

**VALIDEZ DE LA PROPIEDAD FÍSICA DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA
COMO HERRAMIENTA DE PROSPECCIÓN DE ARENAS BITUMINOSAS.
CASO DE ESTUDIO: MINAS LA EMILIA Y SANTA TERESA EN CERCANÍAS
DEL MUNICIPIO DE PESCA, BOYACÁ, COLOMBIA**

MARTHA LILIANA SARMIENTO MORENO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
MAESTRÍA EN GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2015

**VALIDEZ DE LA PROPIEDAD FÍSICA DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA
COMO HERRAMIENTA DE PROSPECCIÓN DE ARENAS BITUMINOSAS.
CASO DE ESTUDIO: MINAS LA EMILIA Y SANTA TERESA EN CERCANÍAS
DEL MUNICIPIO DE PESCA, BOYACÁ, COLOMBIA**

MARTHA LILIANA SARMIENTO MORENO

Trabajo de investigación para optar el título de Magíster en Geología

**Director:
SAIT KHURAMA VELÁSQUEZ
M.Sc., Geofísica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
MAESTRÍA EN GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A DIOS por ser mi mejor maestro, amigo incondicional y apoyo constante en todas las etapas de mi vida.

A mi esposo por su comprensión, amor, confianza y por alegrar mis días cuando más lo necesito.

A mi familia por su apoyo incondicional, amigos y compañeros de aventuras....

AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento al Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) – ECOPETROL, por el soporte financiero brindado durante toda la maestría, salidas de campo y pruebas de laboratorio, financiamiento ejecutado a través del convenio de cooperación tecnológica 02 de 2012. A la ESCUELA DE GEOLOGÍA de la Universidad Industrial de Santander (UIS) por su apoyo académico y préstamo de equipos. A las empresas SUBSUELO 3D e HYDROINGENIERÍA S.A por hacer posible la adquisición y procesamiento de la información geoelectrónica necesaria para la realización de este trabajo, permitiéndome aprender y desarrollar habilidades en estas etapas; y finalmente, a los dueños de las minas que autorizaron el desarrollo de las actividades propuestas en sus predios.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. OBJETIVOS.....	23
1.1 OBJETIVO GENERAL	23
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
1.3 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA	24
2. MARCO DE REFERENCIA.....	25
2.1 MÉTODOS GEOELÉCTRICOS	25
2.1.1 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)	29
2.1.2 Tomografía De Resistividad Eléctrica (TRE).....	30
2.1.3 Dispositivos Geoeléctricos	30
2.1.4 Profundidad De Investigación.	35
2.1.5 Problema inverso y directo.....	35
2.2 ARENAS BITUMINOSAS.....	36
2.2.1 Origen y ocurrencia de crudos pesados y extrapesados	38
2.2.2 Características de yacimientos de arenas bituminosas en el mundo.....	39
3. ANTECEDENTES.....	46
3.1 GEOLOGÍA DEL ÁREA	46
3.1.1 Marco estructural	47
3.1.2 Marco estratigráfico	48
3.2 PROSPECCIÓN DE ARENAS BITUMINOSAS EMPLEANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS.....	53
3.2.1 Prospección geofísica en el área de estudio.....	54
3.2.2 Prospección geofísica internacional relacionada con arenas bituminosas ..	56
4. METODOLOGÍA Y RESULTADOS.....	60

4.1 DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA Y SEV PARAMÉTRICO	60
4.2 PRUEBAS DE LABORATORIO	71
4.2.1 Metodología	72
4.2.2 Resultados analíticos	76
4.3 ETAPA GEOFÍSICA - SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES.....	78
4.3.1 Diseño.....	78
4.3.2 Adquisición.....	81
4.3.3 Procesamiento	89
4.3.4 Resultados	91
4.4 ETAPA GEOFÍSICA – TOMOGRAFÍAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA...	106
4.4.1 Diseño.....	106
4.4.2 Procesamiento	115
4.4.3 Resultados	119
4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.....	125
4.5.1 Análisis de resultados	125
4.5.2 Interpretación geoelectrica.....	127
4.5.3 Interpretación geológica	135
5. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS TÉCNICAS EMPLEADAS.....	148
6. CONCLUSIONES	151
7. RECOMENDACIONES.....	154
BIBLIOGRAFÍA.....	156
ANEXOS	168

