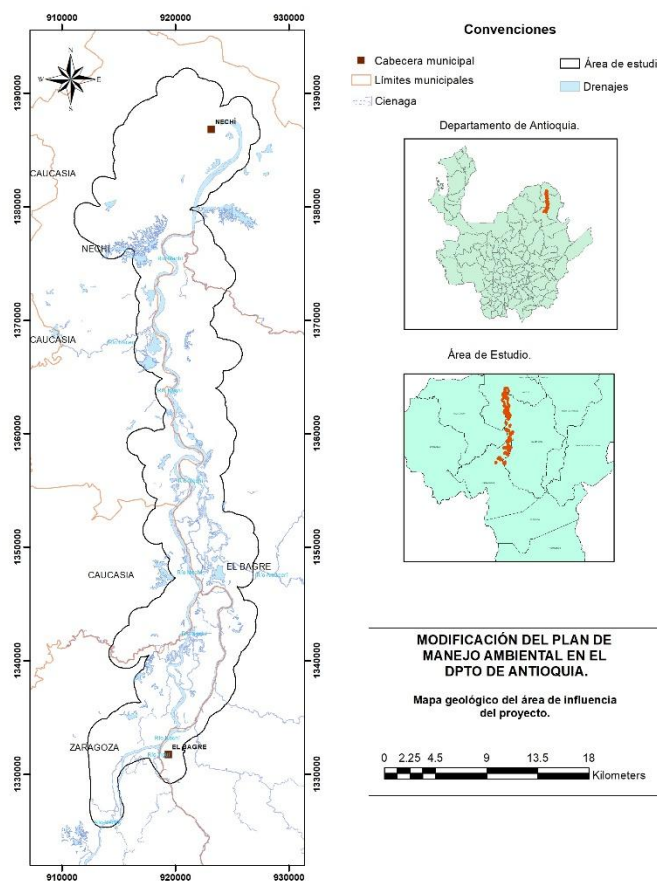
El estudiante, a través de la práctica empresarial, aplica sus habilidades y conocimientos obtenidos durante la ejecución del programa académico Geología en la Universidad Industrial de Santander, a la generación de ideas y toma de decisiones en los problemas cotidianos de las empresas y proyectos de investigación, ayudando a avanzar en la aplicación de sus conocimientos y la aplicación de sus habilidades en los temas requeridos.

La empresa Hydroingeniería S.A.S. es una empresa calificada la cual tiene como objetivo proveer servicios y soluciones ingenieriles enfocándose principalmente en las áreas de hidrología, hidrogeología y geofísica, con los altos estándares de calidad que el mercado demanda.

3. LOCALIZACIÓN

Al área de estudio del proyecto se ubica al noreste del departamento de Antioquia, en las inmediaciones de los municipios de Caucasia, El Bagre, Nechí y Zaragoza limitando al este con el departamento de Bolívar y al norte con el departamento de Córdoba. El área de influencia del proyecto abarca aproximadamente 546.422.505 m², el polígono que cubre esta área cuenta con límites geográficos al norte 1.392.139 m, al sur 1.329.193 m, al este 911.172 m y al oeste 927.734 m. La localización del área de estudio se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Localización



4. FLUJO DE TRABAJO

El flujo de trabajo generado para la realización del proyecto se dividió en tres etapas realizadas durante la práctica de la siguiente manera:

4.1 REVISIÓN DE INFORMACIÓN PRELIMINAR

Esta etapa consistió en la validación de información preliminar a través de la consulta y revisión de publicaciones, informes, mapas, fotografías aéreas, entre otros. Esta etapa se desarrolló de manera permanente durante toda la realización del proyecto. También se realizó la búsqueda de información geológica y geomorfológica a partir de mapas geológicos y topográficos del área del proyecto.

4.2 CAMPAÑA DE CAMPO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS

Durante esta etapa se realizó una campaña de campo para la ejecución de Sondeos Electromagnéticos con Dominio en el Tiempo (SEDT) por parte de la empresa Hydroingeniería S.A.S. la cual contó con la ejecución de 20 SEDT distribuidos en toda el área de influencia del proyecto los cuales alcanzarán profundidades cercanas a los 200 metros, fotografías en campo para su posterior análisis geomorfológicos con el fin de generar datos e información para la caracterización geológica, geomorfológica e hidrogeológica del área de influencia del proyecto.

4.3 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

En esta etapa se realizó la presentación de resultados, discusión y conclusiones para los ítems de geología, geomorfología e hidrogeología.

Para la elaboración de este informe se utilizaron herramientas SIG para el procesamiento de la información cartográfica y la posterior generación de cada uno de los planos y mapas a presentar. El procesamiento de los Sondeos Eléctricos con Dominio en el Tiempo (SEDТ) se procesaron a partir del programa ViewTem® generando los datos en bruto para el posterior procesamiento de los 20 SEDТ.

5. RESULTADOS

5.1 Marco geológico

Para la parte baja de la cuenca del río Nechí, localizada al norte del departamento de Antioquia se realizó la caracterización geológica basándose en estudios anteriores propuestos por diferentes autores y los datos recolectados en campo, con el fin de describir las unidades litológicas aflorantes, un marco geológico estructural de la zona y la identificación de amenazas por sismicidad a partir de datos suministrados por el Servicio Geológico Colombiano.

5.1.1 Estratigrafía

La geología del área de influencia del proyecto está conformada por unidades litoestratigráficas de edades que van desde el Pérmico hasta el Cuaternario y comprenden rocas metamórficas del Pérmico, rocas ígneas del Jurásico y rocas sedimentarias del Plioceno y Cuaternario; siendo los depósitos cuaternarios de gran interés, específicamente las unidades aluviales, caracterizadas por la importancia minera en estos depósitos. En la Figura 2 se muestra el mapa geológico del área de influencia del proyecto.

5.1.1.1. *Paleozoico.*

- Neises de Nechí (Pnn)

Neises de Nechí se denomina a un cuerpo de neises cuarzofeldespáticos y anfibólicos que afloran en la margen oriental del río Nechí. González (2002) en el Mapa Geológico de Antioquia los agrupó como parte del Complejo Cajamarca y les dio la denominación de Neises cuarzofeldespáticos y aluminicos. Restrepo

et al., (2010) lo denomina Neis de Nechí, y recientemente Leal (2011) lo describe con el nombre de Neis Metatonalítico de la Facies Nechí, quien interpreta esta unidad como un cuerpo intrusivo holocristalino fanerítico, afectado por foliación penetrativa metamórfica que produce texturas ocelares con micas alrededor de ojos de plagioclasa. Esta unidad es de edad Pérmica.

5.1.1.2. Mesozoico.

- Diorita de Segovia (Jdse)

Este cuerpo también conocido como Batolito de Segovia¹ y posteriormente denominado Diorita de Segovia,² está conformado principalmente por dioritas, cuarzdioritas y tonalitas datadas del Jurásico.

La Diorita de Segovia es un cuerpo intrusivo constituido principalmente por dioritas, cuarzdioritas y tonalitas, localmente con variaciones a cuarzomonzonitas - granodioritas y gabros,³ no presenta variaciones texturales, macizas, laminadas con bandas difusas de minerales félsicos y máficos, y néisicas por metamorfismo dinámico. Ocasionalmente presenta textura rapakivi, el feldespató potásico rodeado por una corona de plagioclasa.

La roca predominante es fanerítica equigranular de grano medio, de color gris verdoso salpicado de negro por la presencia de minerales ferromagnesianos. Los minerales principales son cuarzo, plagioclasa y en menor proporción

¹ ÁLVAREZ, J. Geología de la Cordillera Central y occidente colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides mesocenoicoes. Bogotá: Ingeominas.,1983. Bol. Geol.,26(2)., 175p.

² GONZÁLEZ, H., y LONDOÑO, A. Catálogo de las unidades litoestratigráficas de Colombia, Diorita de Segovia. Cordillera Central, departamentos de Antioquia y Bolívar. Bogotá: Ingeominas., 2002.

³ Ibid.

feldespatos potásicos, hornblenda, biotita y como minerales accesorios esfena, allanita, apatito, magnetita, pirita y circón.⁴

5.1.1.3. *Cenozoico.*

- Grupo Sincelejo (NQs)

Está constituido por intercalaciones de arcillas abigarradas en capas gruesas, limos con laminación gruesa, capas gruesas a muy gruesas paralelas de arenas de color pardo rojizo y ocre y hacia el techo capas muy gruesas de gravas polimícticas clasto soportadas no consolidadas tamaño guijo y guijarro, mal seleccionadas.⁵ Kassem et al. (1967), separa esta unidad en Formación Sincelejo Inferior y Formación Sincelejo Superior para diferenciar el segmento arcilloso del arenoso.

Dueñas y Duque (1981) en el Cuadrángulo F-8, no encuentran criterios para dividirla, pero consideran que en el Cuadrángulo E-8, debido a los cambios faciales, es válida la propuesta de Kassem et al. (1967) de dividir la formación en tres unidades datadas del Plioceno: Sincelejo, Morroa y Betulia, descritas de base a techo como:

- Formación Sincelejo: conformada por una serie de areniscas micáceas de grano fino a medio, con cemento arcilloso, alternada con areniscas conglomeráticas compuestas por cantos de liditas y cuarzo, mejor cementadas.
- Formación Morroa: constituida principalmente por capas de areniscas friables y conglomerados poco consolidados, intercalados con capas de arcillolitas,

⁴ Ibid.

⁵ ZAPATA, G., BERMÚDEZ, J. G., RODRIGUEZ, G., & ARANGO, M. I. Cartografía Geológica de la Plancha 83 Nechí (Departamento de Antioquia). Medellín: Servicio Geológico Colombiano., 2013.

producto de la sedimentación detrítica en un ambiente típico de abanico aluvial y cauces aluviales.

- Formación Betulia: caracterizada por una secuencia monótona de arcillas abigarradas con intercalaciones de arcillas arenosas, arcillas con gravas y delgadas capas y lentes de arenas arcillosas.

La edad de la unidad es considerada por Clavijo y Barrera (2001) como Plioceno – Pleistoceno, acorde con las determinaciones micropaleontológicas de Duque – Caro (1990) que define la culminación de la sedimentación marina en el Plioceno (3,2 Ma) que antecedió a la formación del Grupo Sincelejo.

5.1.1.4. Cuaternario.

- Depósitos Aluviales del río Nechí (Qal)

Los depósitos aluviales no consolidados cubren un área de 435 km², asociados principalmente a los ríos Nechí, Tigüi, Caserí y Amacerí y sus quebradas tributarias de segundo orden como San Pedro, Vijagual y Villa. Estos depósitos se distribuyen principalmente sobre el Grupo Sincelejo, y están compuestos por gravas con matriz areno-lodosa, arenas y limos con un espesor variable.

Las terrazas aluviales, ubicadas a lo largo de las márgenes del río Nechí y asociadas a los Depósitos Aluviales, según la descripción de Caballero et al., (1988) se dividen en tres niveles: QTN1 con espesor de 3 - 8 m, QTN2 con espesor de 18 – 28 m y QTN3 con espesor de 35 – 40 m. La litología es de guijos y guijarros de 3 a 12 cm de diámetro de rocas metamórficas y cuarzo, suprayacidas por lodo y arenas finas. El espesor aproximado de toda la secuencia es de 11 a 12 m, depositados sobre sedimentitas terciarias.⁶

⁶ Ibíd.

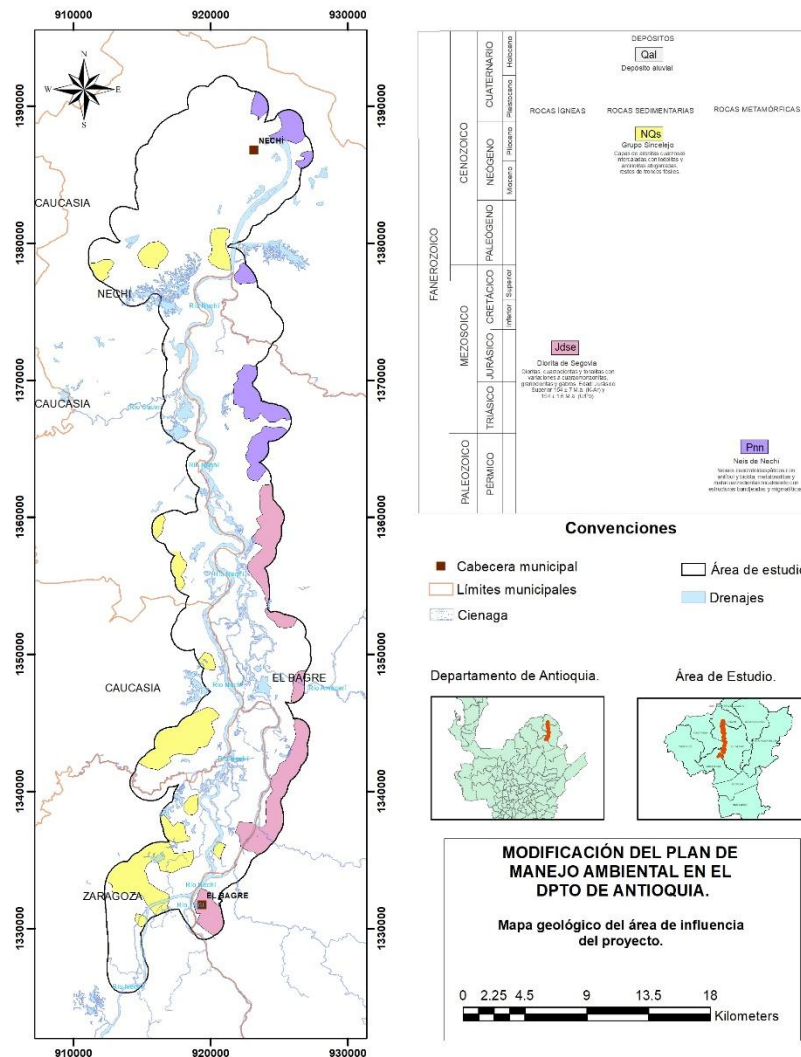
- QTN3: es el nivel más alto y la terraza más extensa en la región; aparece principalmente en el margen derecho del río al sur de Puerto Claver, y sobre el margen izquierdo al norte hasta la confluencia con el río Cauca. Ha sido fuertemente explotada por la minería informal. Su nivel promedio sobre el río Nechí oscila entre 35 y 40 metros, disminuyendo río abajo. La litología es gravosa, con la notable falta de la capa de limos arcillosos sobre la cinta gruesa de gravas en la zona al sur del río Cacerí, aparentemente en la zona de influencia de este tributario.⁷
- QTN2: incluye de base a techo arena fina con lentes de gravas, seguido por una capa muy gruesa (1,0 – 2,5 m) de limo arcilloso abigarrado, capa de guijos y guijarros de 3 a 8 cm de diámetro, donde se encuentran los valores más altos de oro.⁸
- QTN1: es el nivel que menos sobresale en la superficie, y se interpreta como un nivel de la llanura aluvial; está compuesto por menor cantidad de gravas y parece ser menos aurífero. En la zona al norte de la población de El Bagre fue trabajado por las dragas. Además, ha sido identificado como terrazas enterradas por debajo de la superficie actual de la llanura de inundación. Su altura sobre el río alcanza un máximo de 8 metros.⁹

⁷ MINEROS S.A. Plan de Manejo y recuperación de la Ciénaga El Sabalito en el área de operación de MINEROS S.A. en la Cuenca del Nechí, Antioquia. Medellín: Renaturar. 2001

⁸ Ibíd.

⁹ Ibíd.

Figura 2. Mapa geológico del área de influencia del proyecto.



5.1.2. Geología estructural.

Para la descripción de la geología estructural del área de influencia del proyecto, se caracterizaron los principales lineamientos a nivel regional, así como sus controles tectónicos a partir de la descripción de las diferentes fallas que modelan el área de estudio.

La cuenca del río Nechí es parte de la gran estructura de la Cordillera Central Colombiana, y está controlada tectónicamente por dos grandes sistemas de fallas de rumbo, la Falla de Palestina y la Falla de Otú. Estas fallas tienen desplazamientos laterales, que alcanzan los 28 km en el caso de la Falla de Palestina.¹⁰ Por último, está la Falla El Bagre, una falla de rumbo con desplazamiento lateral izquierdo, probablemente mayor de 50 km, tiene dirección N20°W y gira hacia el este con dirección N10°E en la parte norte; esta falla pone en contacto la diorita del Batolito de Segovia y el Neis de San Lucas.¹¹ La Figura 3 muestra un corte geológico con las unidades y estructuras presentes en el área de influencia del proyecto.

Zapata, Bermúdez, Rodríguez, & Arango (2013) pudieron trazar lineamientos a nivel regional indicando dos tendencias estructurales; la mayoría de los datos presentan una dirección entre N10-20°E que coincide con el rumbo del sistema de fallas Palestina; en menor proporción hacia el N15-20°W similar al rumbo de la Falla Otú-Pericos (N10-15°W) y N40°W. Montoya & Ordoñez (2010) procesaron 22 datos estructurales obteniendo como principales direcciones de fracturas y fallas N10-20°W y N70-80°E y una tercera tendencia N20-30°E que corresponde a la dirección de las vetas presentes en la región, que según dichos autores podría indicar que las mineralizaciones se encuentran emplazadas en estructuras de segundo orden.

Las principales fallas predominantes en el área de influencia del proyecto son:

- Sistema de fallas Palestina: este sistema de falla incluye entre otras a las fallas El Bagre y Otú-Pericos, presenta un rumbo N10-20°E. En la plancha 83 no se documentó la presencia de ninguna de estas fallas, pero cabe la

¹⁰ FEININGER, T., BARRERO, D., y CASTRO, N. Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas. Subzona II-B. Bogotá: Ingeominas., 1972 Bol. Geol., 20(2). 173p.

¹¹ Ibid.

posibilidad de que estén cubiertas, tampoco se tuvo acceso a información sísmica de este sector para comprobar o descartar estas estructuras.¹²

- Falla de Otú: es una falla de rumbo con dirección al noroccidente, que cruza cerca de Zaragoza y pone en contacto rocas paleozoicas con los sedimentos terciarios formando un escarpe pronunciado, que parece ser el límite entre la unidad de Lomeríos, con los sedimentos aluviales del río Nechí, para continuar al norte confundiendo con los sedimentos cuaternarios¹³

Feininger et al., (1972) ha establecido una componente sinestrolateral dominante, conformada por patrones de fracturamiento con tendencia regional N-S a N10W, en la región de influencia del Distrito Minero Segovia – Remedios (DMSR), e inflexiones locales N30W asociadas a los sectores económicamente más atractivos del distrito.

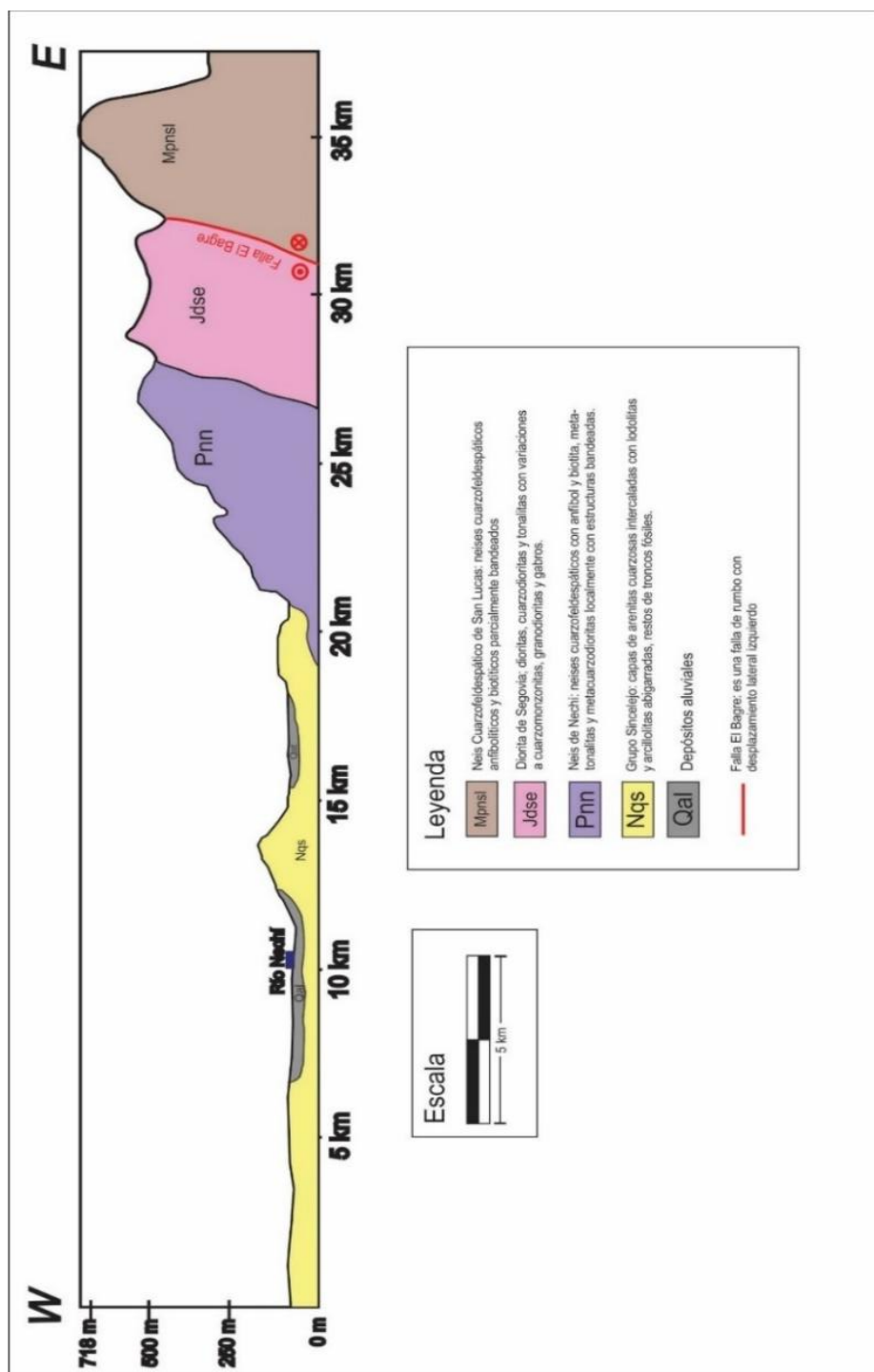
- Falla el Bagre: según Feininger et al., (1972) es una falla de rumbo con desplazamiento lateral izquierdo, probablemente mayor de 50 km, tiene dirección N20°W y gira hacia el este con dirección N10°E en la parte norte. Se resalta también la importante discontinuidad litológica en el bloque oeste donde se encuentran las lutitas cretácicas y la diorita del Batolito de Segovia con el neis Precámbrico.
- Falla Zaragoza: asociadas a la Falla de Zaragoza se observan fallas de cabalgamiento y pliegues de dirección N25°W a N30°W; la relación angular entre estas estructuras con la Falla de Zaragoza indicaría que esta última ha tenido un desplazamiento lateral con sentido sinextral.¹⁴

¹² Ibid.