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización geográfica, ubicación de las minas y rezumaderos en el área de estudio.	24
Figura 2. Rango de resistividades y conductividades reales de algunos minerales, sedimentos, rocas y fluidos.....	28
Figura 3. Dispositivo Wenner.....	31
Figura 4. Dispositivo Dipolo - Dipolo.....	32
Figura 5. Dispositivo Schlumberger.....	32
Figura 6. Arenas petrolíferas canadienses.....	37
Figura 7. Modelo estructural de una arena petrolífera de Athabasca (Canadá). El agua en la arena aparece de tres formas: como anillos pendulares en puntos de contacto entre los granos, como una capa de ~10nm cubriendo las superficies de los granos y como agua retenida en clúster de finos. El espacio restante es ocupado por el bitumen.....	38
Figura 8. Distribución por regiones de arenas bituminosas a nivel mundial.....	40
Figura 9. Localización de la Cordillera Oriental.....	46
Figura 10. Columna generaliza de la Cordillera Oriental.....	49
Figura 11. Flujo de trabajo para el desarrollo de la investigación.....	60
Figura 12. Panorámica de la mina Santa Teresa donde se observa el afloramiento cubierto por material derrumbado y tajo adyacente a la zona de operación minera que se mantiene lleno de agua probablemente por flujo vertical de agua subterránea.....	61
Figura 13. Panorámica de la Mina La Emilia. En la imagen se señala la parte superior del afloramiento como zona de riesgo debido al peligro que representaba ubicar el equipo en cualquier punto dentro de esta línea.....	62

Figura 14. Detalle del contacto entre la roca reservorio (arenas bituminosas) y la roca sello (arcillolitas).	63
Figura 15. Secuencia de base a tope conformada por arenas bituminosas (alta a baja impregnación de color negro a café), seguida por arcillolitas color verde y areniscas limosas amarillentas.	64
Figura 16. Afloramiento de la mina a cielo abierto propiedad del municipio de Pesca, adjunta a la mina Santa Teresa y localización del SEV paramétrico denominado ST2.....	66
Figura 17. Detalle de las capas encontradas en el afloramiento ST 2. El grado de impregnación varia de mayor a menor de base a tope respectivamente.	66
Figura 18. Mina “Don Marcos” y muestra de arena bituminosa compuesta de arena grano medio friables con porosidad en impregnación visual muy buena.	68
Figura 19. Bocamina abierta horizontalmente sobre el terreno donde se observan dos capas, una capa de areniscas de grano medio, friables color amarillo-claro en contacto con una capa de arcillolitas color gris claro.	68
Figura 20. Afloramiento con secuencia de arcillolitas color gris claro y capas de arenas bituminosas con alta impregnación visual. Las capas presentan una orientación N65E/37 NW.	69
Figura 21. Imágenes de las muestras tomadas en campo en las minas Santa Teresa, La Emilia, Don Marcos y el afloramiento “C”. Nótese la variación de impregnación y los cambios granulométricos en las muestras.	71
Figura 22. Plugs de las muestras procesadas donde se observa variación de impregnación y granulometría; así mismo todas las muestras están protegidas con la manga de teflón termoencogible y mallas metálicas excepto las muestras ST_2b y LE_1. La escala representa 5 cm en total con subdivisiones cada centímetro. .	73
Figura 23. Distribución de los perfiles y SEV en el área de estudio.	79
Figura 24. Formato de campo.	80
Figura 25. Terrámetro ABEM SAS 1000/4000 utilizado en campo para la adquisición de datos.	83
Figura 26. Panel Frontal de la unidad central GeoAmp 202.	84

Figura 27. Localización de los SEV adquiridos	86
Figura 28. Localización de los SEV generales en el municipio de Pesca, Boyacá.	87
Figura 29. Localización de los SEV de detalle en las minas del municipio de Pesca, Boyacá. M1 y M2 representan las bocaminas encontradas en la Mina Don Marcos.	89
Figura 30. Resultado del procesamiento realizado para el SEV Fa (izquierda) y SEV CST5 (derecha).	91
Figura 31. Diagrama de barras para los SEV generales.....	93
Figura 32. Diagrama de barras indicando los tipos de curvas hallados.	97
Figura 33. Perfil ST. A) Distribución de las resistividades aparentes a lo largo de la pseudosección. B) Perfil geoelectrico donde se observan las resistividades reales obtenidas después de la inversión. La longitud total de este perfil es de 30 m aproximadamente.	99
Figura 34. Panorámica de la Mina La Emilia, donde se indica la zona de riesgo y ubicación de los SEV LE 1 y LE2.....	100
Figura 35. Perfil LE. A) Distribución de las resistividades aparentes a lo largo de la pseudosección. B) Perfil geoelectrico donde se observan las resistividades reales obtenidas después de la inversión.....	101
Figura 36. Perfil P1. A) Distribución de las resistividades aparentes a lo largo de la pseudosección. B) Perfil geoelectrico donde se observan las resistividades reales obtenidas después de la inversión.....	102
Figura 37. Perfil P2. A) Distribución de las resistividades aparentes a lo largo de la pseudosección. B) Perfil geoelectrico donde se observan las resistividades reales obtenidas después de la inversión.....	103
Figura 38. Perfil P3. A) Distribución de las resistividades aparentes a lo largo de la pseudosección. B) Perfil geoelectrico donde se observan las resistividades reales obtenidas después de la inversión.....	104
Figura 40. Marco geológico del área de estudio. Los números corresponden a la ubicación de las minas (1. Santa Teresa, 2. La Emilia, 3. Don Marcos)	107

Figura 41. Imagen de un Terrameter LS con todos los accesorios necesarios para la adquisición.	108
Figura 42. Panel de conexiones del Terrameter LS.....	109
Figura 43. Localización de las tomografías sobre el mapa geológico.....	111
Figura 44. Distribución de las TRE en la mina Santa Teresa (Pesca, Boyacá). .	113
Figura 45. Distribución de las TRE en la mina Don Marcos (Pesca, Boyacá). ...	113
Figura 46. Distribución de las TRE en la mina La Emilia (Pesca, Boyacá).	114
Figura 47. Adquisición de las TRE. A) TRE-DM1; B) TRE-LE2; C) TRE-ST2; D) Equipo empleado.	115
Figura 48. Edición de datos ruidosos para la TRE-ST1. Los datos anómalos corresponden a los picos que sobresalen en la tendencia general de cada línea, especialmente en la primera y novena línea del perfil como indican las flechas.	116
Figura 49. Resultados del proceso de inversión en la TRE ST-2. A) Pseudosección de resistividades aparentes medida en campo. B) Pseudosección de resistividad aparente calculada. C) Distribución de resistividades reales. Valores de resistividad reportados en Ohm.m.	118
Figura 50. Modelo de resistividades reales incluida la topografía para la TRE ST-1 obtenidas después del proceso de inversión.	120
Figura 51. Modelo de resistividades reales incluida la topografía para la TRE ST-2 obtenidas después del proceso de inversión.	121
Figura 52. Modelo de resistividades reales incluida la topografía para mina La Emilia-1 obtenidas después del proceso de inversión.	122
Figura 53. Modelo de resistividades reales incluida la topografía para mina La Emilia-2 obtenidas después del proceso de inversión.	123
Figura 54. Modelo de resistividades reales incluida la topografía para la mina Don Marcos obtenidas después del proceso de inversión.	124
Figura 55. Modelo geoelectrico interpretado para la mina Santa Teresa donde se identifican 2 unidades (UG2 y UG3).	128
Figura 56. Modelo geoelectrico interpretado para la mina La Emilia donde se identifican 4 unidades.	129