¹³ DÍAZ, D. Armado de bloques explotables y cálculo de reservas de las unidades aluviales, Río Nechí (Minas Santa Paula 7 y 8). Trabajo de grado Geólogo. Bucaramanga, Santander.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico - Químicas. Escuela de Geología, 2012. 58 p.

¹⁴ INGETEC. Proyecto Nueva Esperanza. Bogotá, Colombia. 2012.

Figura 3. Corte geológico esquemático.



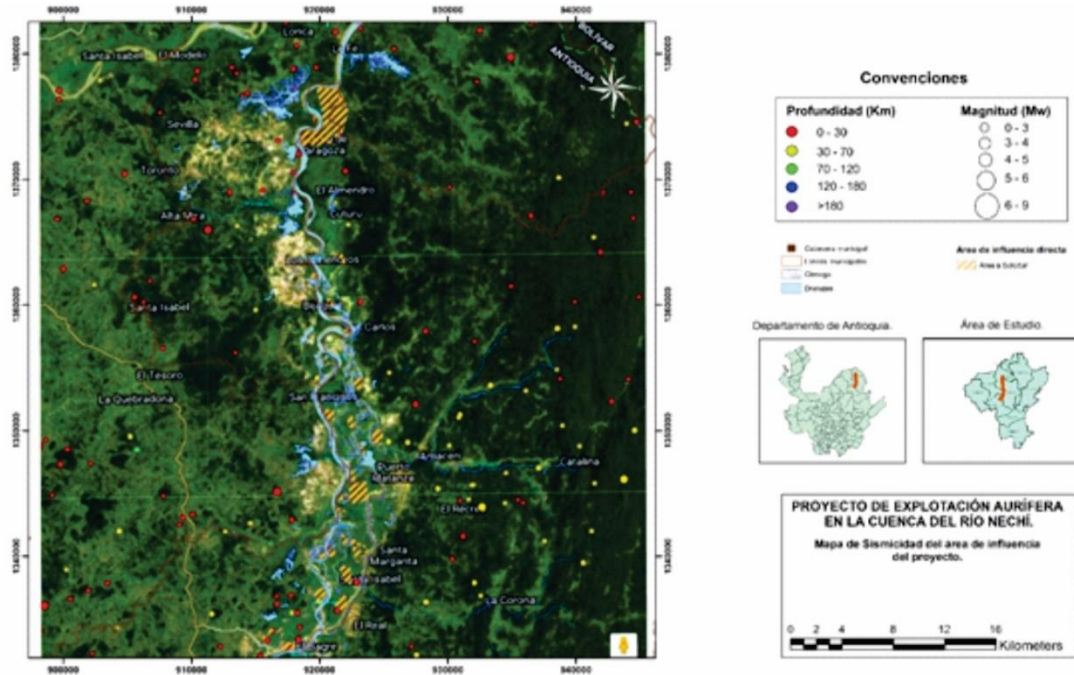
5.1.3. Identificación de amenazas sísmicas.

Para la identificación de la amenaza por sismicidad del área de influencia del proyecto se realiza la caracterización sísmológica a nivel regional a partir de los datos obtenidos del Servicio Geológico Colombiano registrados por la Red Sísmológica Nacional de Colombia.

5.1.3.1. Sismicidad.

A partir del catálogo y el mapa de sismos obtenidos del Servicio Geológico Colombiano se identificaron los sismos registrados desde el 1 de Enero de 2010 hasta el 1 de Enero de 2017. En el catálogo analizado se encuentran todos los sismos con magnitud superior a 0,5 Mw registrados por la Red Sísmológica Nacional de Colombia para el departamento de Antioquia, específicamente para el área de influencia del proyecto, como se observa en la Figura 4.

Figura 4. Mapa de sismicidad del área de influencia del proyecto (1 de Enero de 2010 – 1 de Enero de 2017)



Fuente: Red Sísmológica Nacional de Colombia.

Utilizando los catálogos sísmicos se puede observar que la sismicidad en el área de influencia del proyecto presenta una distribución uniforme en los costados norte y sur y una menor sismicidad en las zonas centrales y en el tramo del río Nechí. Cerca de veredas Sevilla, La Fe y Guamo de Zaragoza, se encuentran sismos de profundidad entre 0 – 30 km con magnitudes entre 0 – 3 Mw, en algunos puntos de este sector norte del área de influencia del proyecto se evidencian sismos con magnitud entre 3 – 4 Mw. Por otra parte, en el tramo del río Nechí cerca de las veredas Catalina, El Almendro y Amacerí, se logran reconocer sismos de profundidades entre 0 – 70 km, la mayoría con magnitudes que van de 0 a 3 Mw. Los sismos que se presentan en este sector estarían posiblemente asociados a la falla el Bagre, la cual se encuentra paralela al tramo del río y coincide con el lineamiento de estos sismos. Finalmente, cerca del municipio de El Bagre, al sur del área de influencia del proyecto se encuentra otro cúmulo de sismos, con una profundidad de 0 a 30 km y una magnitud de 0 a 3 Mw. La acumulación de estos sismos en la zona sur se podrían asociar a la cercanía con las fallas Otú y Zaragoza.

5.2 GEOMORFOLOGÍA

Las características geomorfológicas para el área de influencia del proyecto se elaboraron a partir de la información secundaria suministrada por la Plancha 83 de Nechí, la cual se localiza en la subregión del Bajo Cauca, en la parte noreste en la zona de la Mojana y el borde oriental que está delimitada por las estribaciones de la Serranía de San Lucas y está atravesada por los ríos Cauca y Nechí,¹⁵ además se utilizó información adquirida a través de la identificación de rasgos geomorfológicos observados en los modelos de elevación digital (DEM) y fotografías aéreas de diferentes años.

5.2.1 Morfogénesis y morfoestructura. La descripción de los procesos morfogenéticos y morfoestructurales del área de influencia del proyecto se basa en el modelo de paisaje de planicie aluvial, considerado un tipo de paisaje fisiográfico que según la zona adyacente al curso del río está sujeta a inundaciones periódicas constituidas por los aportes del mismo.¹⁶

Este paisaje se encuentra caracterizado dentro del sistema taxonómico de geoformas según Zinck, 2012, en la cual se encuentra en una geoestructura perteneciente a una fosa interandina – megacuenca de sedimentación, dentro de la cual se caracteriza por ser un valle interandino siendo sus drenajes principales el río Nechí, Cauca, Tigui, Amacerí y el Bagre entre otros. Su ambiente morfogénico es fluvio deposicional mostrando una planicie aluvial la cual se divide en planos de inundación y terrazas, cada una de estas con diferentes formas de terreno como se muestra en la Tabla 1.

¹⁵ ZAPATA, G., BERMÚDEZ, J. G., RODRIGUEZ, G., & ARANGO, M. I. Cartografía Geológica de la Plancha 83 Nechí (Departamento de Antioquia). Medellín: Servicio Geológico Colombiano., 2013.

¹⁶ IGAC. Estudio semidetallado de suelos de las áreas potencialmente agrícolas; Bajo Cauca; Departamento de Antioquia. Bogotá:Imprenta Nacional de Colombia., 2007.

Tabla 1. Sistema taxonómico de las geoformas en el área de influencia del proyecto.

Geoestructura	Provincia	Ambiente morfogénico	Paisaje	Relieve	Forma de terreno	Nomenclatura
Fosa Interandina – Megacuena de sedimentación	Valle Interandino del Cauca	Fluvio deposicional	Planicie aluvial	Plano de inundación	Cubeta de decantación y desborde	Pcd
					Napas de desborde	Pnd
					Albardones	Pa
					Explayamiento	Pe
					Barras e Islas	Pb
					Deltas de Desborde	Pdd
				Terrazas	Terraza Fluvial	Ttf
					Llanura de inundación	Tll

Fuente: Mineros, 2014

5.2.2 Descripción de las unidades geomorfológicas.

La descripción de las unidades geomorfológicas del área de influencia se elaboró a partir de la identificación de rasgos geomorfológicos observados en las fotografías aéreas, imágenes satelitales y los reconocimientos realizados en campo. Su origen proviene de la dinámica del río Nechí, el cual erosiona, transporta y deposita los materiales tanto a lo largo de su planicie como en los bordes. Estas geoformas presentan una geometría plana y en el caso de las terrazas, levemente inclinadas hacia el río. Las unidades geomorfológicas definidas a partir de los procesos morfogenéticos de tipo aluvial - deposicional se describen a continuación:

- **Cubetas de decantación y desborde (Pcd):** corresponden a depresiones o zonas de amortiguación de las corrientes. La característica principal es su composición granulométrica, que oscila entre 40-50% de limo y 40-50% de arcilla; las texturas por lo general varían de arcillosa a arcillo limosa.¹⁷
- **Napas de desborde (Pnd):** son formas del terreno que se caracterizan por ocupar un área extensa y presentan suelos bien drenados, con algunas excepciones están integrados con regímenes ácuicos.
- **Albardones (Pa):** son diques naturales que generalmente se encuentran asociados sobre ambas márgenes de los ríos. La forma es alargada y estrecha, por lo general de 100 a 200 metros de ancho, según la dinámica y la energía del eje de alimentación. La topografía es convexa y se caracteriza por la presencia de altos contenidos de material clástico compuesto por arenas y limos gruesos.¹⁸
- **Explayamientos (Pe):** son eventos frecuentes y están asociados a la dinámica fluvial de las corrientes sobre los piedemontes. Una de las características principales de los explayamientos, es que los materiales son depositados por exceso de carga y están determinados por una divergencia del escurrimiento en diferentes canales o surcos. Los explayamientos son generalmente el producto de la intensidad de las lluvias en tiempos cortos y repetidos con cierta frecuencia y periodicidad a través de la historia del río.¹⁹
- **Barras e islas (Pb):** las barras son formaciones que pueden tener longitud igual al ancho del cauce y alturas comparables a la profundidad media del agua. Varias clases de barras se distinguen: barras formadas en la parte interna de

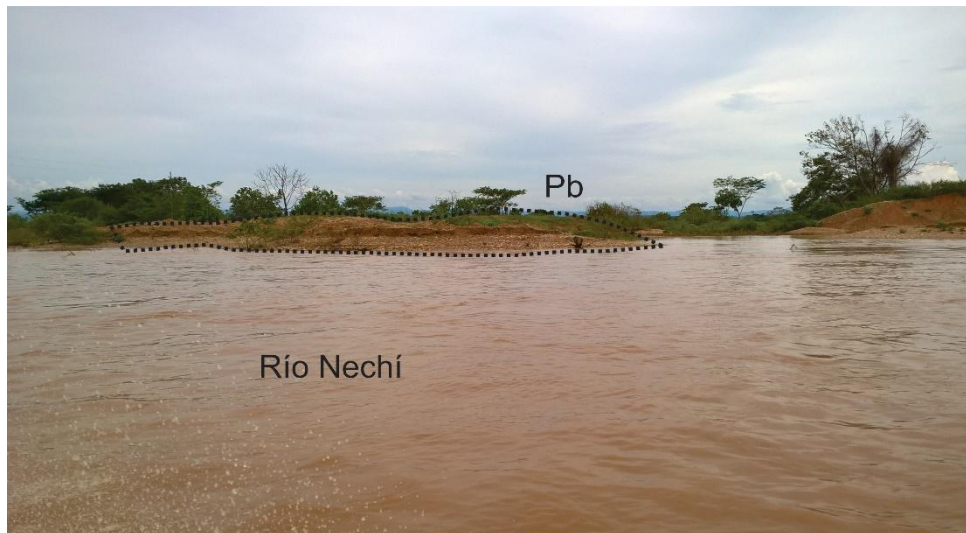
¹⁷ VELÁSQUEZ, E. Red de monitoreo pluvio-freatimétrica en el área establecida en Caña de Azúcar del Ingenio Risaralda. Trabajo de grado Especialista en Sistemas de Información Geográfica. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Manizales: Universidad de Manizales., 2016. 60 p

¹⁸ Ibid.

¹⁹ CARBONELL, J. Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca. Principios metodológicos y aplicaciones. Colombia Serie Técnica - Cecicaña Centro de Investigación de la Caña de Azúcar., 1-119. 2011

las curvas de un cauce; barras alternadas que se presentan en tramos rectilíneos del cauce; barras transversales que ocupan prácticamente todo el ancho del cauce; barras aguas abajo de confluencias de dos cauces. Las islas se diferencian de las barras transversales porque tienen vegetación²⁰. Las barras e islas (Pb) localizadas en el área de influencia del proyecto se puede observar en la Figura 5.

Figura 5. Barras sobre el tramo del río Nechí.



- **Deltas de desborde (Pdd):** se muestran como deltas activos que durante los periodos de aguas altas se produce el desborde de los excesos de caudal sobre los diques y las llanuras de inundación donde son temporalmente almacenadas,²¹ normalmente en ríos meándricos bastante avanzados. Los deltas de desborde (Pdd) localizados en el área de influencia del proyecto se pueden observar en la Figura 6.

²⁰ UNIVERSIDAD DEL CAUCA. Curso Taller sobre Obras de Control Fluvial. Valle del Cauca.2003

²¹ IDEAM. Geomorfología y susceptibilidad de la inundación del valle fluvial del Magdalena. Bogotá: IDEAM., 2001.

- **Terraza fluvial (Ttf):** la terraza fluvial la conforman las llanuras de inundación de los ríos Cauca, Nechí y Caribona con un área de 624 km². Las terrazas aluviales se localizan en ambos márgenes del río Cauca y en la orilla occidental del río Nechí. Está compuesta básicamente por arenas, grava y arcillas, con pendientes entre 0% y 5%, en terrenos planos, suavemente inclinados.²² Las terrazas fluviales (Ttf) localizadas en el área de influencia del proyecto se pueden observar en la Figura 7.

- **Llanura de inundación (Tli):** estos sedimentos están compuestos por material arenoso arcilloso y gravas con guijos de cuarzo lechoso matriz soportadas. La llanura de inundación del río Cauca en la plancha 83 tiene en promedio 5 km de ancho hasta el sitio donde se integra con la llanura de inundación del río Nechí y juntas en las cercanías a la confluencia de estos dos ríos alcanzan los 20 km de amplitud, formando zonas planas anegables.²³ La llanura de inundación (Tli), localizada en el área de influencia del proyecto se puede observar en la Figura 8.

²² DÍAZ, D. Armado de bloques explotables y cálculo de reservas de las unidades aluviales, Río Nechí (Minas Santa Paula 7 y 8). Trabajo de grado Geólogo. Bucaramanga, Santander.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico - Químicas. Escuela de Geología, 2012. 58 p.

²³ ZAPATA, G., BERMÚDEZ, J. G., RODRIGUEZ, G., & ARANGO, M. I. Cartografía Geológica de la Plancha 83 Nechí (Departamento de Antioquia). Medellín: Servicio Geológico Colombiano., 2013.

Figura 6. Delta de desborde junto al río Nechí.

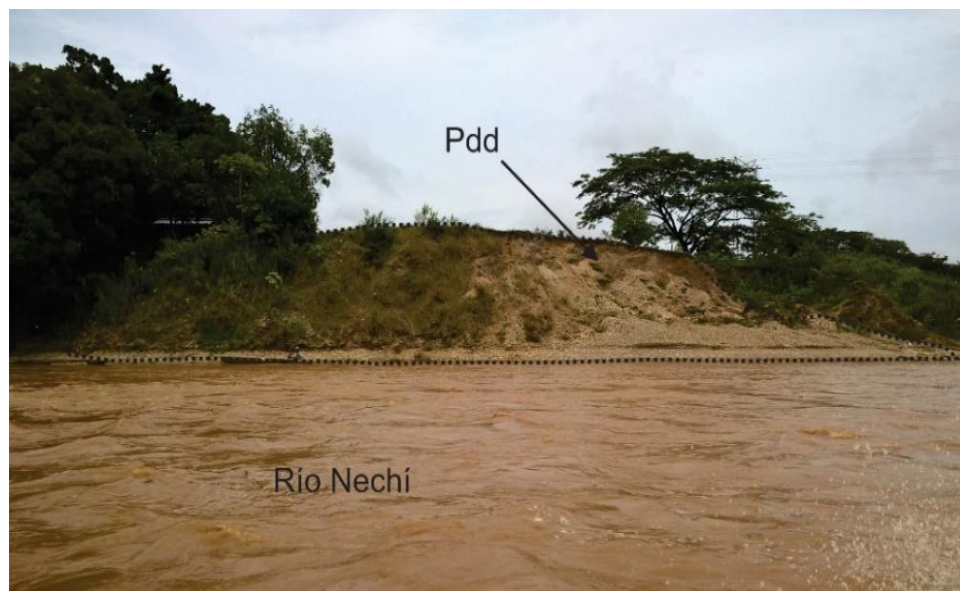
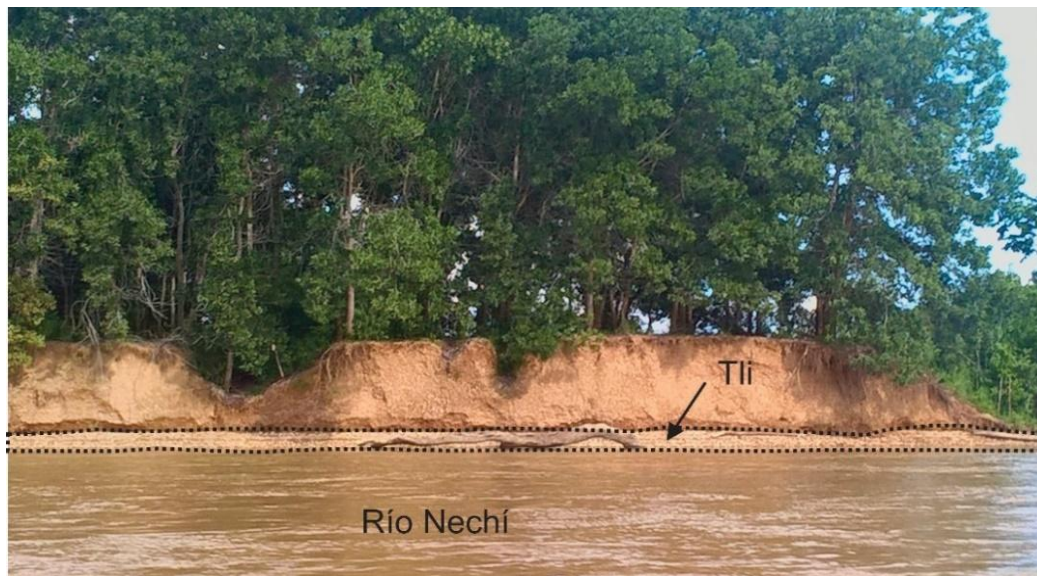


Figura 7. Terraza fluvial sobre el río Nechí.



Figura 8. Llanura de inundación sobre el río Nechí.



5.3 HIDROGEOLOGÍA

Las condiciones hidrogeológicas del área de influencia del proyecto están basadas en las características geomorfológicas y geológicas de los materiales que conforman el subsuelo. El área de influencia está conformada geológicamente por unidades litoestratigráficas de edades que van desde el Pérmico hasta el Cuaternario y comprenden rocas metamórficas del Pérmico, rocas ígneas del Jurásico y rocas sedimentarias del Plioceno y Cuaternario.

5.3.1. Unidades hidrogeológicas. De acuerdo con la distribución de las unidades litoestratigráficas presentes en el área de influencia del proyecto y sus características relacionadas con el origen, composición y textura, se identificaron tres unidades hidrogeológicas (UH-A, UH-B, UH-C), con diferentes potenciales de acumulación y transmisión de aguas subterráneas, como se observa en la Figura 9.

- Unidad hidrogeológica UH-A: Depósitos aluviales.

Es la unidad que suprayace la secuencia, está conformada por depósitos aluviales litológicamente compuestos por gravas con matriz arenosa, arcillas limosas y arenas limosas sugiriendo unas permeabilidades de medias a altas. Esta unidad se encuentra suprayaciendo una unidad sedimentaria del Cenozoico. De acuerdo a las características granulométricas de los depósitos aluviales, estos están en capacidad de almacenar y transmitir agua subterránea y por su carácter de formación superficial desarrollan acuíferos libres, los cuales pueden estar confinados en algunas zonas por capas o lentes de arcillas intercaladas con arcillas arenosas. Esta unidad reposa sobre la Formación Betulia.

- Unidad hidrogeológica UH-B: Grupo Sincelejo

Está constituido por intercalaciones de arcillas abigarradas en capas gruesas, limos con laminación gruesa, capas gruesas a muy gruesas paralelas de arenas y hacia el techo capas muy gruesas de gravas polimícticas clasto soportadas no consolidadas tamaño guijo y guijarro, mal seleccionadas. En este grupo se identifican dos unidades hidrogeológicas de acuerdo a las características litológicas, las cuales se describen a continuación.

- Unidad hidrogeológica UH-B1: Formación Betulia

Esta unidad se encuentra infrayaciendo a la unidad UH-A, la cual litológicamente se asocia a la Formación Betulia; está compuesta principalmente por capas de arcillas intercaladas con arcillas arenosas, las cuales por sus características litológicas poseen baja permeabilidad, por ende, el flujo de agua que circula por la unidad UH-A, es retenido o transmitido de forma más lenta por la unidad UH-B1. De acuerdo a las características granulométricas esta unidad se asocia a un acuitardo o acuícludo por su capacidad de poder retener agua, pero con poca facilidad para transmitirla.