Figura 57. Modelo geoelectrico interpretado para el perfil P1 en la mina La Emilia, donde se identifican 3 unidades.....	129
Figura 58. Modelo geoelectrico interpretado para el perfil P2 en la mina La Emilia, donde se identifican 3 unidades. M1 y M2 corresponden a dos bocaminas proyectadas sobre el perfil y se encuentran a 35 y 30 metros de distancia respectivamente.....	130
Figura 59. Modelo geoelectrico interpretado para el perfil P3 en la mina La Emilia, donde se identifican 3 unidades. M1 y M2 corresponden a dos bocaminas proyectadas sobre el perfil y se encuentran a 35 y 22 metros de distancia respectivamente.....	130
Figura 60. Distribución de las unidades geoelectricas en la TRE Mina Santa Teresa -1.	131
Figura 61. Distribución de las unidades geoelectricas en la TRE Mina Santa Teresa -2.	132
Figura 62. Distribución de las unidades geoelectricas en la TRE Mina La Emilia -1.	133
Figura 63. Distribución de las unidades geoelectricas en la TRE Mina La Emilia -2.	134
Figura 64. Distribución de las unidades geoelectricas en la TRE Mina Don Marcos-1.	135
Figura 65. Modelo geológico interpretado para el perfil de la Mina Santa Teresa. La línea roja indica la presencia de una falla y se evidencia como consecuencia, el aumento de espesor de la capa Tp-are hacia el sector NE del perfil.....	138
Figura 66. Modelo geológico interpretado para el perfil de la Mina La Emilia. Obsérvese la zona de falla identificada al SE del corte así como los plegamientos de las capas que estarían relacionados a los esfuerzos tectónicos reportados en el área y la evidencia observada en campo.....	139
Figura 67. Modelos geológicos interpretados para los perfiles P1, P2 y P3 de la Mina Don Marcos numerados de arriba a abajo.	140
Figura 68. Perfil geológico interpretado para la TRE Mina Santa Teresa (ST-1).141	

Figura 69. Perfil geológico interpretado para la TRE Mina Santa Teresa (ST-2).	142
Figura 70. Tajo lleno de agua adyacente a la zona de operación minera. Se observa el tajo adyacente a la zona de operación minera que se mantiene lleno de agua probablemente por el flujo vertical de agua subterránea relacionado a la falla descrita en la TRE ST-2.	143
Figura 71. Perfil geológico interpretado para la TRE Mina La Emilia (LE-1).	144
Figura 72. Perfil geológico interpretado para la TRE Mina La Emilia (LE-2).	145
Figura 73 Perfil geológico interpretado para la TRE Mina Don Marcos (DM-1). Se observan los sondeos P7 y P2 proyectados sobre la tomografía (puntos amarillos) y el SEV P5 y la bocamina M1 localizado sobre el perfil (puntos negros).	146
5. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS TÉCNICAS EMPLEADAS.	148
Figura 74. Análisis de la profundidad de investigación obtenida con las TRE. ...	148
Figura 75. Análisis de la profundidad de investigación obtenida con los SEV de detalle.	149
Figura 76. Distribución en porcentaje de los rangos de profundidad obtenida con los SEV.	150

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características geológicas y petrofísicas de yacimientos de arenas bituminosas.....	45
Tabla 2. Resultados de parámetros petrofísicos.....	76
Tabla 3. Características geológicas y petrofísicas de las arenas bituminosas del municipio de Pesca.....	77
Tabla 4. Ubicación de los SEV generales.....	85
Tabla 5. Ubicación de los SEV de detalle	88
Tabla 6. Tipo de curvas obtenidas para los sondeos realizados.	92
Tabla 7. Interpretación cuantitativa de los SEV generales.....	95
Tabla 8. Resultados de los SEV de detalle.....	96
Tabla 9. Relación entre la secuencia de capas obtenida en el afloramiento con las resistividades del SEV ST2.....	106
Tabla 10. Coordenadas, longitud y espaciamiento de electrodos para las TRE.	110
Tabla 11. Características de las tomografías de resistividad eléctrica.....	119
Tabla 12. Definición de unidades Geoeléctricas.....	127
Tabla 13. Correlación geoeléctrica - geología	137

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Datos medidos en campo – SEV generales (Medio magnético)	168
ANEXO B. Datos medidos en campo – SEV de detalle (Medio magnético	169
ANEXO C. Modelos geoelectricos de todos los SEV (Medio magnético	170
ANEXO D. Datos tre adquiridos en campo (Medio magnético.....	171
ANEXO E. Datos topograficos de los perfiles de las TRE (Medio magnético	172
ANEXO F. Datos de las tre procesados (Medio magnético	173

RESUMEN

TITULO: VALIDEZ DE LA PROPIEDAD FÍSICA DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA COMO HERRAMIENTA DE PROSPECCIÓN DE ARENAS BITUMINOSAS. CASO DE ESTUDIO: MINAS LA EMILIA Y SANTA TERESA EN CERCANÍAS DEL MUNICIPIO DE PESCA, BOYACA, COLOMBIA*

AUTOR: MARTHA LILIANA SARMIENTO MORENO**

PALABRAS CLAVES; Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), Resistividad, Arenas Bituminosas, Pesca, Cordillera Oriental.

DESCRIPCIÓN

Se busca establecer si la resistividad eléctrica es una propiedad física válida para predecir la presencia de hidrocarburo en el subsuelo mediante métodos geoelectrónicos en superficie y por lo tanto una herramienta efectiva para prospección de arenas bituminosas y/o crudos extrapesados.

Para alcanzar el objetivo se aplicaron sondeos eléctrico vertical (SEV) y tomografía de resistividad eléctrica (TRE) empleando los dispositivos electródicos de Schlumberger y Wenner respectivamente, correlacionados con la litología de las minas y la geología de la zona.

Los resultados muestran que las arenas bituminosas en el municipio de Pesca tienen valores de resistividad entre 120 y 800 Ω m con espesores que varían de 2.5 a 30 m y se encuentran desde superficie hasta los 68 metros de profundidad aproximadamente.

Adicionalmente, el reconocimiento en campo de las secuencias estudiadas mostró que la litología del horizonte bituminoso está compuesto por arenas de tamaño medio a grueso, sin cemento, friables, porosidad visual muy buena, algunas veces conglomeráticas y con intercalaciones de niveles arcillosos (las cuales actúan como roca sello).

Con estos resultados se concluye que la resistividad eléctrica conjugada con la geología, es una propiedad válida para llevar a cabo estudios de prospección de arenas bituminosas.

Finalmente, a partir de la comparación entre las características de arenas bituminosas de otros países con los depósitos en el área de estudio, se encontraron características geológicas y propiedades petrofísicas análogas.

* Tesis de Maestría

** Facultad de Ciencias Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: M.Sc. Sait Khurama Velásquez

SUMMARY

TITLE: VALIDITY OF THE PHYSICAL PROPERTY OF ELECTRICAL RESISTIVITY AS A SURVEY TOOL OF OIL SANDS. CASE STUDY: MINES THE EMILIA AND SANTA TERESA IN NEARNESS THE MUNICIPALITY OF PESCA, BOYACA, COLOMBIA

AUTHOR: MARTHA LILIANA SARMIENTO MORENO**

KEYWORDS: Vertical Electrical Sounding (VES), Electrical Resistivity Tomography (ERT), Resistivity, Oil Sands, Pesca, Eastern Cordillera.

DESCRIPTION

Seeks to establish whether the electrical resistivity is valid physical property to predict the presence of hydrocarbons in the subsurface using geoelectric methods in surface and therefore an effective tool for prospecting for oil sands and / or oil extra heavy.

To achieve the goal were applied vertical electric sounding (VES) and electrical resistivity tomography (ERT) using Schlumberger and Wenner array configuration respectively, correlated with the lithology of mines and geology of the area.

The results show that the oil sands in the municipality of Pesca have resistivity values between 120 and 800 Ω m with thickness ranging from 2.5 to 30 m and are found from surface to approximately 68 meters depth.