- Unidad hidrogeológica UH-B2: Formación Morroa

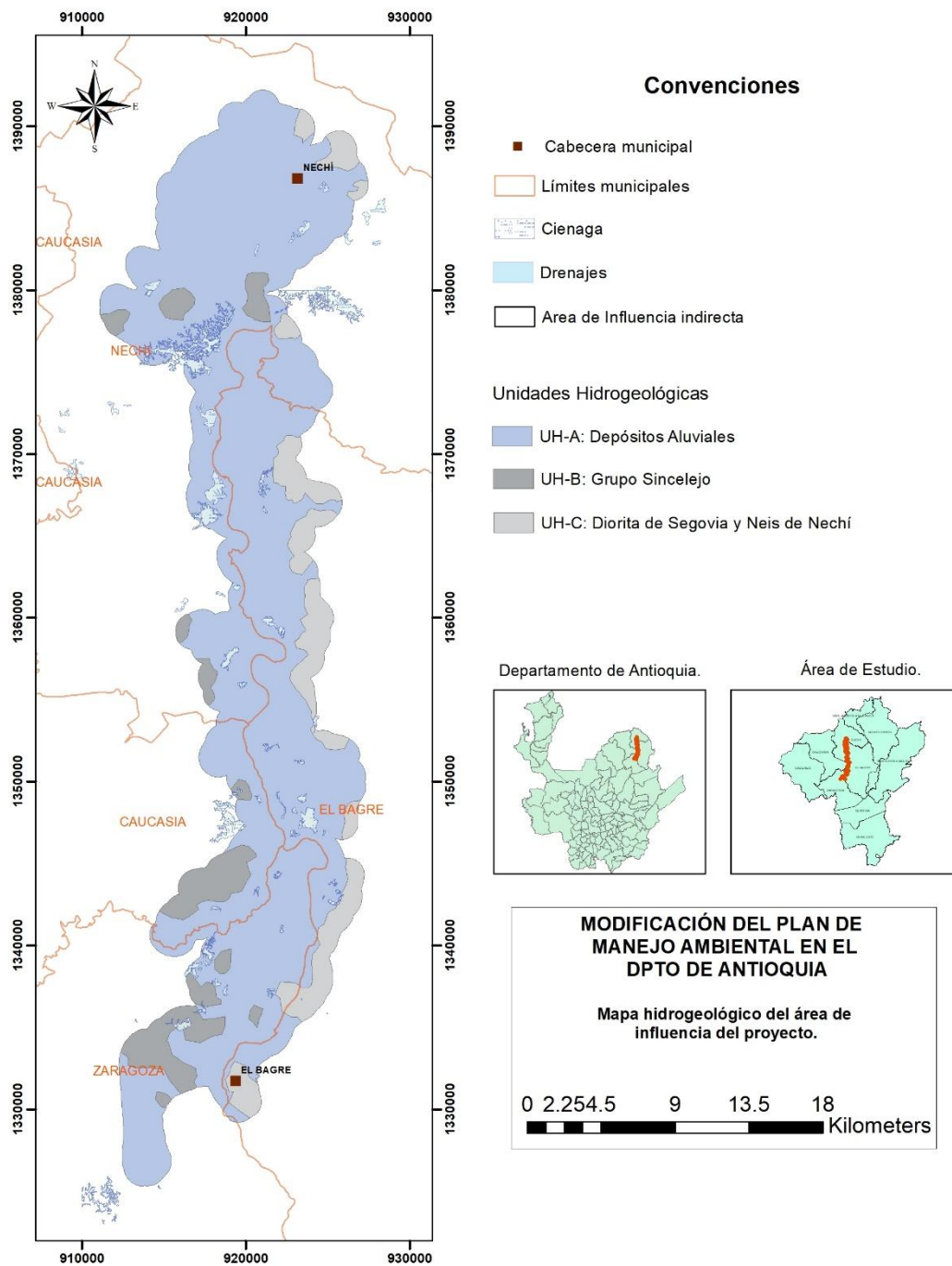
Unidad correspondiente litológicamente a la Formación Morroa, la cual se compone de areniscas friables y conglomerados poco consolidados; por lo cual sugiere unas permeabilidades altas. De acuerdo a sus características granulométricas y a su ubicación estratigráfica, se asocia a un acuífero confinado.

• Unidad hidrogeológica UH-C: Diorita de Segovia y Neis de Nechí

Es la unidad que infrayace todas las unidades anteriormente descritas y está asociada a las unidades cristalinas Diorita de Segovia que se compone de cuarzdiorita, diorita y tonalita, y el Neis de Nechí compuesto por neises cuarzo feldespáticos y metatonalíticos. De acuerdo a sus características litológicas, la

permeabilidad de esta unidad es muy baja por lo cual se comporta como un acuífugo, conformando la base de la secuencia estratigráfica en el área de influencia.

Figura 9. Mapa hidrogeológico del área de influencia del proyecto.



5.4 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

5.4.1 Trabajo de campo

Para la caracterización de las unidades litoestratigráficas del área de influencia del proyecto, se realizó la exploración geofísica por medio de la técnica de Sondeos Electromagnéticos con Dominio en el Tiempo (SEDT). Inicialmente, se adelantó una campaña de adquisición de datos geofísicos el día 6 de octubre de 2016. En total se llevaron a cabo 20 SEDT con una profundidad máxima de 201 metros. El equipo utilizado para la adquisición de los datos fue un ABEM WalkTEM, el cual consta de una antena transmisora de 40x40 metros y dos antenas receptoras de 10x10 y 0.5x0.5 metros. La ubicación de los SEDT se determinó teniendo en cuenta el objetivo del estudio y las limitaciones y distribución del terreno. La Figura 10 muestra la distribución de los SEDT realizados en el área de influencia del proyecto.

En la Figura 11 y la Figura 12 se muestran ejemplos de la adquisición de datos en la campaña de campo.

Figura 10. Distribución de los SEDT en el área de influencia del proyecto.

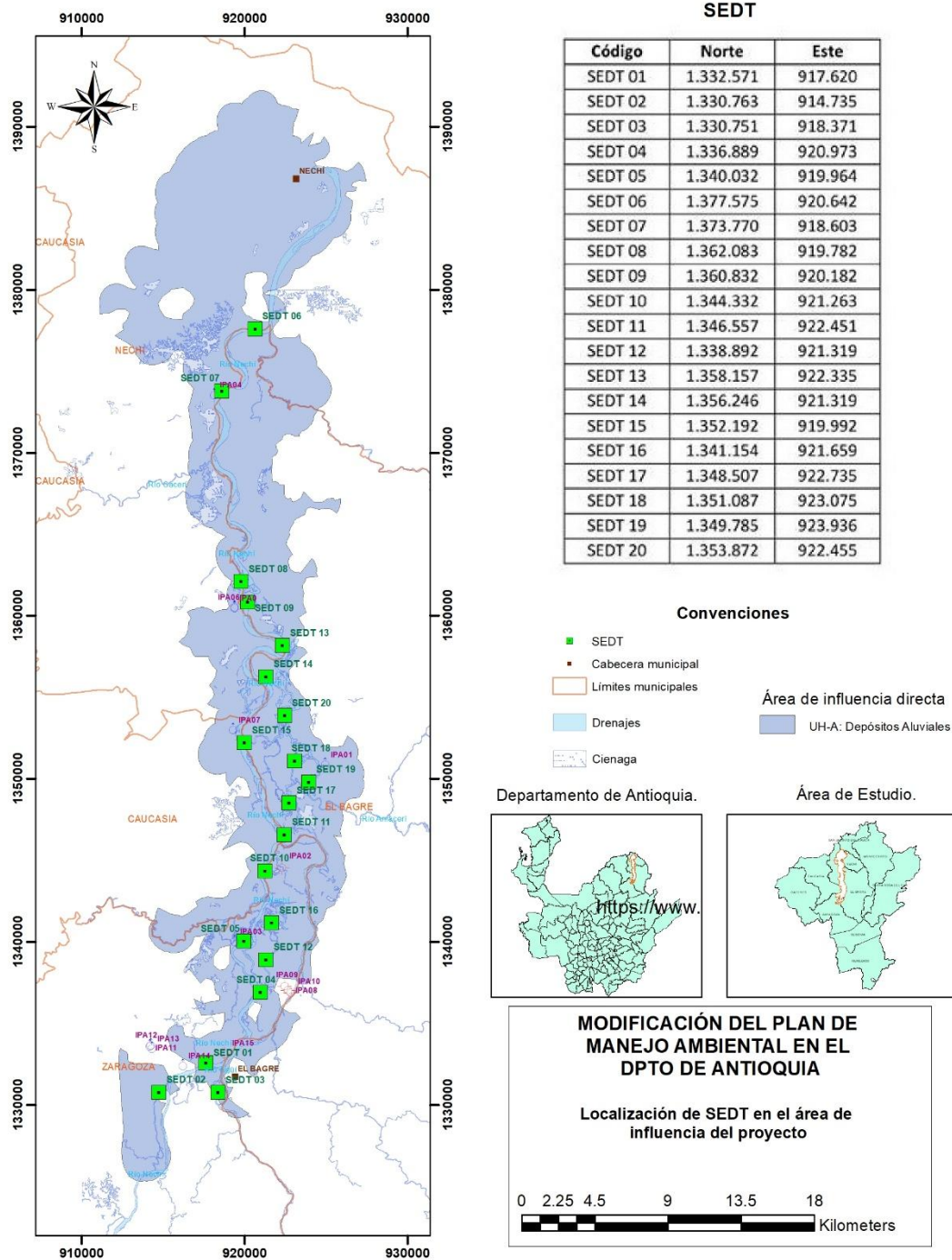


Figura 11. Campaña de adquisición de datos en campo correspondientes al SEDT_03.



Figura 12. Campaña de adquisición de datos en campo correspondientes al SEDT_05.



- Procesamiento de datos SEDT

Los resultados de los SEDT son mostrados como sondeos unidimensionales que exhiben la variación de la resistividad en función de la profundidad. En la Tabla 2 se pueden ver las características de cada uno de los SEDT realizados en el área de influencia del proyecto.

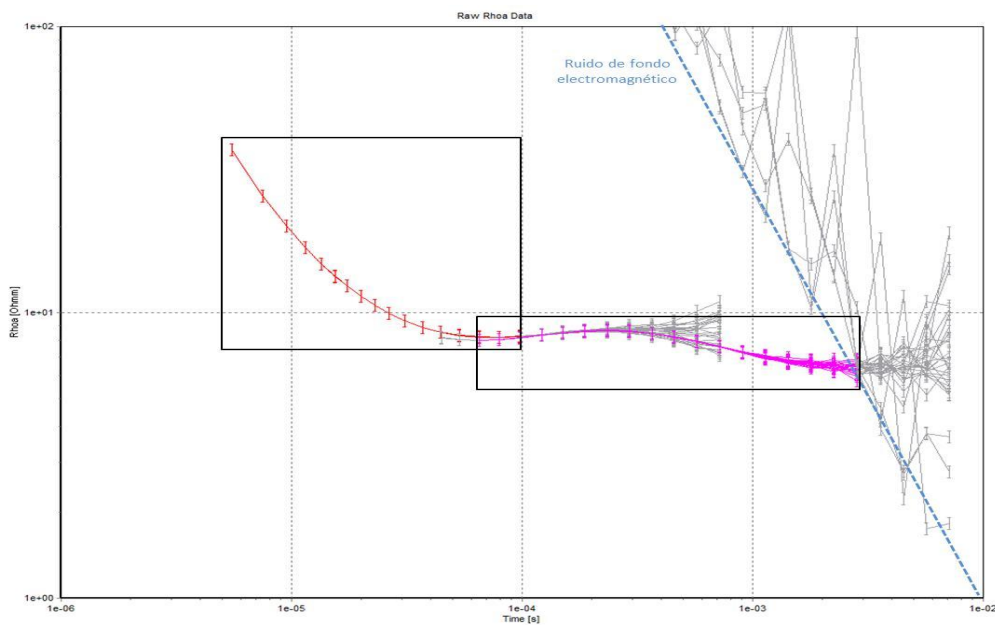
Tabla 2. Características de los SEDT realizados en la zona de estudio.

Código	Localización (MAGNA-SIRGAS origen Bogotá)		Altura GPS (m)	Profundidad de investigación (m)	Data residual (-)
	Norte	Este			
SEDT01	1.332.571	917.620	57	108	1,7
SEDT02	1.344.332	921.263	50	106	1,5
SEDT03	1.346.557	922.451	46	57	0,5
SEDT04	1.338.892	921.319	57	143	1,0
SEDT05	1.358.157	922.335	46	196	1,5
SEDT06	1.356.246	921.319	51	42	1,1
SEDT07	1.352.192	919.992	50	93	1,4
SEDT08	1.341.154	921.659	54	145	0,9
SEDT09	1.348.507	922.735	48	164	0,6
SEDT10	1.351.087	923.075	49	201	0,5
SEDT11	1.349.785	923.936	51	155	0,8
SEDT12	1.330.763	914.735	63	139	0,9
SEDT13	1.353.872	922.455	48	92	1,5
SEDT14	1.330.751	918.371	60	114	2,0
SEDT15	1.336.889	920.973	57	166	2,2
SEDT16	1.340.032	919.964	57	130	0,7
SEDT17	1.377.575	920.642	44	79	1,4
SEDT18	1.373.770	918.603	47	110	1,8
SEDT19	1.362.083	919.782	49	129	0,4
SEDT20	1.360.832	920.182	49	75	0,7

Los datos adquiridos en campo por medio de la técnica SEDT corresponden a curvas del comportamiento de la resistividad aparente (ρ_a) en función del

tiempo (t), como se observa en la Figura 13 Las variaciones de resistividad aparente para tiempos cortos ($<100 \mu\text{s}$) están relacionadas a la distribución de los valores de resistividad en las capas someras mientras que las variaciones de resistividad aparente para tiempos largos ($>100 \mu\text{s}$) están relacionadas a variaciones de la resistividad en las capas más profundas. Una vez seleccionado los datos apropiados (aquellos que estén sin la influencia del ruido de fondo electromagnético medido en campo), se realiza un ajuste automático mediante la técnica de inversión suavizada²⁴ (Constable et al., 1987, citado en Castillo, 2012), para estimar la distribución de la resistividad del subsuelo a lo largo de un sondeo unidimensional. Por último, mediante un proceso iterativo es calculado el modelo de capas por inversión robusta hasta que el dato residual se ubique por debajo del límite aceptable 2.5 (adimensional).

Figura 13. Curva de resistividad aparente (ρ_a) vs. tiempo (t).

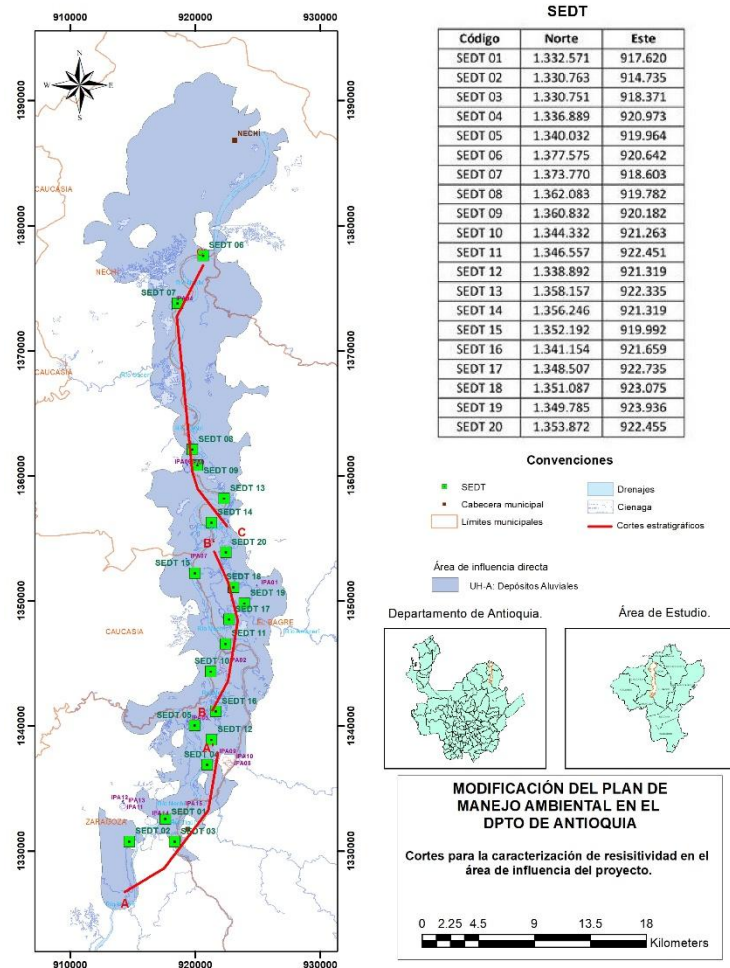


²⁴ CASTILLO, Luis. Estudio de factibilidad hidrogeológica en la porción sur-oriente de la ciudad de San Juan del Rio. Qro, con la aplicación de métodos electromagnéticos. Trabajo de grado Ingeniero Geofísico. Ciudad de México.: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería, 2012. 65 p

Los modelos de capas obtenidos del procesamiento de los datos geofísicos adquiridos en campo se encuentran consignados en el *Anexo A*.

A partir de los resultados obtenidos de la inversión de los SEDT se realizó la correlación entre diferentes sondeos permitiendo identificar la relación de los valores de resistividad en función de la profundidad (Ohm.m). La Figura 14 muestra la ubicación de los cortes realizados para la caracterización de resistividades, de acuerdo a los resultados obtenidos de la prospección geofísica para el área de influencia del proyecto.

Figura 14. Cortes para la caracterización de resistividad en el área de influencia del proyecto.



Los valores de resistividad de los cortes A-A', B-B' y C-C' obtenidos a partir del procesamiento de los datos se encuentran en un rango entre 5 y 3.000 Ohm.m, los cuales se dividen en cuatro rangos: valores bajos, medios, altos y muy altos. Inicialmente, se encuentran los valores de resistividad medios, los cuales predominan en la superficie del área de influencia del proyecto mostrándose en cada uno de los cortes realizados con valores de resistividad que van desde los 20 hasta los 60 Ohm.m y espesores que no superan los 10 metros. Debajo de

esta se encuentra una capa de valores altos de resistividad, los cuales oscilan entre 80 y 300 Ohm.m, su espesor es variable ya que en todos los cortes desaparecen estos valores lateralmente y llegan a tener espesores máximos de 30 metros. Infrayaciendo, aparecen valores bajos de resistividad los cuales van desde 10 hasta 25 Ohm.m, con espesores que varían de 5 a 160 metros. En los cortes A-A' y B-B' aparecen de nuevo valores altos de resistividad pero no de una manera homogénea ya que no son constantes en todo el corte. Finalmente, infrayaciendo toda la secuencia se encuentran los valores muy altos de resistividad, con rangos que van de 900 a 3000 Ohm.m, sus espesores mínimos son de 5 metros y en algunos casos son el límite de la profundidad máxima de investigación. La Figura 15, Figura 16 y la Figura 17 muestran la caracterización de valores de resistividad para los cortes A-A', B-B' y C-C', respectivamente.

Figura 15. Correlación de resistividades en el corte A-A'.

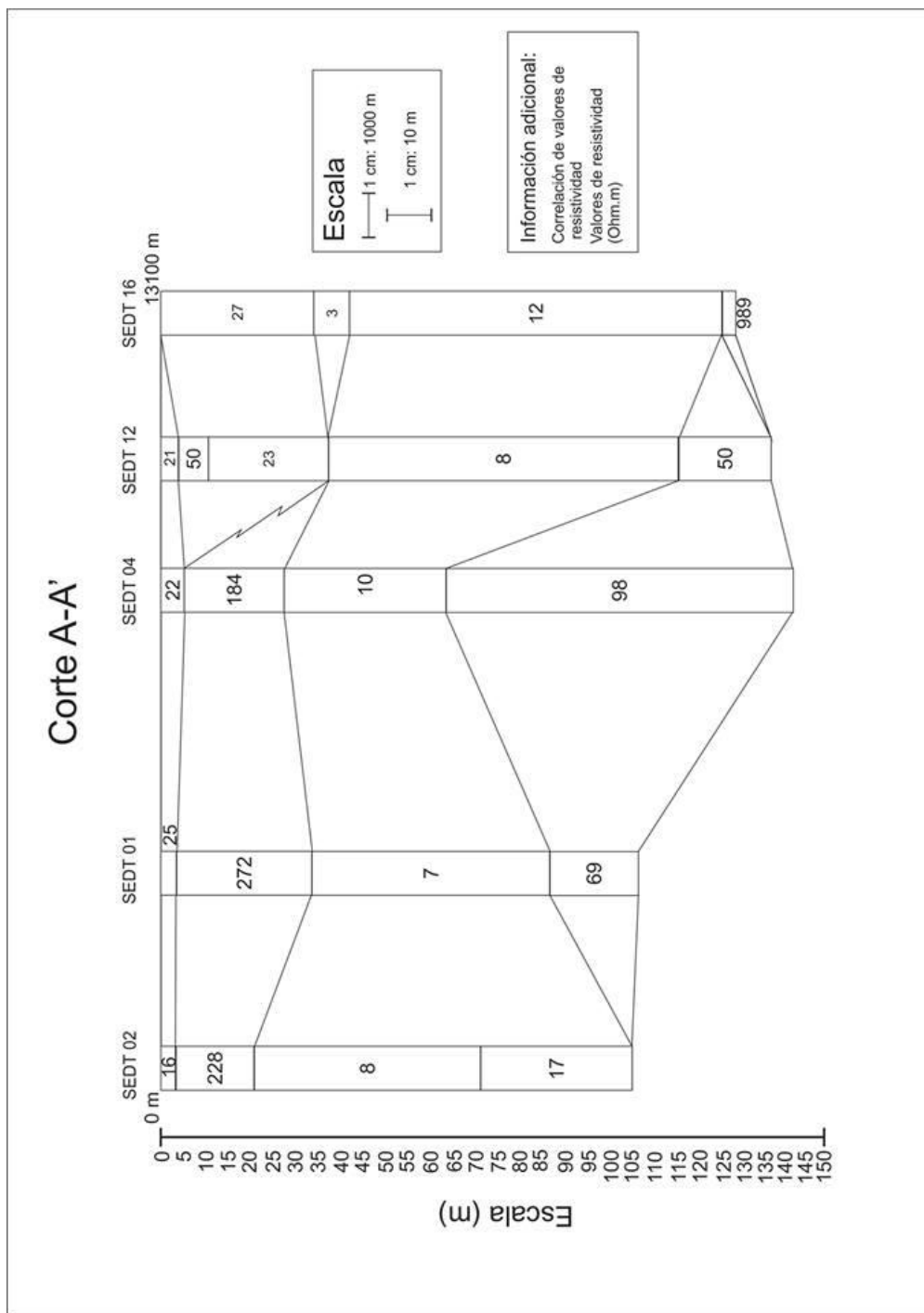


Figura 16. Correlación de resistividades en el corte B-B'

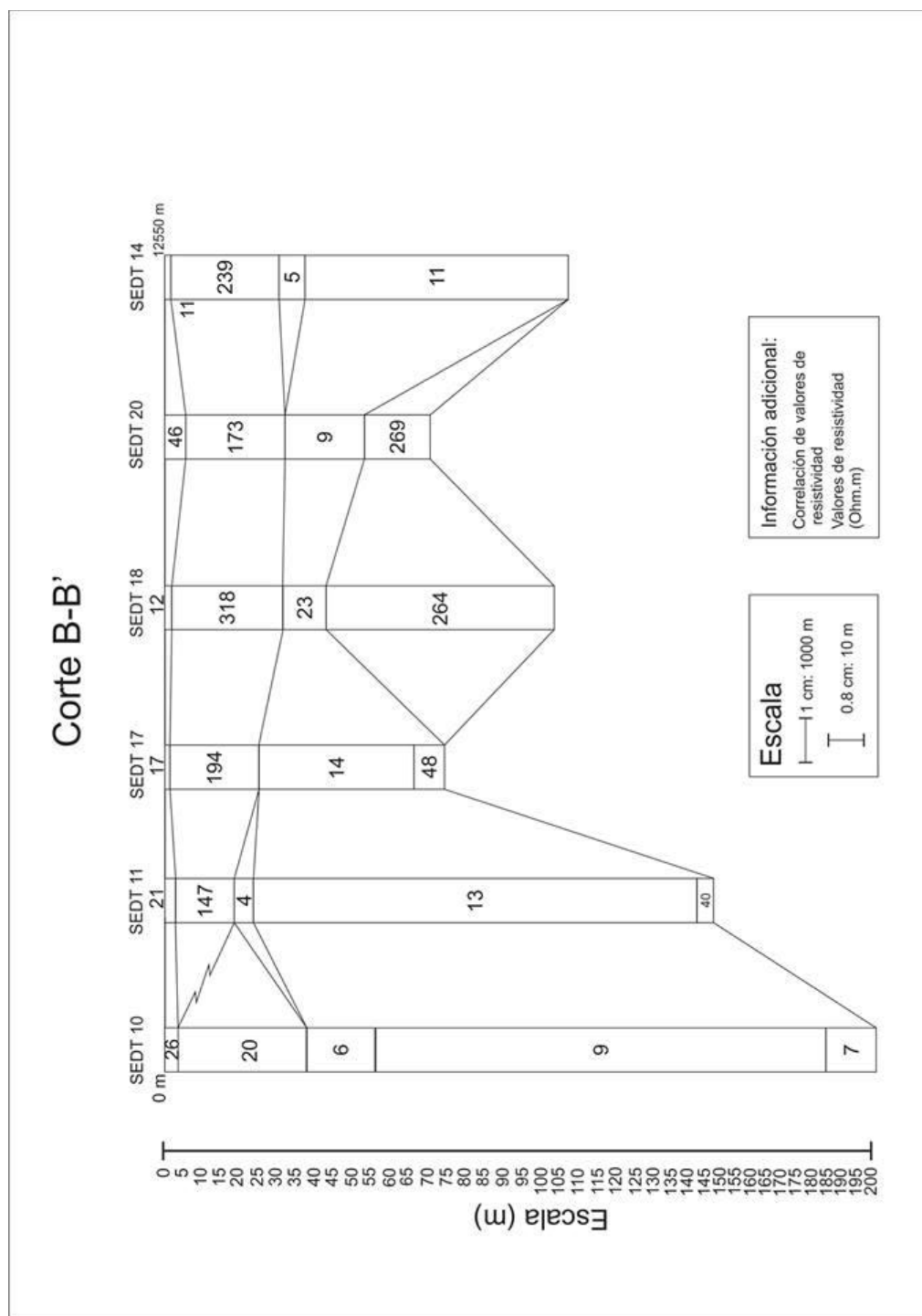
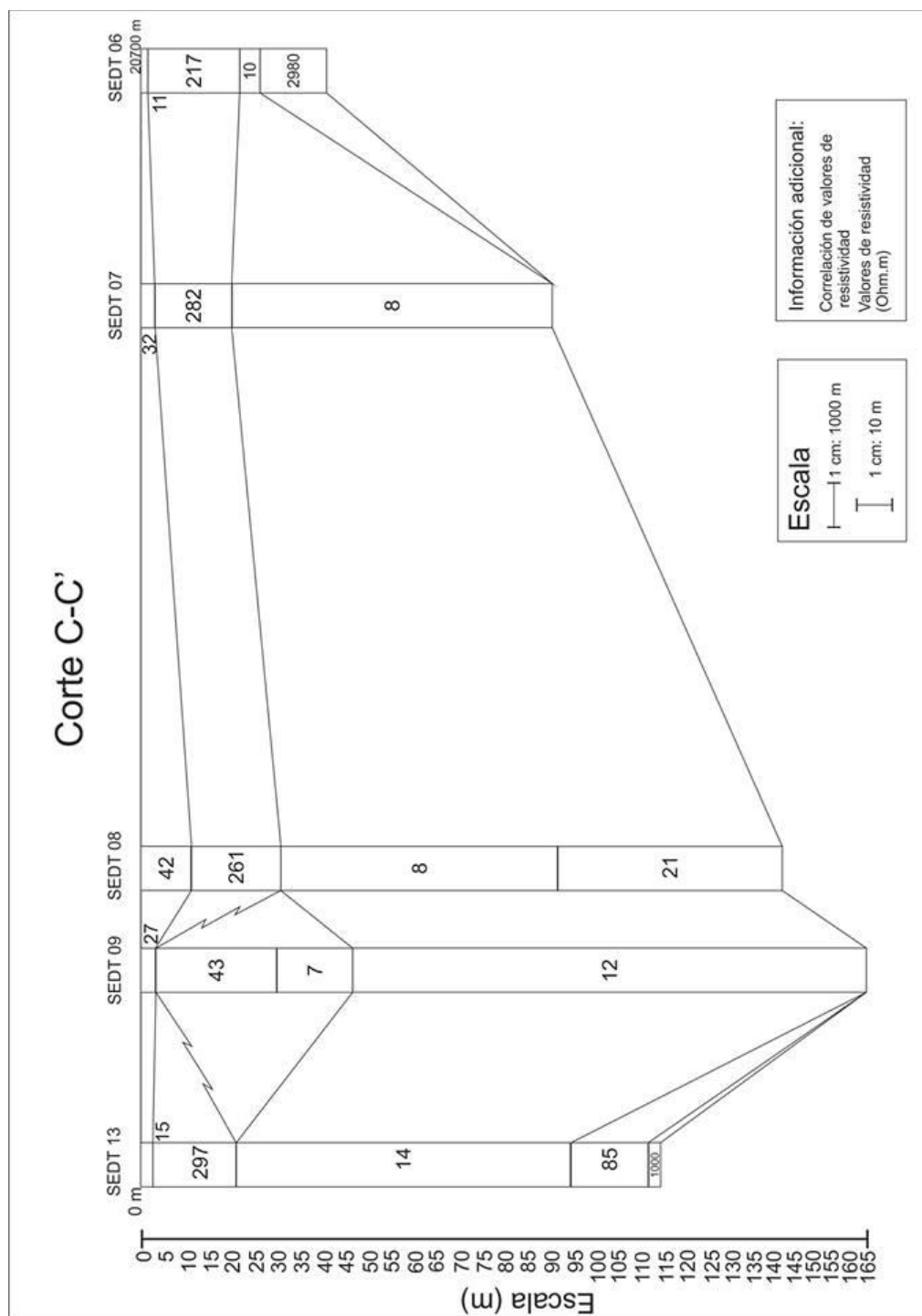


Figura 17. Correlación de resistividades en el corte C-C'.



5.4.2. Interpretación de resultados a partir de Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDT).

A partir de los resultados de los SEDT y descripción geológica del área de influencia se estableció un rango de valores de resistividad característico de cada una de las unidades litoestratigráficas existentes en el área de influencia del proyecto, como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Rango de resistividad de las unidades litoestratigráficas existentes en el área de influencia del proyecto.

Formación geológica	Unidad	Litología	Resistividad (Ohm.m)
Depósitos aluviales (Qal)	Qal (s)	Suelos de los depósitos aluviales	10 – 49
	Qal (c)	Depósitos aluviales contaminados por acciones agrícolas o ganaderas	1,7 – 4,5
	Qal (arc-lim)	Arcillas con diferente proporción de limos	10 – 23
	Qal (are-lim)	Arenas limosas	43 – 50
	Qal (are)	Arenas “limpias”	105 – 115
	Qal (g)	Gravas con diferente proporción de arenas	173 – 318
Grupo Sincelajo (NQs)	NQs (arc)	Arcillas	6 – 10
	NQs (arc-lim)	Arcillas limosas	10 – 14
	NQs (lim)	Limos	17 – 27
	NQs (are-lim)	Arenas limosas	40 – 85
	NQs (are)	Arenas	98 – 105
	NQs (g)	Gravas	264 – 269
Diorita de Segovia (Jdse)	Jdse	Dioritas, cuarzodioritas y tonalitas	903 – 1.000
Neis de Nechí (Pnn)	Pnn	Neis cuarzo feldespático	2.980

Los depósitos aluviales Qal evidenciaron un rango de resistividades que se encuentra con valores entre 1,7 y 318 Ohm.m, los cuales fueron divididos en cinco unidades de resistividad. Inicialmente, se evidencian los suelos de los depósitos aluviales con resistividades que van de 10 a 49 Ohm.m los cuales junto a las arcillas con diferente proporción de limos con nomenclatura Qal (arc-lim), son las capas más superficiales del área de estudio. Los depósitos aluviales contaminados por acciones agrícolas o ganaderas Qal (c) evidenciaron los rangos más bajos de resistividades con valores de 1,7 a 4,5 Ohm.m. Los diferentes rangos de las siguientes litologías para el depósito aluvial varían entre 43-50 Ohm.m para las arenas limosas Qal (are-lim), 105-115 Ohm.m para las arenas Qal (are) y los de mayor rango de resistividad los evidenciaron las capas de gravas con diferente proporción de arena Qal (g) con rangos de resistividad que van desde 173 a 318 Ohm.m.

La litología que infrayace los depósitos aluviales es el Grupo Sincelejo, el cual se caracterizó y separó en dos formaciones, la Formación Betulia, la cual evidenció rangos de resistividades entre 6 y 85 Ohm.m con litologías arcillosas, arcillo limosas, limos y por último limo arenosas, sus rangos de resistividad aumentan a medida que aumenta el tamaño de grano y el contenido de arena para cada una de las litologías; la segunda es la Formación Morroa, con resistividades entre 98 y 105 Ohm.m para la unidad arenosa y un rango de 264 a 269 Ohm.m para la unidad gravosa.

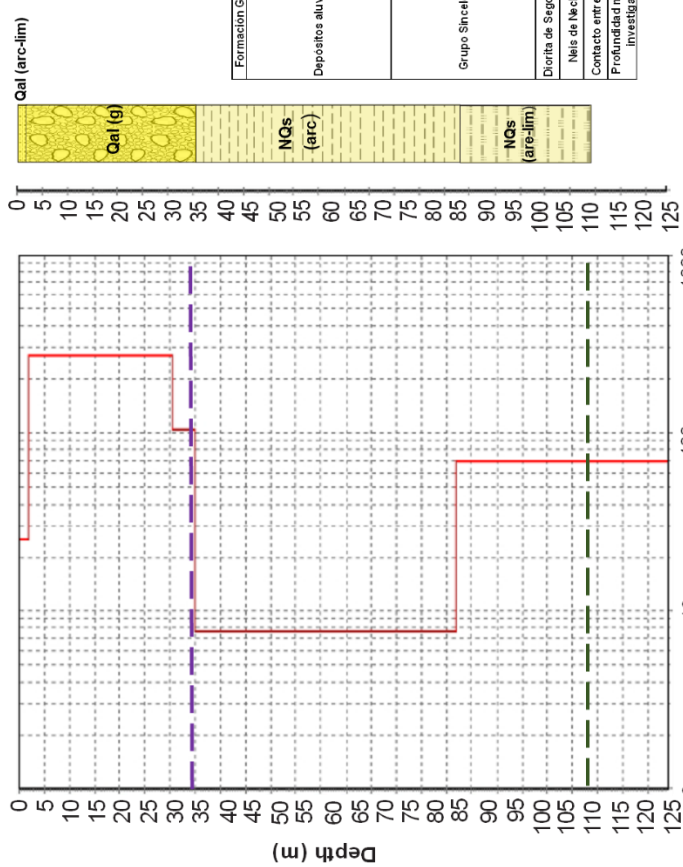
Infrayaciendo estos depósitos sedimentarios se encuentran las formaciones que evidenciaron más altos valores de resistividad, la Diorita de Segovia (Jdse) con un rango de resistividades de 903 a 1.000 Ohm.m y el Neis de Nechí (Pnn) con un valor de resistividad de 2.980 Ohm.m.

De la Figura 18 a la Figura 37 se muestra el modelo geológico interpretado a partir del modelo de capas obtenido de la inversión de los datos SEDT. Los resultados de los SEDT se interpretan en términos de modelos geofísicos simplificados, suponiendo que las propiedades físicas son homogéneas dentro de cada una de las capas. Por tal motivo, la interpretación sólo representa una aproximación de las condiciones geológicas y estructuras que involucran un cambio en las propiedades del medio, de acuerdo a los objetivos de interés.

Figura 18. Interpretación de resultados SEDT01

SEDT 01 Modelo de capas - Gráfica Interpretación geológica Modelo de capas - Tabla

#	Res. (Ohm.m)	Esp. (m)	Prof. (m)
1	25.4	1.9	1.9
2	272	28.6	30.5
3	7.76	51.9	87
4	69.3	21	108



Leyenda

Formación Geológica	Unidad	Litología
Depósitos aluviales (Qal)	Qal (s)	Suelos de los depósitos aluviales
	Qal (c)	Depósitos aluviales contaminados por acciones agrícolas o ganaderas
	Qal (arc-lim)	Arcillas con diferente proporción de limos
	Qal (arc-lim)	Arenas limosas
Grupo Sinclejo (NGs)	Qal(are)	Arenas "limpias"
	Qal(g)	Gravas con diferente proporción de arenas
	NGs (arc)	Arcillas
	NGs (arc-lim)	Arcillas limosas
	NGs (lim)	Limos
Formación Batulia	NGs (arc-lim)	Arenas limosas
	NGs (arc)	Arenas
Formación Morroa	NGs(g)	Gravas con diferente proporción de arenas
	Jdse	Dioritas, cuarzodioritas y tonalitas
Diorita de Segovia (Jdse)	Jdse	Dioritas, cuarzodioritas y tonalitas
Neis de Nechi (Pm)	Pm	Neis cuarzoalcalinos
Contacto entre unidades	-	-
Profundidad máxima de investigación	-	-

Figura 19. Interpretación de resultados SEDT02.

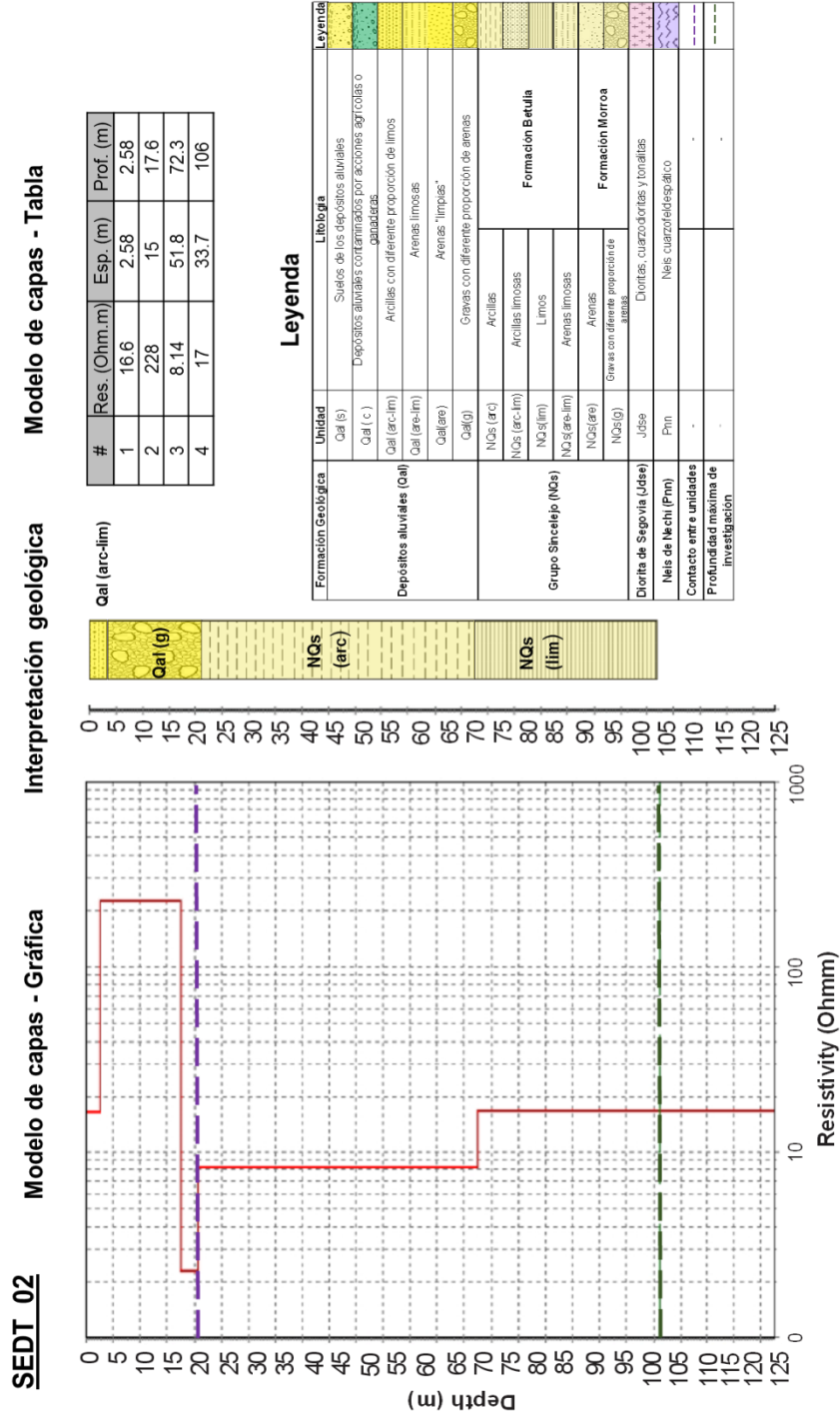


Figura 20. Interpretación de resultados SEDT03.

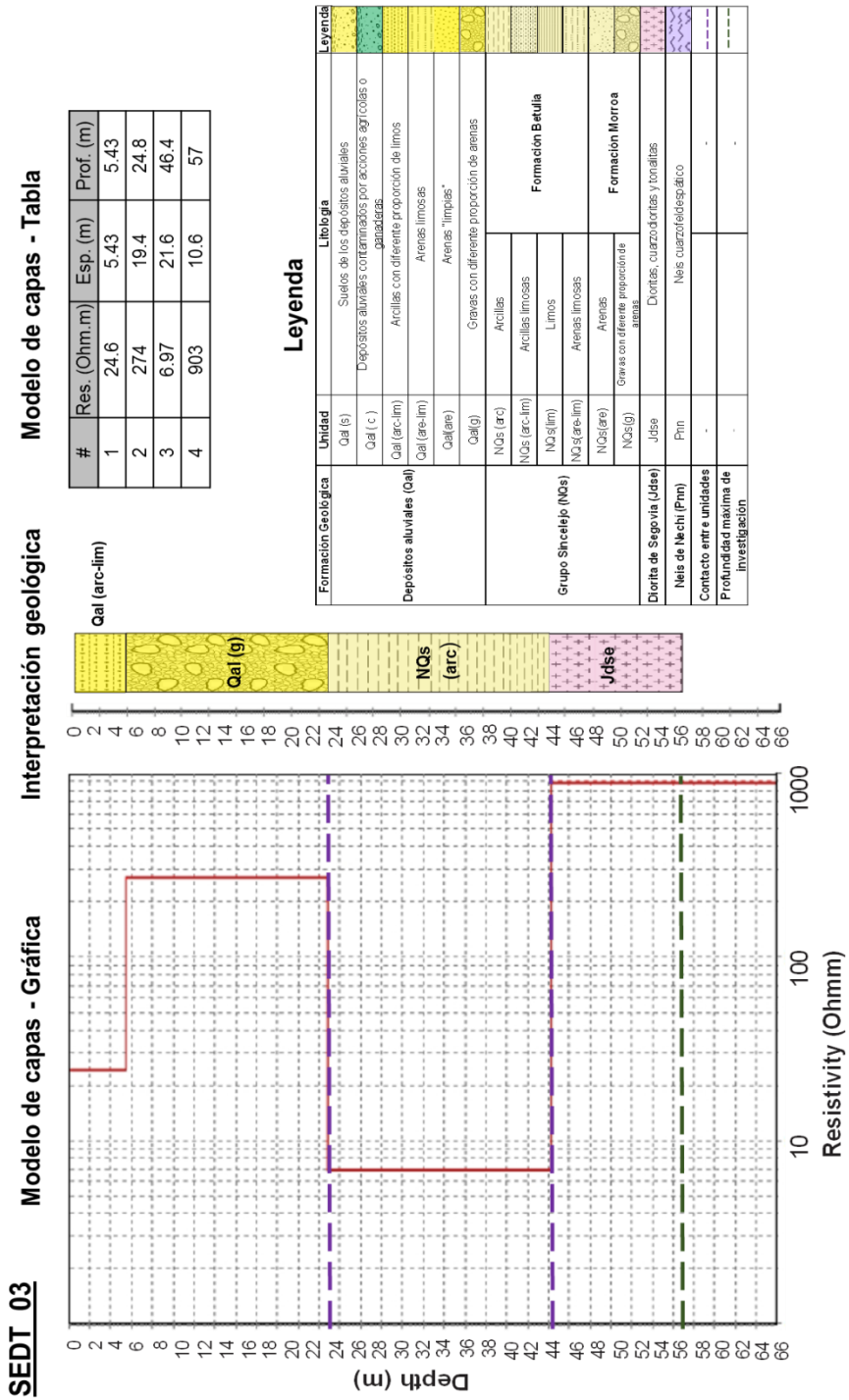


Figura 21. Interpretación de resultados SEDT04.

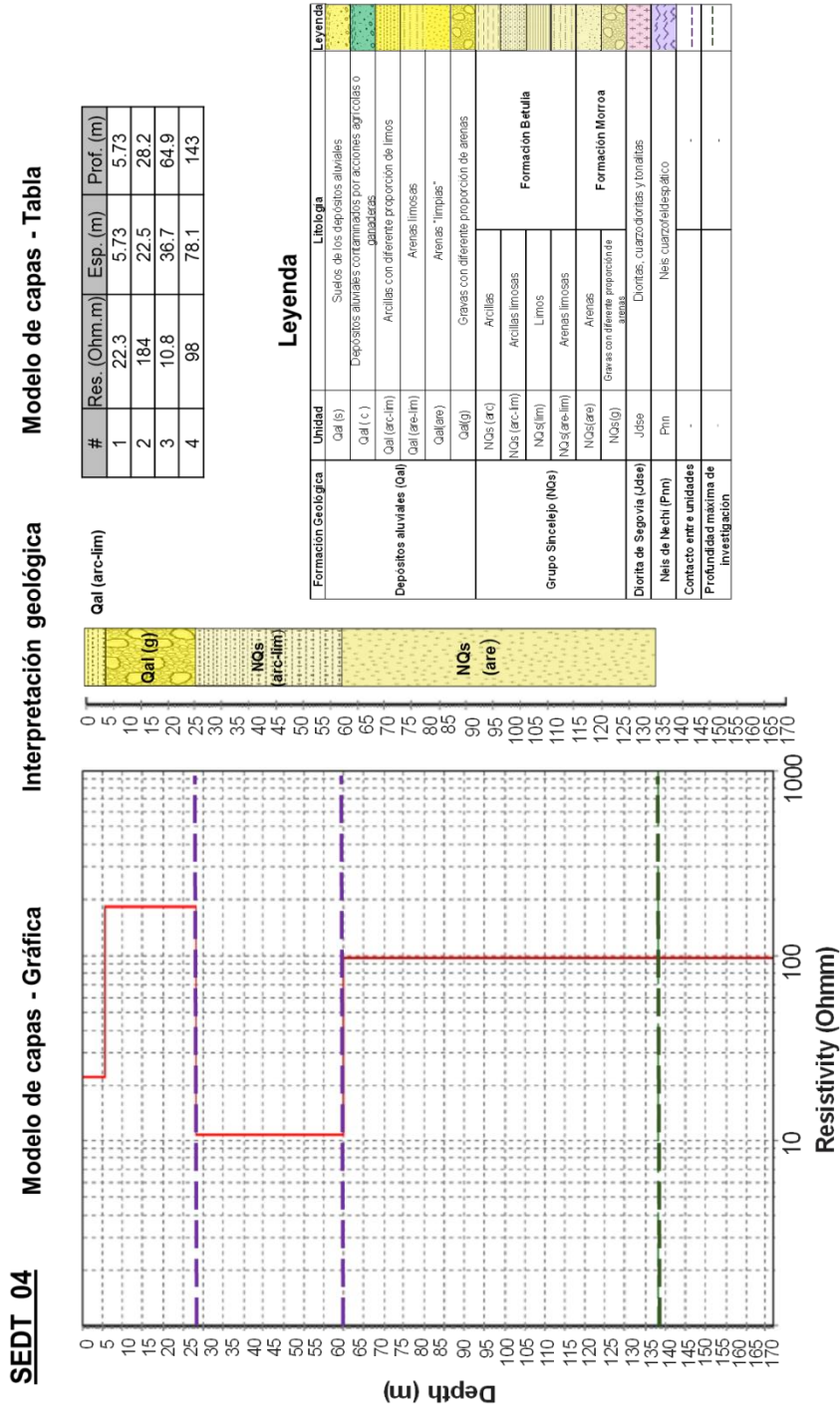


Figura 22. Interpretación de resultados SEDT05.

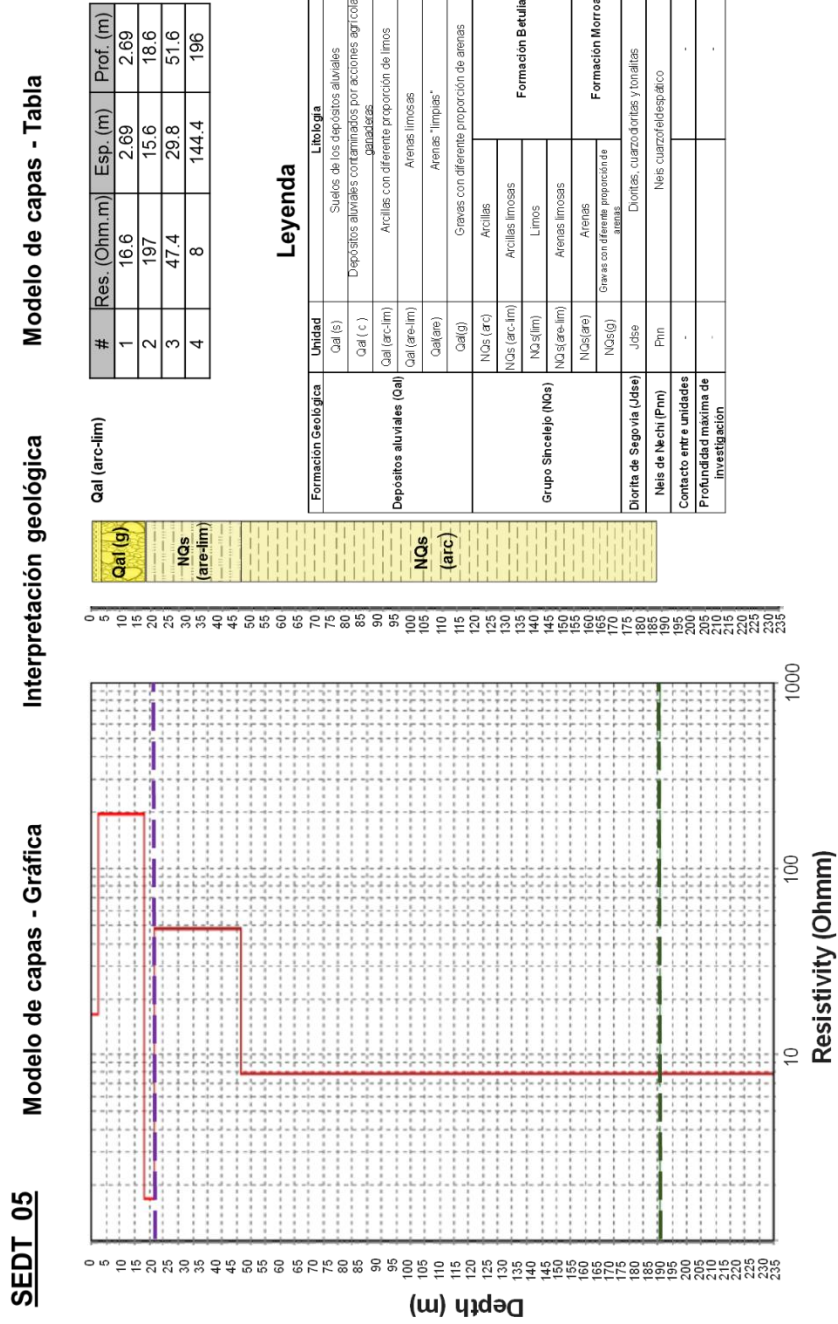


Figura 23. Interpretación de resultados SEDT06.

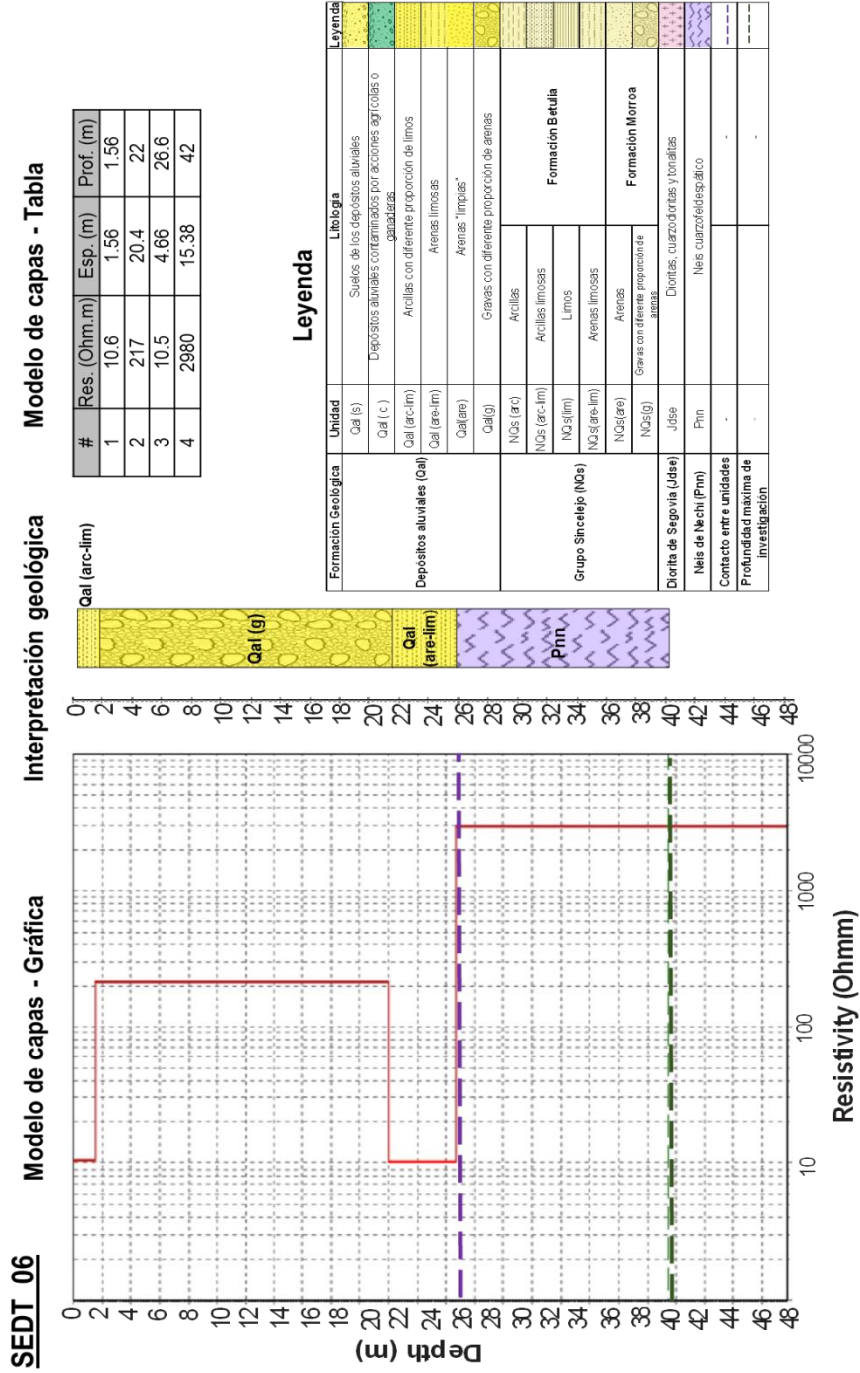


Figura 24. Interpretación de resultados SEDT07.

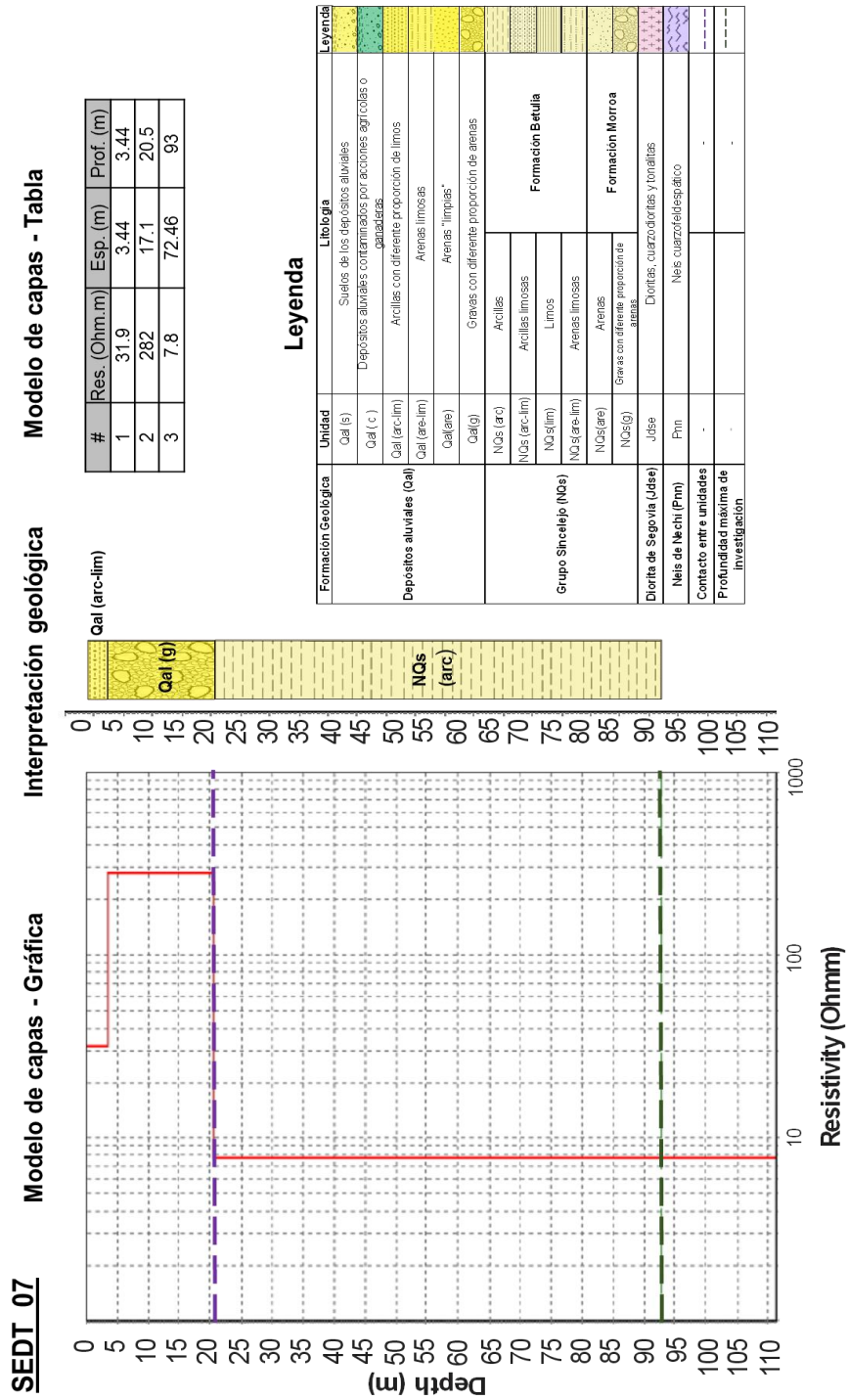


Figura 25. Interpretación de resultados SEDT08.

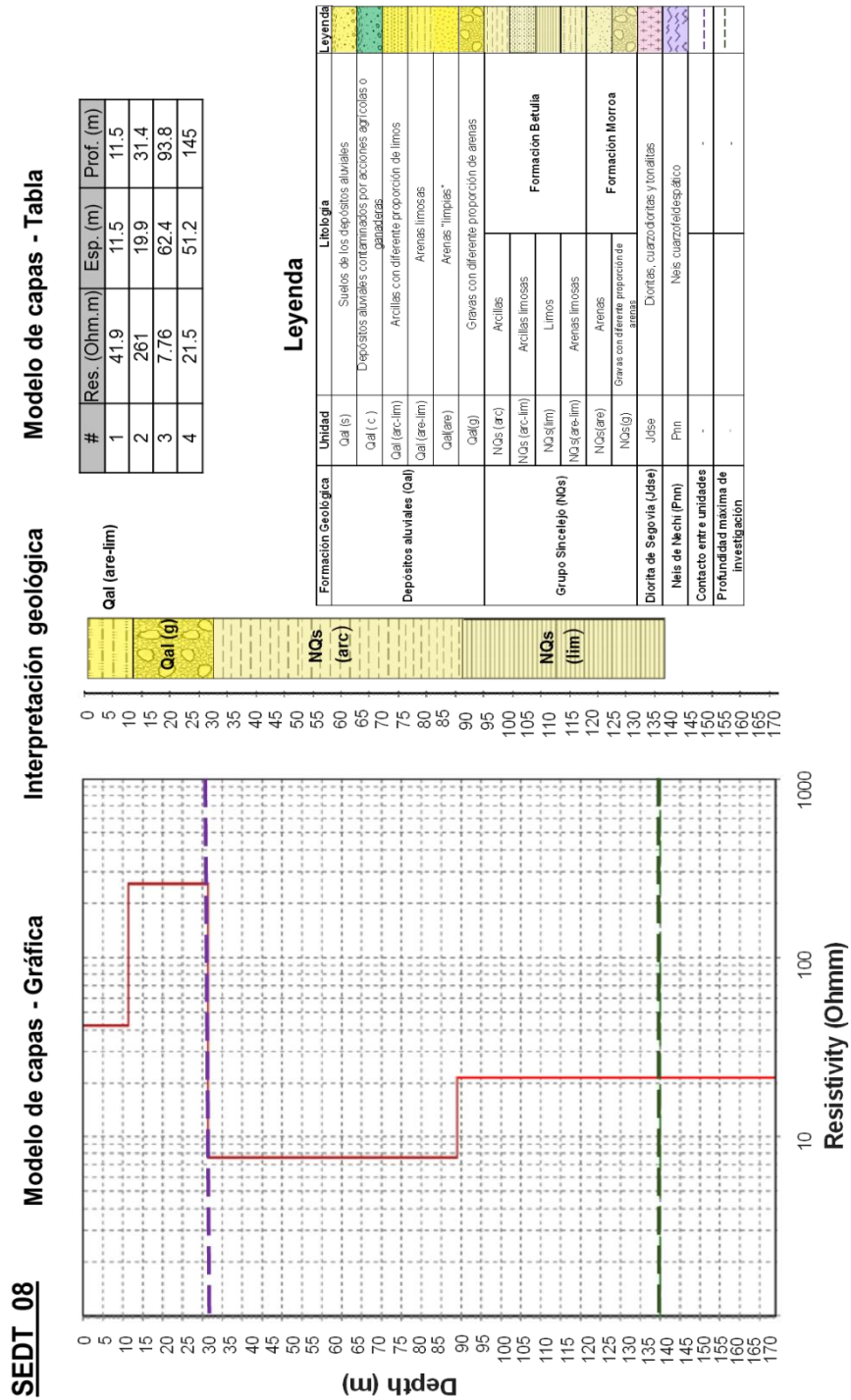


Figura 26. Interpretación de resultados SEDT09.

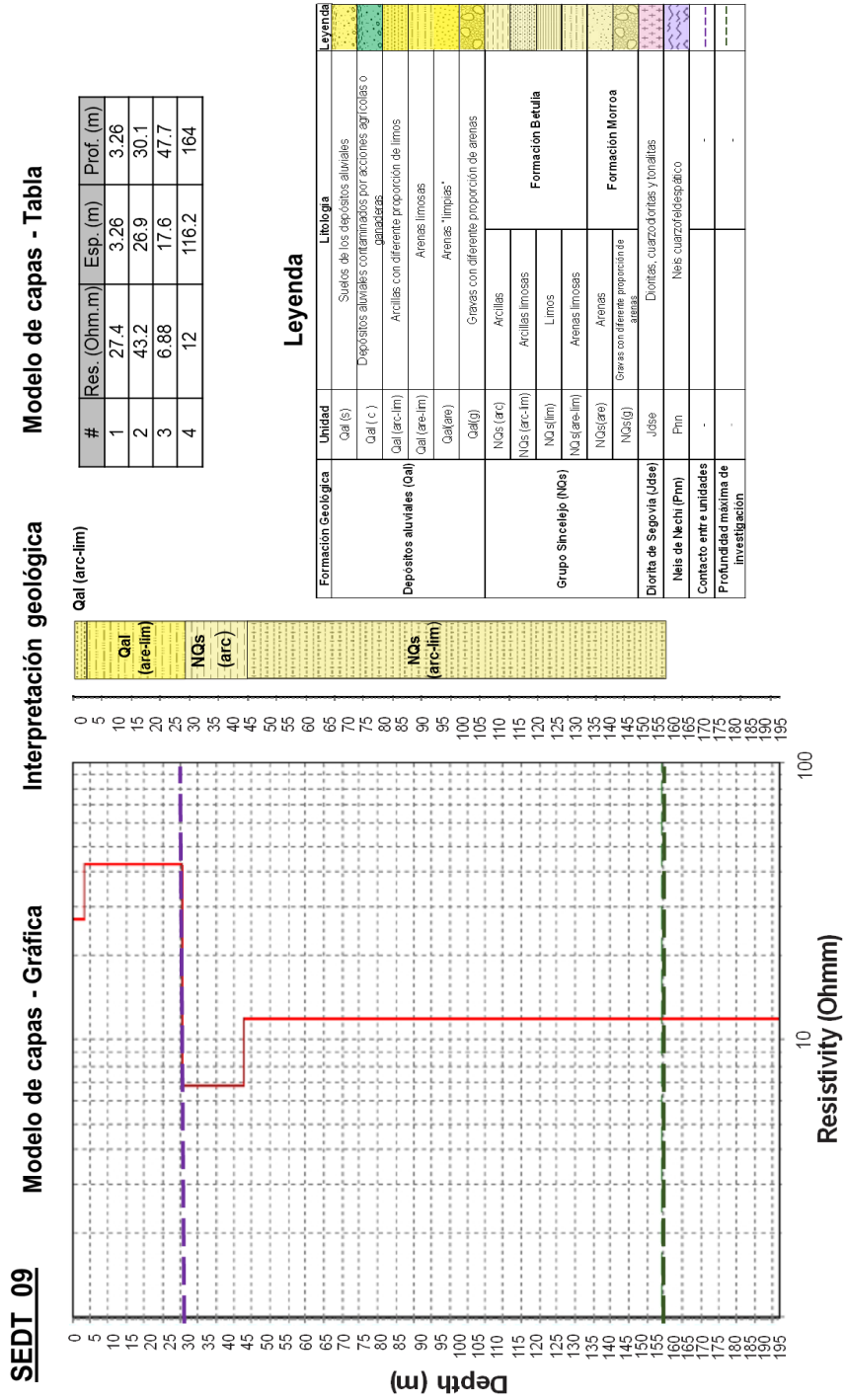


Figura 27. Interpretación de resultados SEDT10.

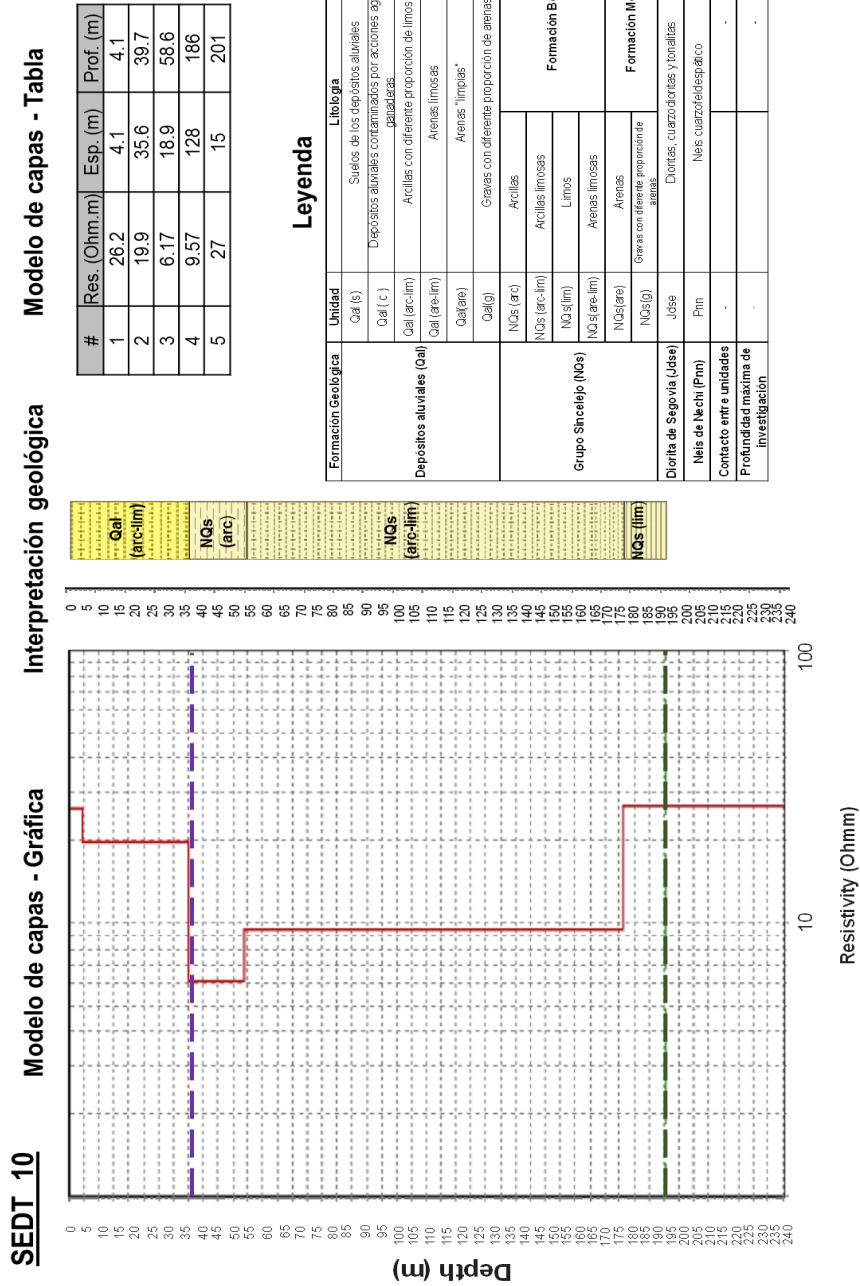


Figura 28. Interpretación de resultados SEDT11.

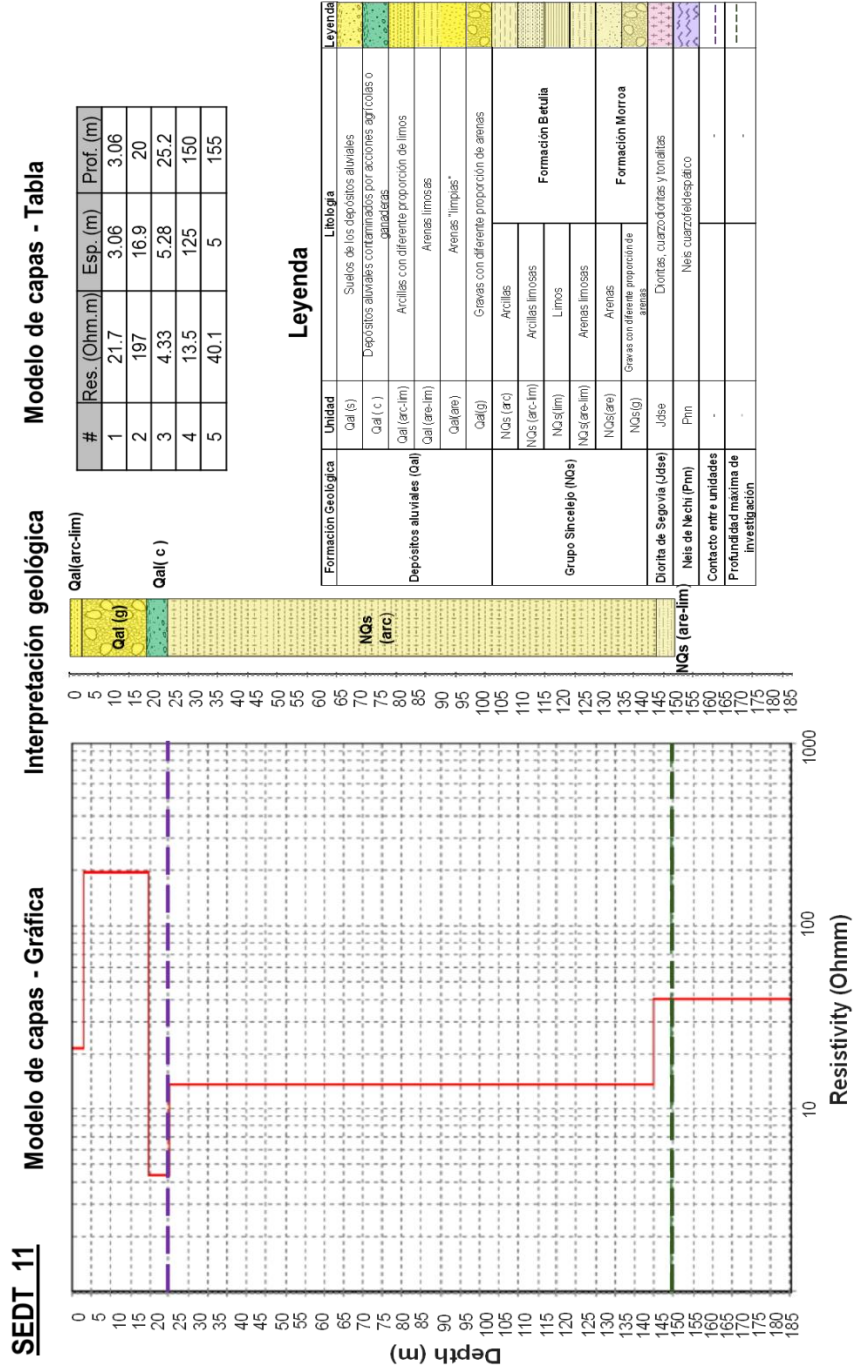


Figura 29. Interpretación de resultados SEDT12.

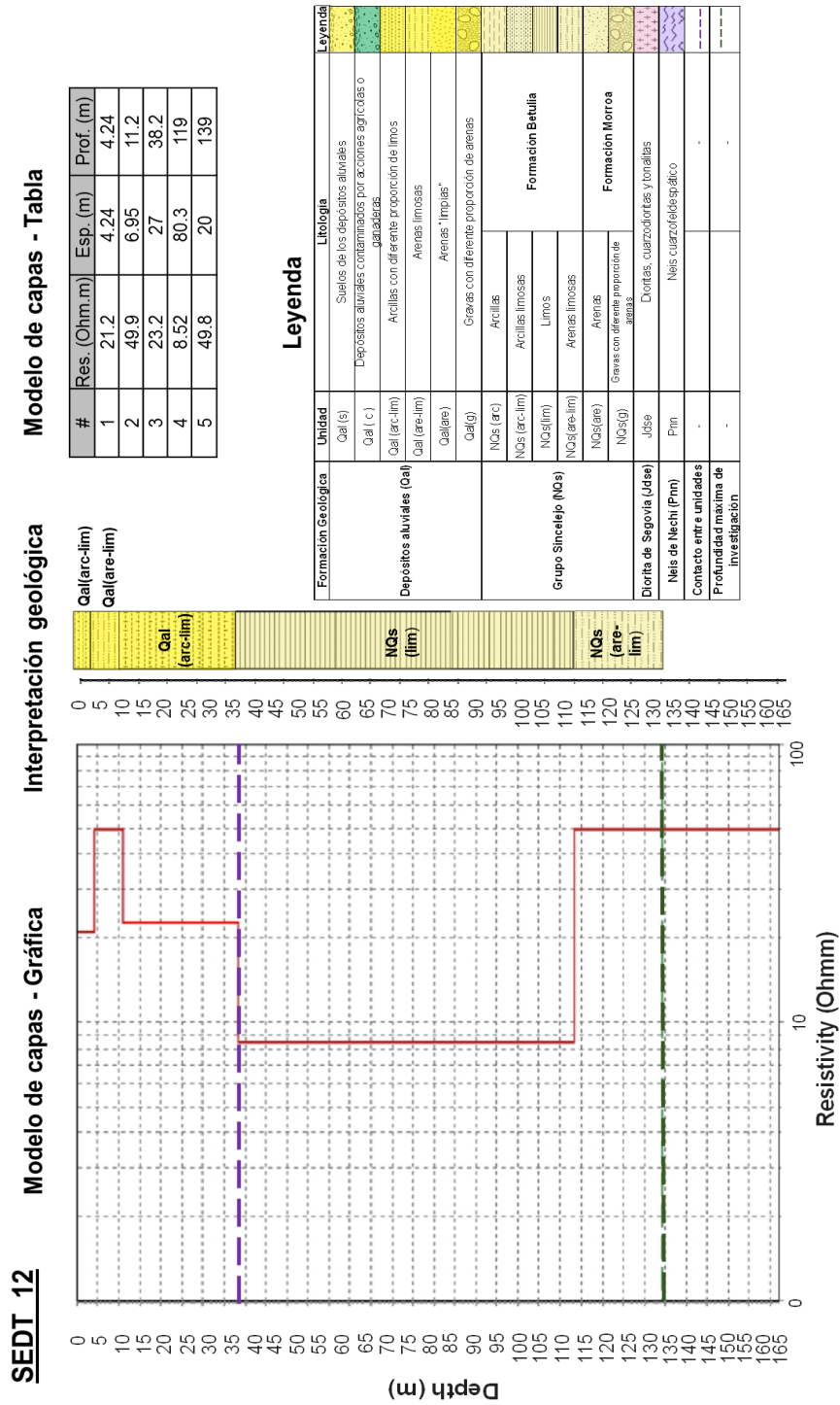


Figura 30. Interpretación de resultados SEDT13.

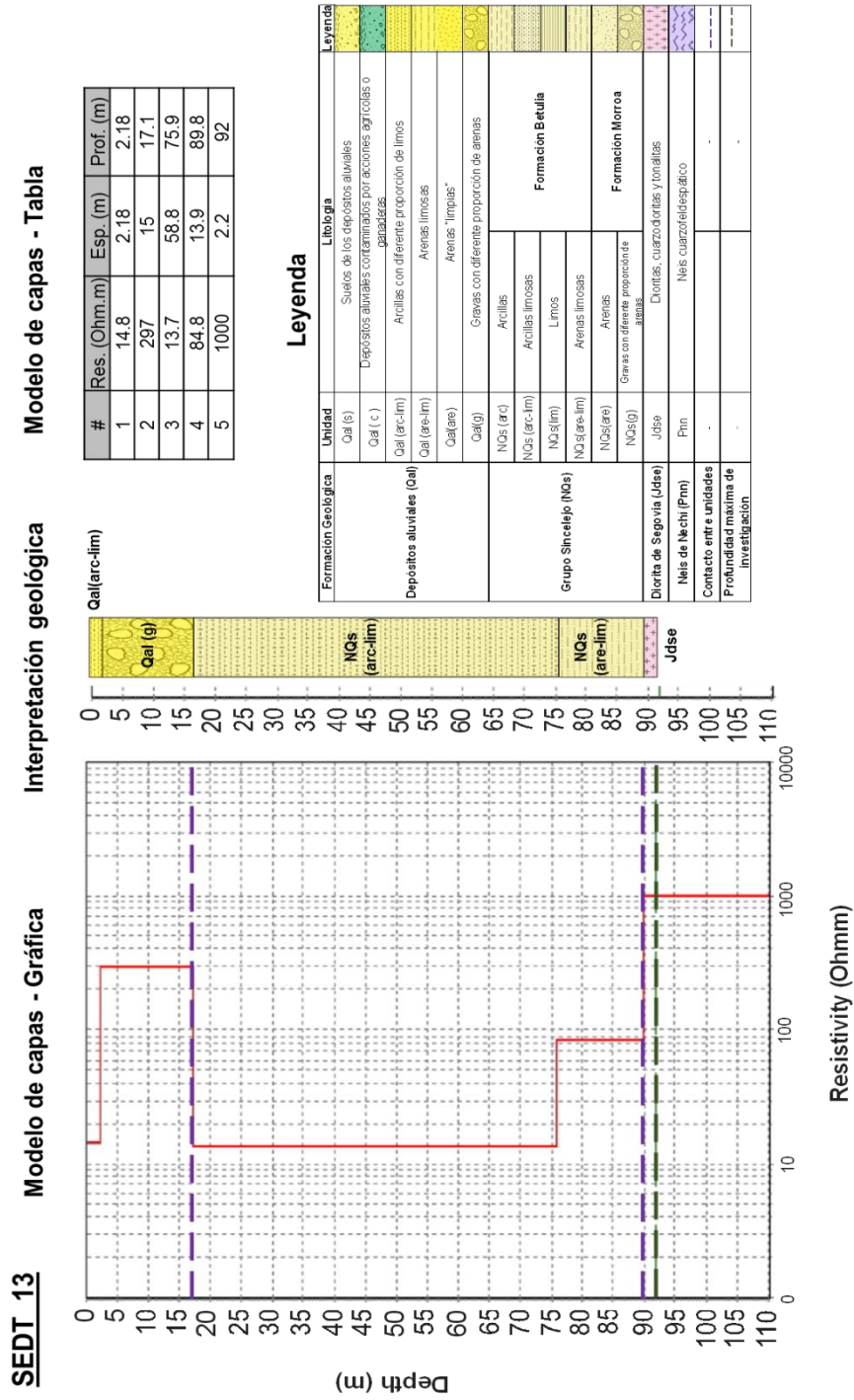


Figura 31. Interpretación de resultados SEDT14.

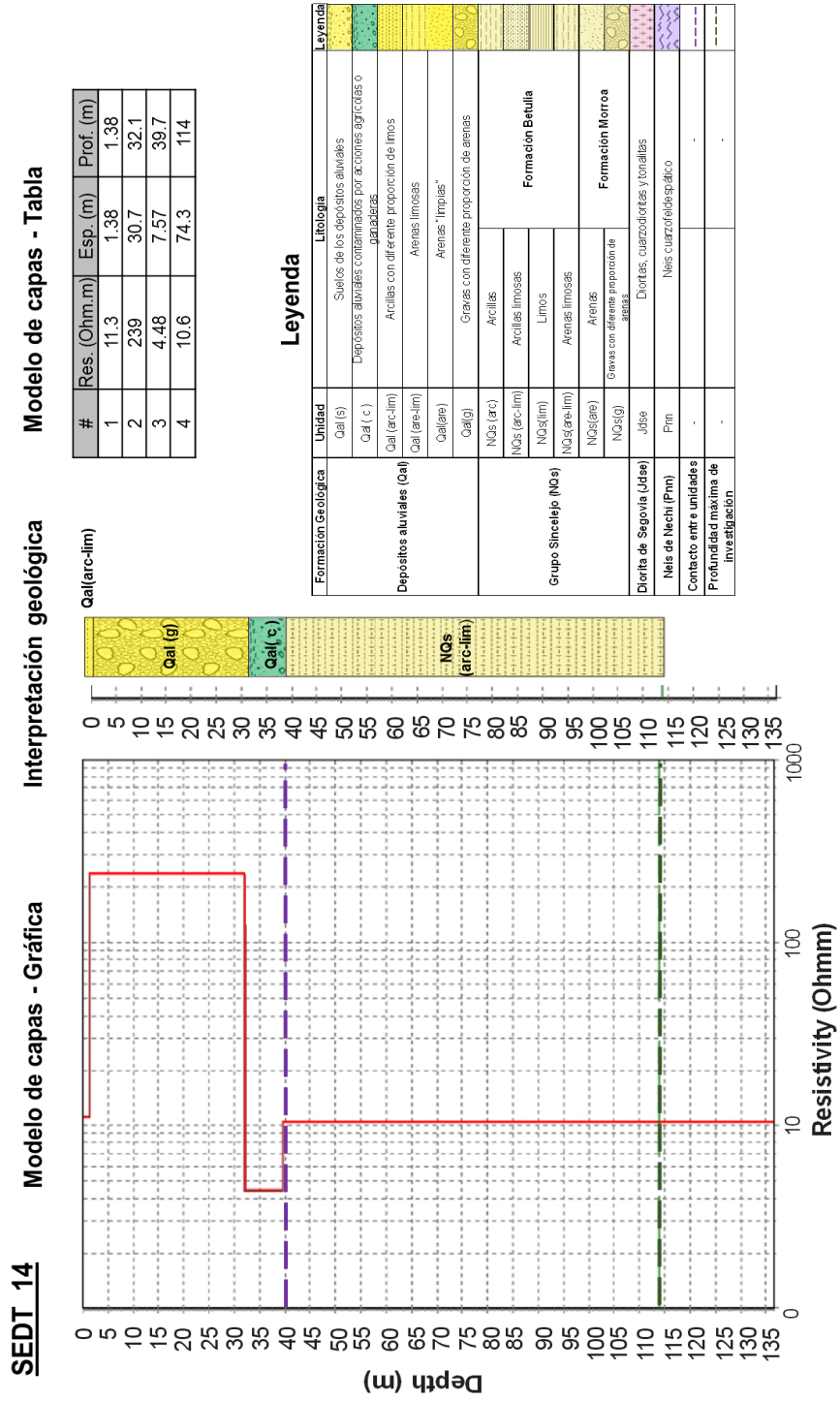


Figura 32. Interpretación de resultados SEDT15.

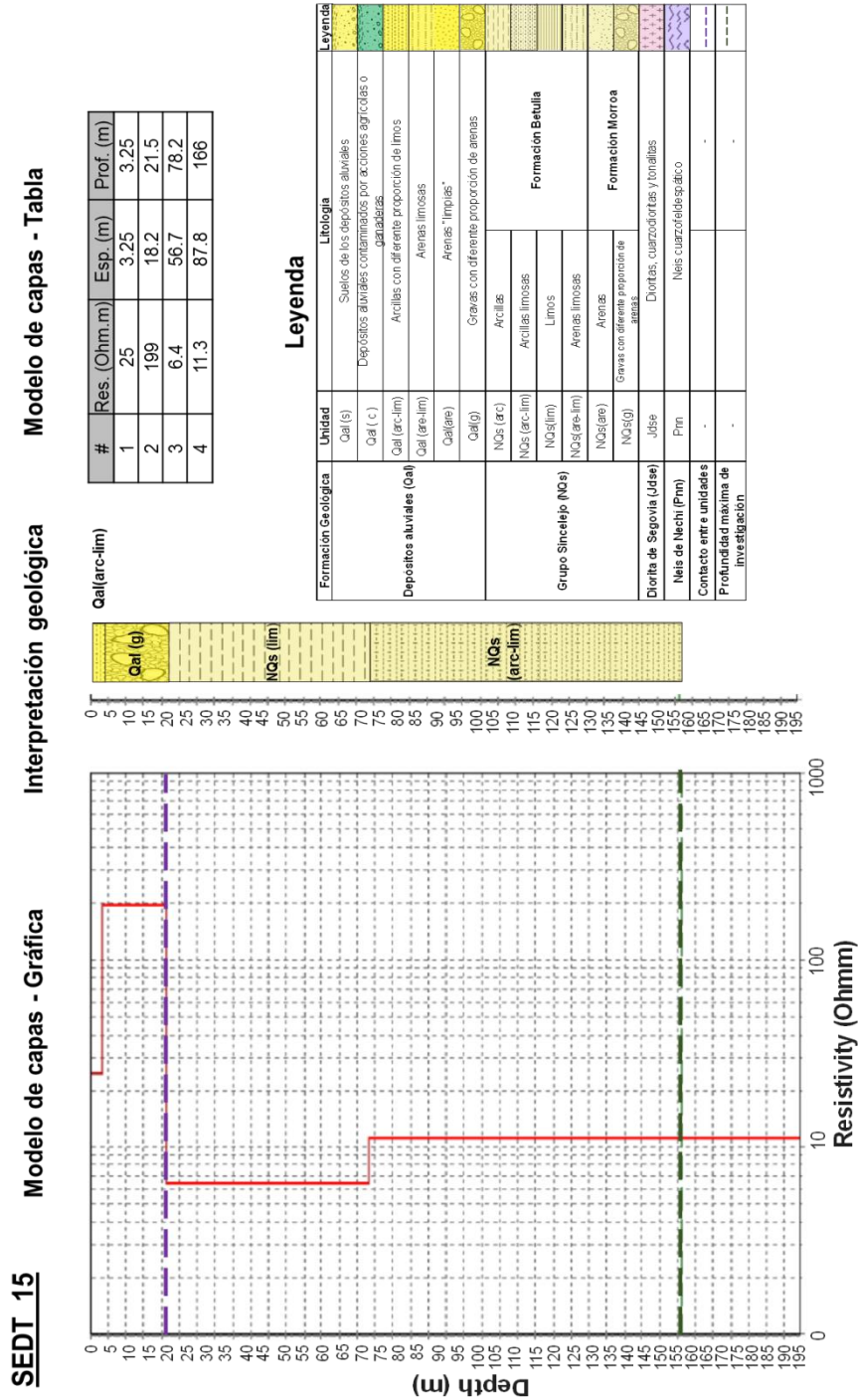


Figura 33. Interpretación de resultados SEDT16.

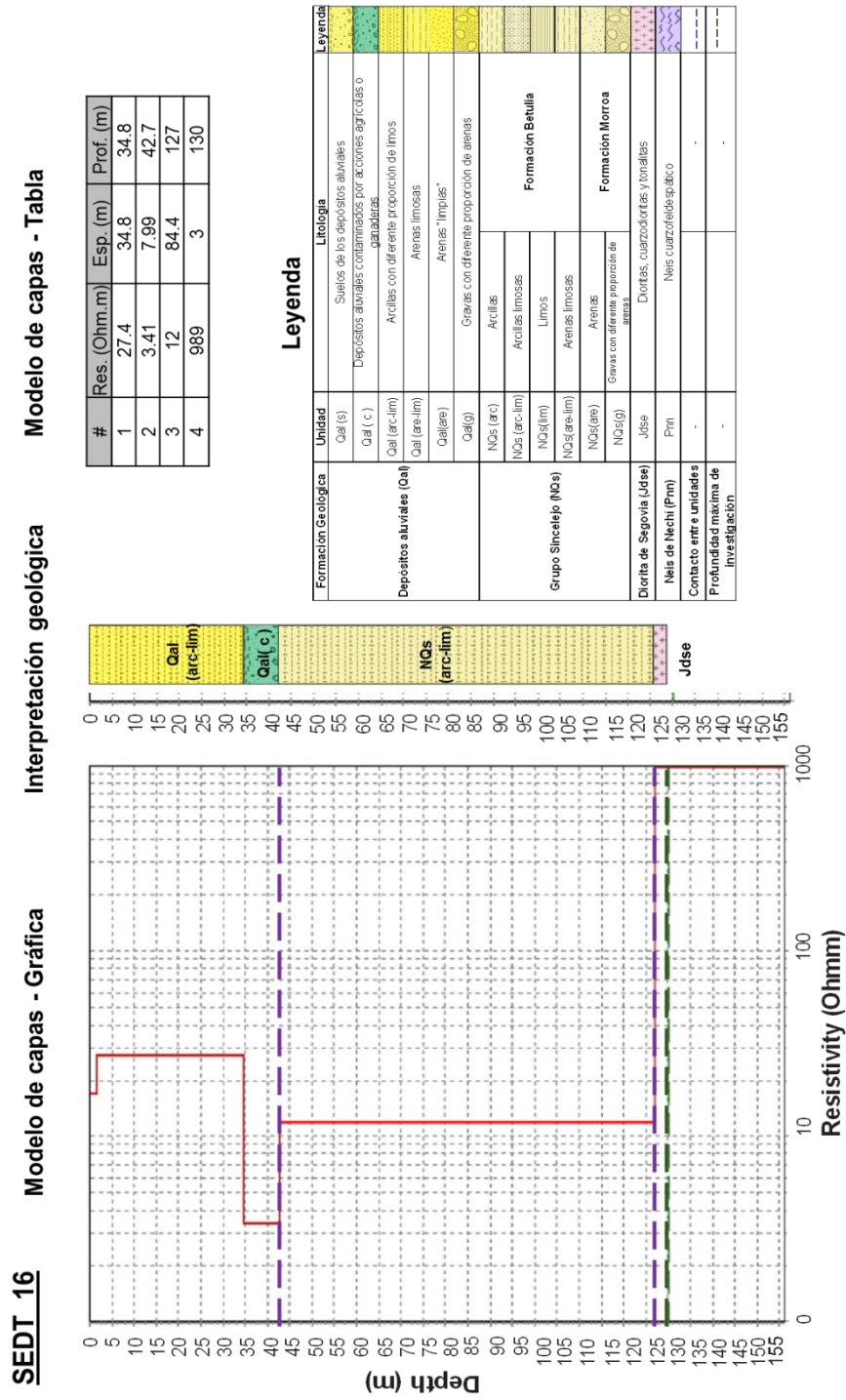


Figura 34. Interpretación de resultados SEDT17.

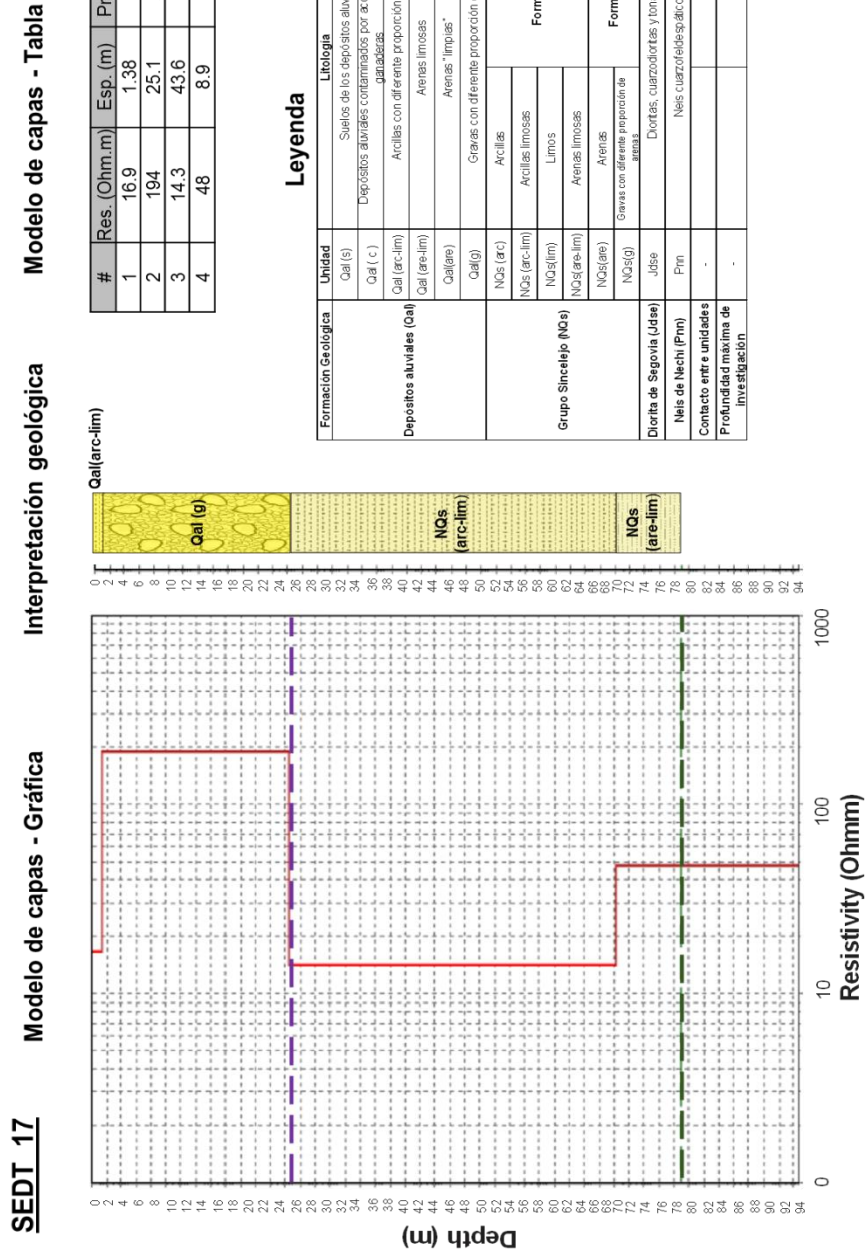


Figura 35. Interpretación de resultados SEDT18.

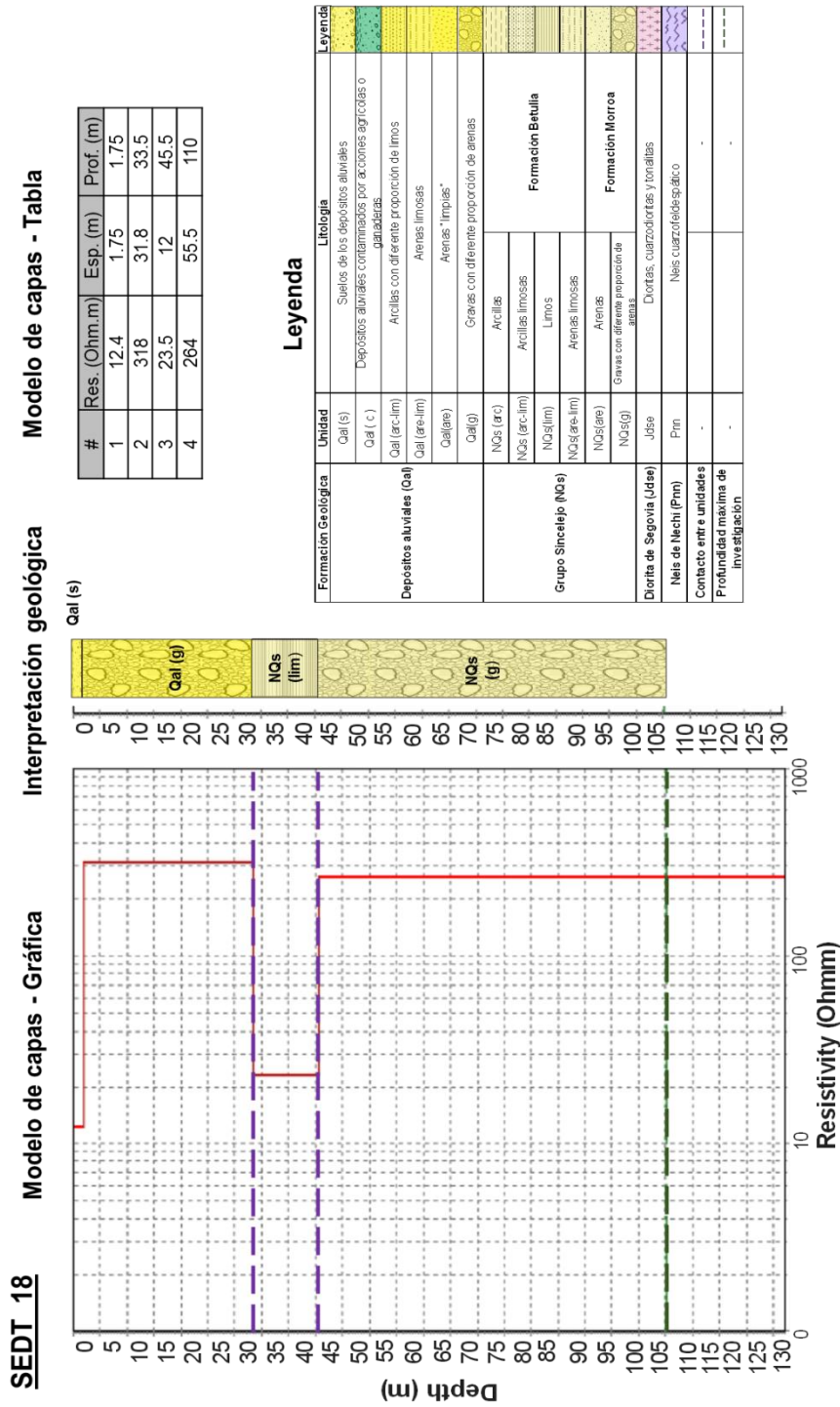


Figura 36. Interpretación de resultados SEDT19.

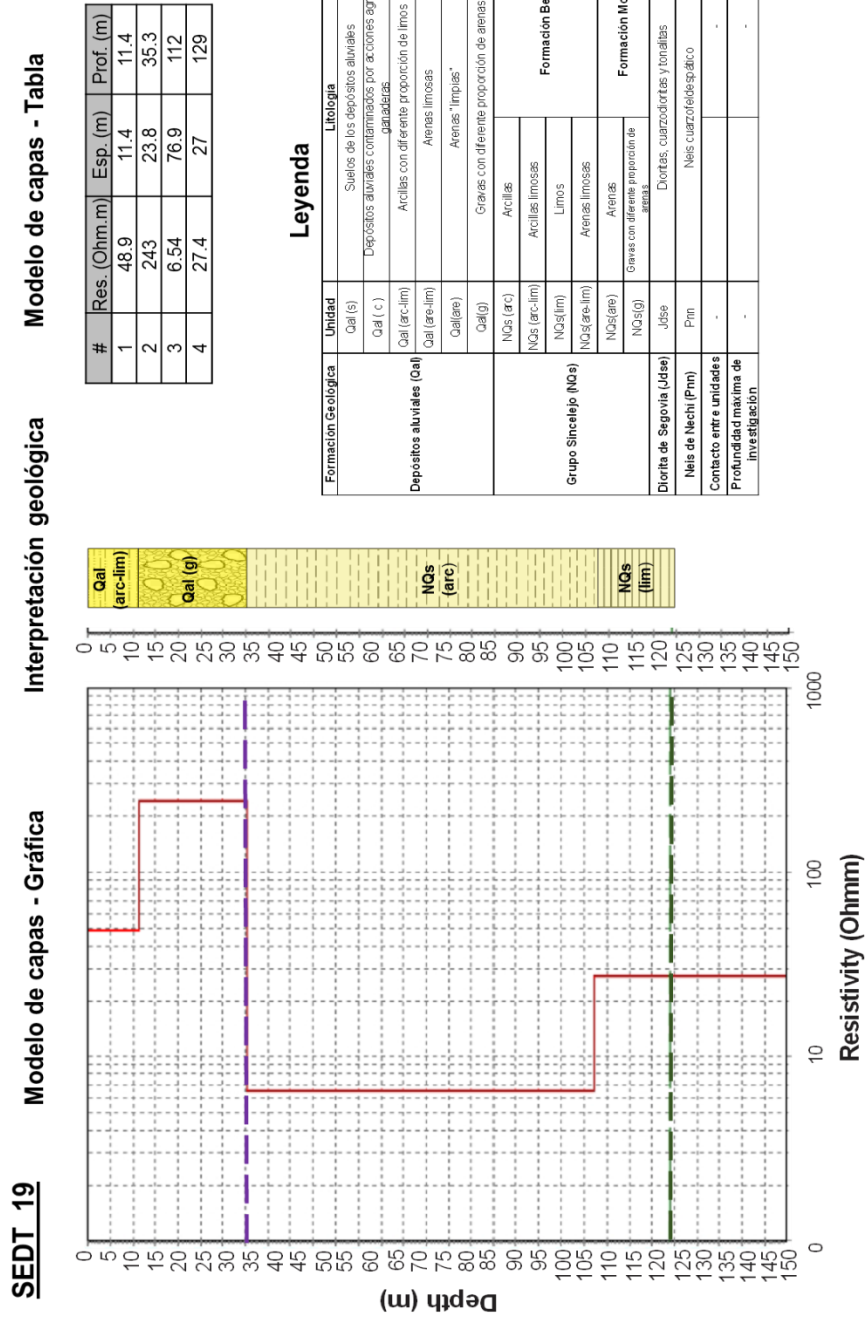
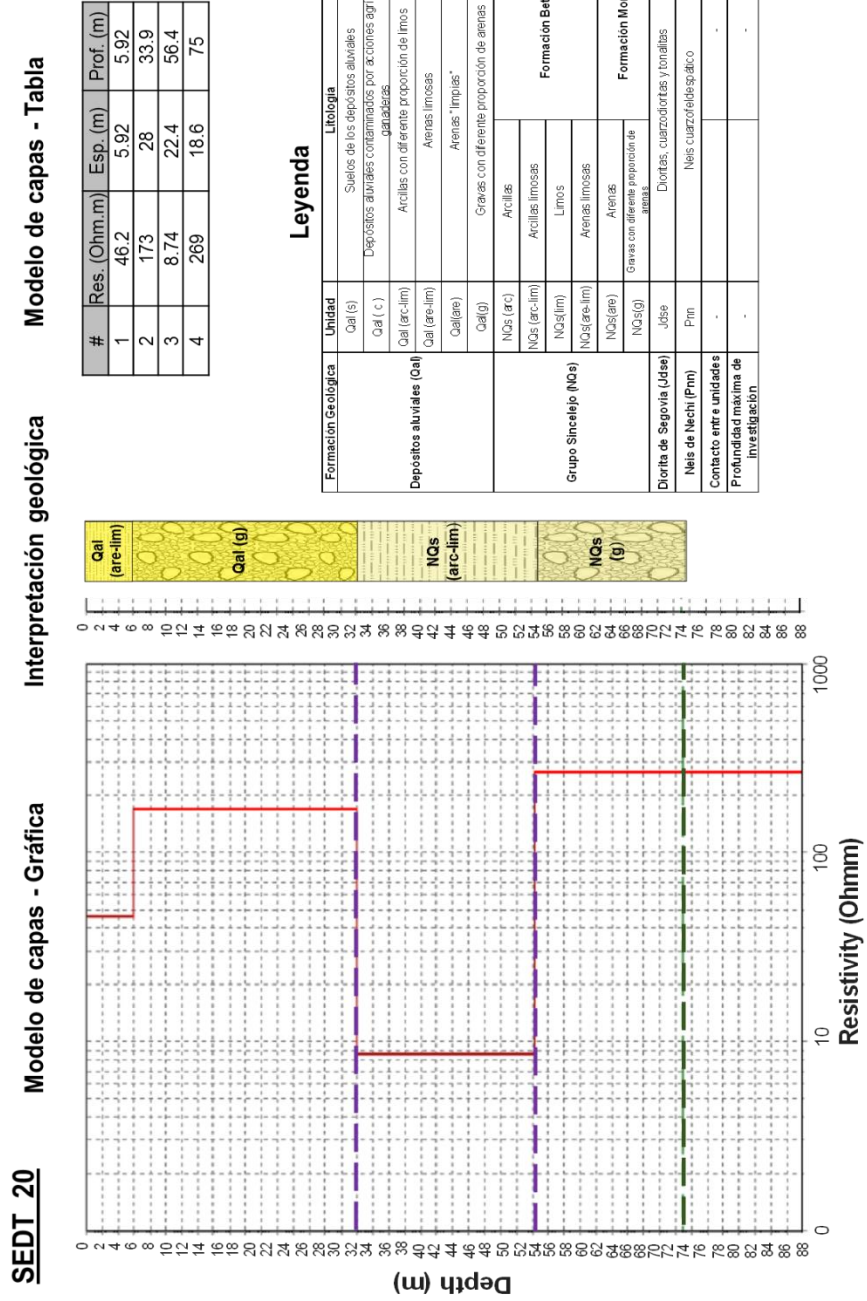


Figura 37. Interpretación de resultados SEDT20.



5.4.3. Estratigrafía obtenida a partir de los resultados de la prospección geofísica

A partir de los resultados de la prospección geofísica, se caracterizaron las unidades litoestratigráficas del área de influencia del proyecto, correlacionando rangos de resistividad con cada una de las unidades. La Figura 38 muestra los cortes realizados para la caracterización de las unidades litoestratigráficas para el área de influencia del proyecto.

El corte A – A' se encuentra localizado geográficamente hacia la parte sur del área de influencia del proyecto desde la vereda Puerto Jobo hasta la vereda Quinientos Cinco, con una longitud de 13.100 metros. Las unidades que afloran de base a tope son: la Diorita de Segovia, esta unidad se caracteriza por presentar rocas cuarzodioritas, dioritas y tonalitas. A continuación, se encuentra la Formación Morroa, compuesta principalmente por arenas friables con un espesor máximo de 80 metros y se dispone en forma de lente por lo cual no presenta continuidad lateral en esta sección. Suprayaciendo esta litología se encuentra la Formación Betulia compuesta por arenas limosas, limos y arcillas con un espesor variable entre 30 y más de 70 metros y hacia el tope de esta secuencia se encuentran los Depósitos Aluviales, compuestos por gravas con matriz arenosa, arcillas – limosas y arenas – lodosas, presentando un espesor variable entre 20 y 40 metros. En la Figura 39 se puede ver la correlación geológica del corte A – A'.

El corte B – B' se encuentra localizado geográficamente en la parte central del área de influencia del proyecto desde la vereda Vegas de Zaragoza hasta la vereda Puerto Gaitán con una longitud de 12.550 metros. Las unidades que afloran de base a tope son: la Formación Morroa, esta unidad se caracteriza por presentar conglomerados poco consolidados, con un espesor máximo de 60

metros, se dispone en forma de lente por lo cual no presenta continuidad lateral en esta sección; suprayaciendo a esta formación se encuentra la Formación Betulia, compuesta por limos y arcillas, presentando un espesor variable entre 15 y 140 metros, las capas más potentes de esta formación se encuentran hacia la parte sur del corte estratigráfico. Los Depósitos Aluviales se encuentran en el tope de esta secuencia, compuestos por gravas con matriz arenosa, con un espesor promedio de 25 metros. En la Figura 40 se puede ver la correlación geológica del corte B – B’.

El corte C – C’ se encuentra localizado geográficamente en la parte norte del área de influencia del proyecto desde la vereda Bijagual hasta la vereda La Esperanza, con una longitud de 20.700 metros. Las unidades que afloran de base a tope son: la Diorita de Segovia, esta unidad se caracteriza por presentar rocas cuarzodioritas, dioritas y tonalitas. En la base de esta secuencia al norte se encuentra el Neís de Nechí que corresponde a un neís cuarzo feldespático y metatonalítico. Suprayaciendo estas rocas cristalinas se encuentra la Formación Betulia, con capas potentes de lodolita que van hasta los 130 metros de espesor. Hacia el tope de esta secuencia se encuentran los Depósitos Aluviales, compuestos por gravas de matriz arenosa, arcillas – limosas y arenas - lodosas, esta unidad presenta un espesor promedio de 25 metros. En la Figura 41 se puede ver la correlación geológica del corte C – C’.

Figura 38. Cortes estratigráficos a partir de la prospección geofísica.

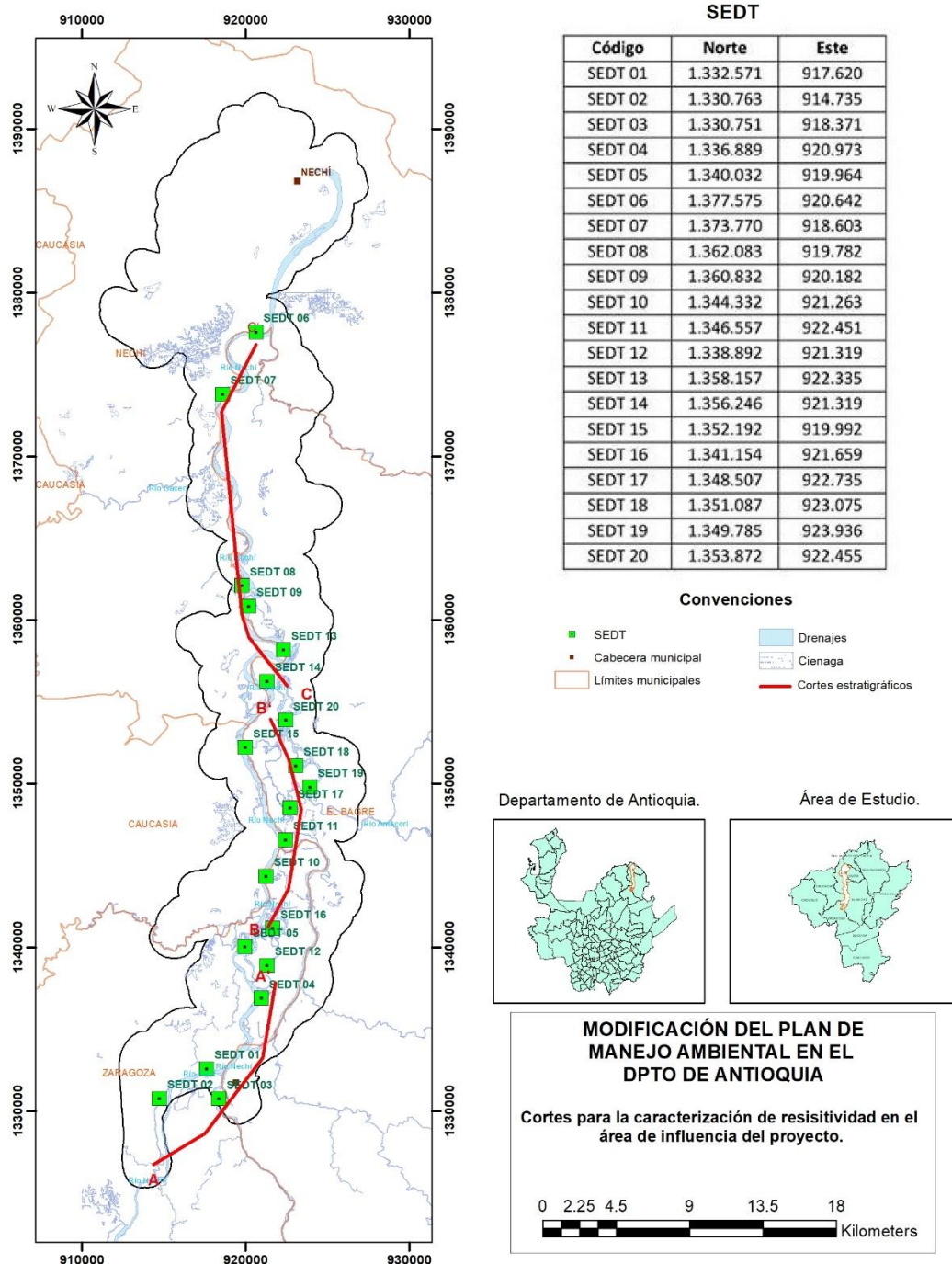


Figura 39. Correlación geológica A-A' a partir de SEDT.

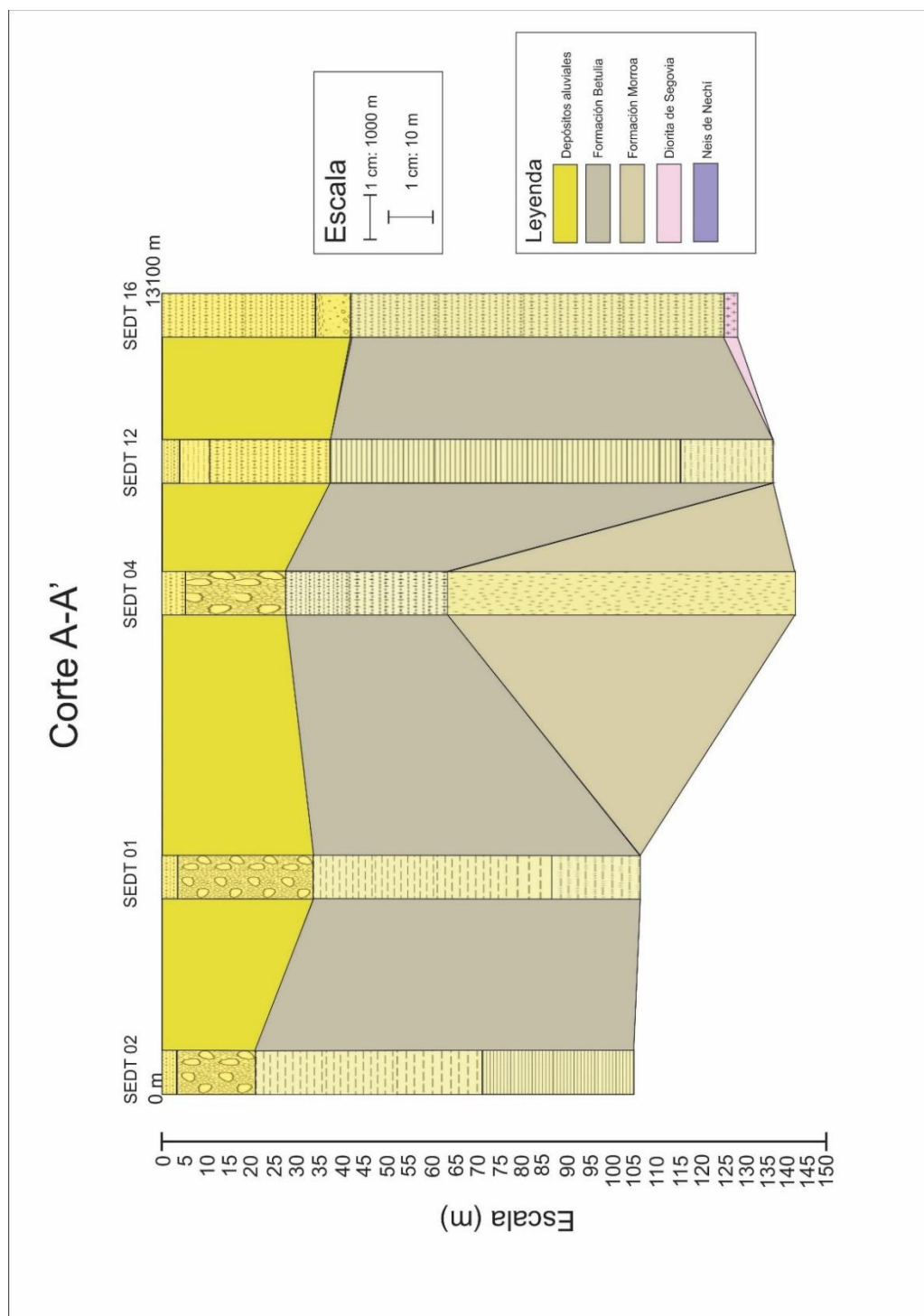


Figura 40. Correlación geológica B-B' a partir de SEDT.

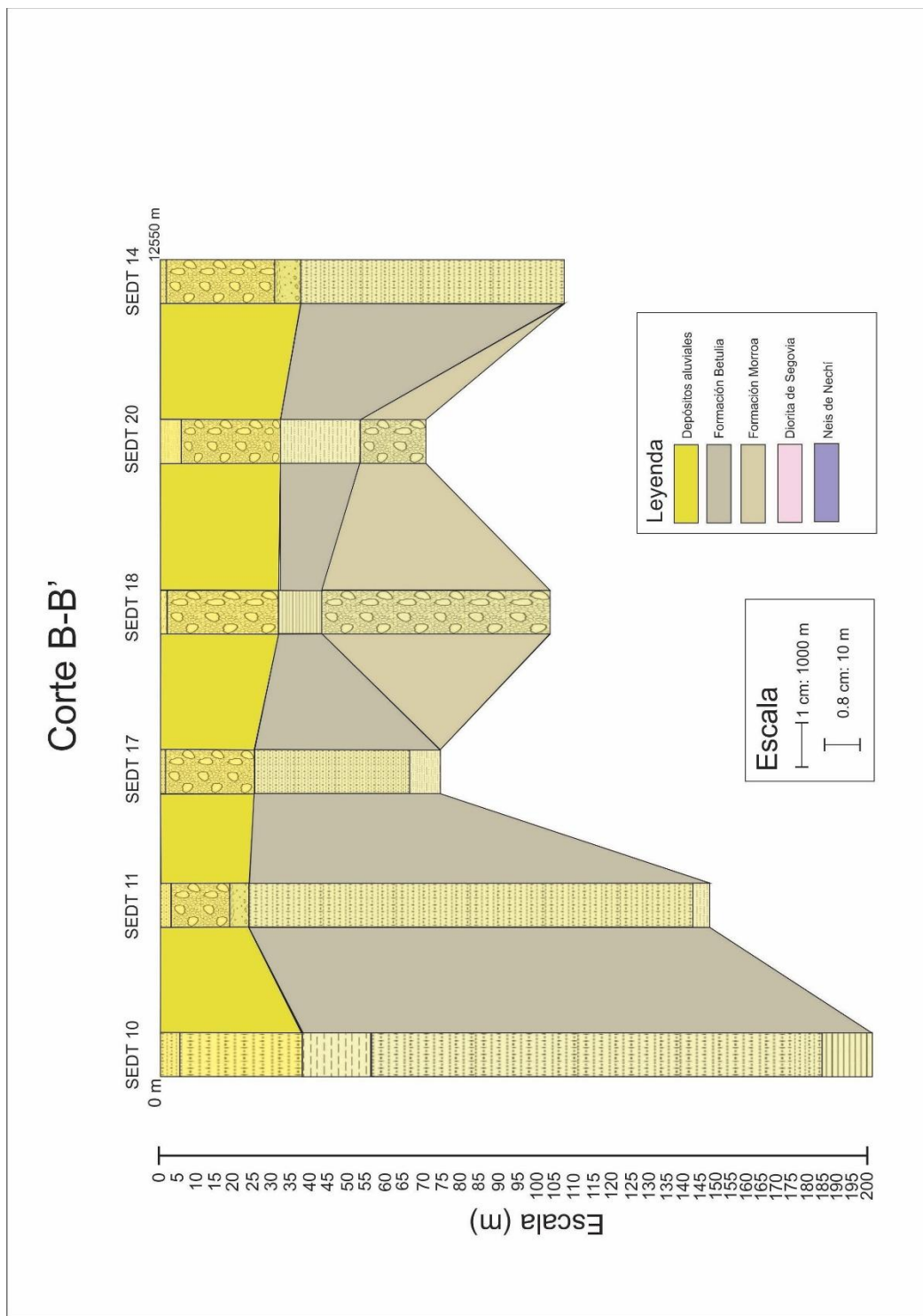
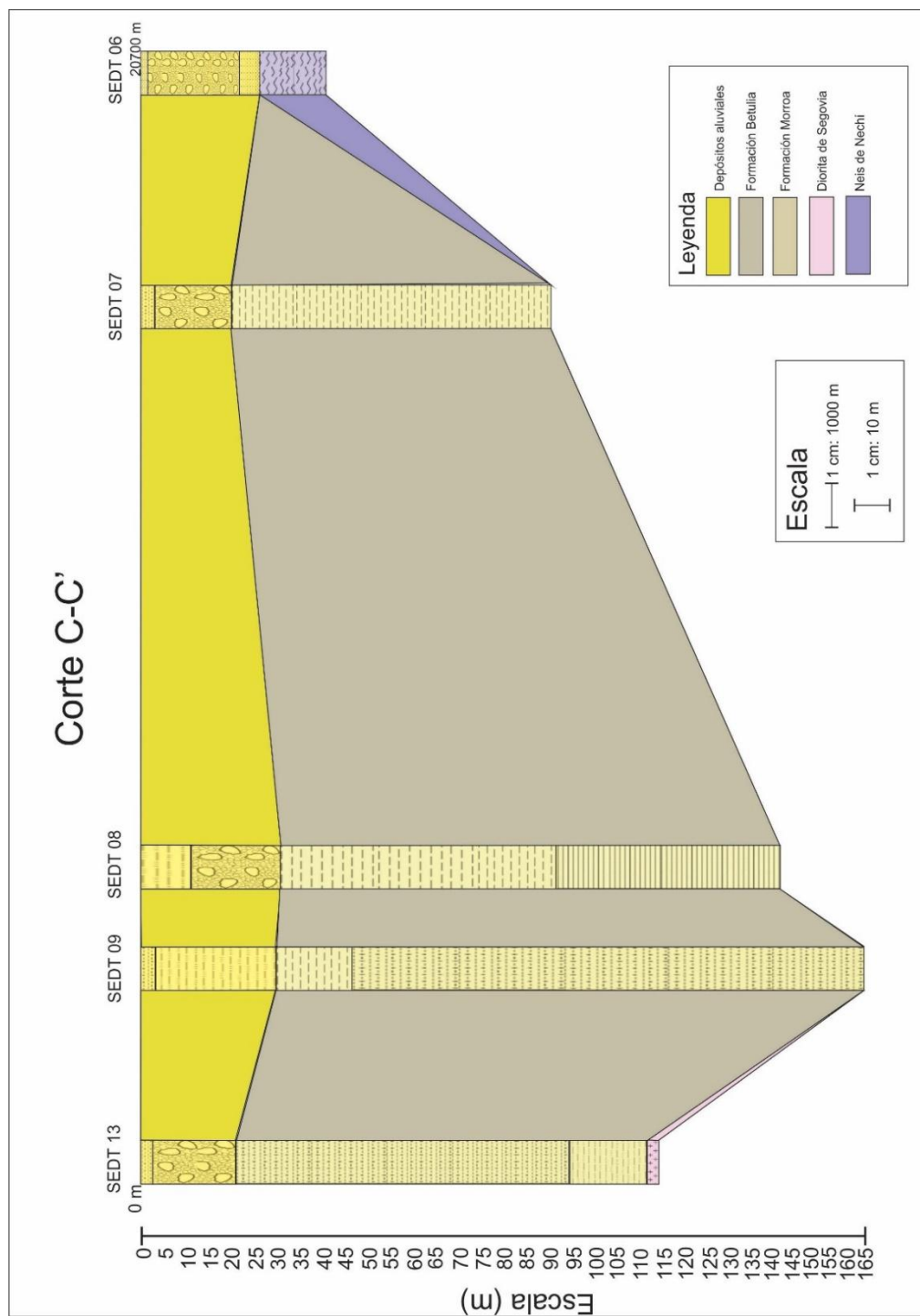


Figura 41. Correlación geológica C-C' a partir de SEDT.



6. CONCLUSIONES

- Se corroboró a partir de información secundaria las unidades geológicas en el área de influencia del proyecto, así como la geología estructural y las principales amenazas sísmicas, generando un mapa de sismicidad a partir de los datos registrados por la Red Sismológica Nacional.
- A partir de información secundaria y fotografías tomadas en campo, se generó la descripción geomorfológica referente a la morfogénesis y morfoestructura, así como la identificación y posterior descripción de las unidades geomorfológicas para el área de influencia del proyecto.
- Con la campaña de campo por parte de la empresa Hydroingeniería S.A.S., se generó una interpretación de los resultados de los SEDT, correlacionando la información adquirida con las unidades geológicas ya identificadas generando columnas litológicas y cortes estratigráficos.
- A partir de la distribución de las unidades litoestratigráficas presentes en el área de influencia del proyecto, se identificaron tres unidades hidrogeológicas y su respectiva caracterización.
- Se logró hacer la modificación al PMA en el departamento de Antioquia.

BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ, J. Geología de la Cordillera Central y occidente colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides mesocenozoicos. Bogotá: Ingeominas.,1983. Bol. Geol.,26(2)., 175p.

CABALLERO, H., JAMES, M., y MEJÍA , I. Cartografía fotogeológica de las terrazas aluviales en el Bajo Cauca y Bajo Nechí, Departamento de Antioquia. Medellín: Ingeominas., 1988. Informe interno Ingeominas (Inédito)21 p.

CARBONELL, J. Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca. Principios metodológicos y aplicaciones. Colombia Serie Técnica - Cecicaña Centro de Investigación de la Caña de Azúcar. 2011, p 1-119.

CASTILLO, Luis. Estudio de factibilidad hidrogeológica en la porción sur-oriente de la ciudad de San Juan del Río. Qro, con la aplicación de métodos electromagnéticos. Trabajo de grado Ingeniero Geofísico. Ciudad de México.: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería, 2012. 65 p.

CLAVIJO, J., y BARRERA, R. Geología de las planchas 44 Sincelejo y 52 Sahagún. Ingeominas: Bogotá., 2001.

DÍAZ , D. Armado de bloques explotables y cálculo de reservas de las unidades aluviales, Río Nechí (Minas Santa Paula 7 y 8).Trabajo de grado Geólogo. Bucaramanga, Santander: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico - Químicas. Escuela de Geología, 2012. 58 p.

DUEÑAS, H., y DUQUE , H. Geología del Cuadrángulo F-8. Planeta Rica. Ingeominas:Bogotá., 1981. Bol. Geol. 24(1):1-35.

DUQUE-CARO, H. Geotectónica y evolución de la región noroccidental del Colombia. 1980. Boletín Geológico, 5-37

FEININGER, T., BARRERO, D., y CASTRO, N. Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (Subzona II-B). Bogotá:Ingeominas., 1972 Bol. Geol., 20(2). 173p.

GONZÁLEZ, H. Mapa geológico del Departamento de Antioquia. Escala 1:400.000. Bogotá: Ingeominas., 2002. Memoria explicativa. Obtenido de <http://www.geociencias.unal.edu.co/unciencias/data-file/geociencias/revistageologia/gcolombiana29/5-Mercado.pdf>

GONZÁLEZ , H., y LONDOÑO, A. Catálogo de las unidades litoestratigráficas de Colombia, Diorita de Segovia. Cordillera Central, departamentos de Antioquia y Bolívar. Bogotá:Ingeominas., 2002.

IDEAM. Geomorfología y susceptibilidad de la inundación del valle fluvial del Magdalena. Bogota: IDEAM., 2001.

IGAC. Estudio semidetallado de suelos de las áreas potencialmente agrícolas; Bajo Cauca; Departamento de Antioquia. Bogotá:Imprenta Nacional de Colombia., 2007.

INGETEC. Proyecto Nueva Esperanza. Bogotá, Colombia. 2012.

KASSEM, T., CÁCERES, C., y CUCALON , I. Geología del Cuadrángulo E-8 (Sincelejo). Bogotá:Servicio Geológico Nacional., 1967.

MINEROS S.A. Plan de Manejo y recuperación de la Ciénaga El Sabalito en el área de operación de MINEROS S.A. en la Cuenca del Nechí, Antioquia. Medellín: Renaturar. 2001

MONTOYA, J., y ORDOÑEZ , O. Cartografía geológica y caracterización petrográfica de las unidades litológicas asociadas a los cuerpos vetiformes de oro en el Distrito Minero Bagre-Nechí. Informe técnico Grupo de Investigación en Georrecursos, Minería y Medio Ambiente (GEMMA).Bogotá:Universidad Nacional de Colombia., 2010.

RESTREPO, J., ORDOÑEZ, O y ARMSTRONG, R. Triassic metamorphism in the northern part of the Tahamí Terrane of the central cordillera of Colombia. En:Journal of South American Earth Sciences. Noviembre, 2010, p. 405-408.

LEAL, H. Phanerozoic gold metallogeny in the Colombian Andes: a tectono-magmatic approach. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad de Barcelona., 2011. 989 p.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA. Curso Taller sobre Obras de Control Fluvial. Valle del Cauca. 2003.

VELÁSQUEZ, E. Red de monitoreo pluvio-freatimétrica en el área establecida en Caña de Azúcar del Ingenio Risaralda. Trabajo de grado Especialista en Sistemas de Información Geográfica. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Manizales: Universidad de Manizales., 2016. 60 p.

ZAPATA, G., BERMÚDEZ, J. G., RODRIGUEZ, G., & ARANGO, M. I. .
Cartografía Geológica de la Plancha 83 Nechí (Departamento de Antioquia).
Medellín:Servicio Geológico Colombiano., 2013.

ZINCK, A. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. Enschede, The Netherlands: Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation. 2012