Additionally, recognition in field of the studied sequences showed that the lithology of oil sands horizon is composed of medium to coarse, without cement, friable, very good visual porosity, sometimes conglomeratic and interbedded with clayey levels (which act as caprock).

With these results we conclude that the electrical resistivity conjugated with Geology, if valid to carry out studies on oil sands of prospecting.

Finally, from the comparison between the characteristics of oil sands deposits other countries with the study area, were found to present geological characteristics and petrophysical properties analogous.

* Master Thesis

** Faculty of physicochemical Sciences. Geology School. Director: M.Sc. Sait KhuramaVelásquez

INTRODUCCIÓN

Es posible apreciar en la actualidad dos variables críticas en el suministro energético mundial; la creciente demanda de energía por parte de economías emergentes (caso de la China e India, por ejemplo) y crecimiento de la clase media; así como el agotamiento sistemático y sostenido de las reservas mundiales de crudos convencionales. Esto naturalmente impacta el precio del crudo y obliga a científicos y exploradores a buscar nuevas fuentes de energía que podrían encontrar una respuesta alentadora en los hoy denominados, hidrocarburos no convencionales.

Entre estos energéticos no convencionales se encuentran las arenas bituminosas, las cuales, en el contexto antes mencionado, comienzan a recibir mayor atención, especialmente por la magnitud de sus reservas. Para el caso colombiano los recursos prospectivos de arenas bituminosas se ha estimado que se encuentran entre 20 y 40 billones de barriles¹, cifra que supera las reservas de crudos convencionales del país que actualmente se encuentran en 2445 millones de barriles y de acuerdo a la relación reservas/producción, Colombia tendría reservas de crudo para 6,6 años².

¹ D'LITTLE, A. INC. Presentación en el Foro Tecnológico de Energías Alternativas e Hidrocarburos No convencionales. Bucaramanga. 2008.

² Datos reportados el 5 de Mayo de 2014 por el diario EL ESPECTADOR, de acuerdo a la información suministrada por el ministro de Minas y Energía luego de revisar los informes de recursos y reservas de crudo con corte al 31 de diciembre de 2013.

Las arenas bituminosas (*oil sands*) se encuentran a profundidades menores de 1000 m³ y están compuestas principalmente de arena, crudo pesado, arcillas ricas en minerales y agua⁴. Características como la baja profundidad a la que se encuentran estos yacimientos y el contraste de resistividad entre la roca reservorio y las rocas adyacentes han favorecido la aplicación de métodos geoelectrónicos en la exploración somera de este tipo de recurso⁵; por lo cual, algunos investigadores han utilizado la relación entre la resistividad eléctrica y las propiedades del subsuelo para su prospección. Meju⁶ establece que esta relación está influenciada por la litología, la textura, presencia de fluido o espacio poroso vacío.

En este caso, la resistividad eléctrica se modifica en función del contenido de líquido en la roca y también depende del tipo de fluido y el grado de degradación de éste.

Los yacimientos someros de crudo extrapesado deben exhibir una resistividad eléctrica directamente proporcional a su saturación de aceite y cuyo valor es al menos un orden de magnitud mayor que la de los acuíferos circundantes.

Esta hipótesis se sustenta en las investigaciones llevadas a cabo por autores como Lakubovskii y Liajov (1980)⁷, quienes plantean que la resistividad de las rocas saturadas de petróleo crece cuanto mayor sea su contenido de petróleo y puede presentar valores de resistividad por encima de los 10⁸ Ω.m; Korb (1977, en

³ CHOPRA, S., LINES, L. Introduction to this special section: Heavy oil: The Leading Edge 27 (9), 1104-1106. 2008.

⁴ ODUNAIKE, R.K., Ijeoma G.C., Edigbe R. O., Babatope A. H. Oil sands exploration in Ijebu-Imushin using magnetic and electrical resistivity methods. 11th SAGA Biennial Technical Meeting and Exhibition Swaziland, 16-18 September. Pages 247-252. 2009

⁵ BAUMAN, P. 2-D Resistivity Surveying for Hydrocarbon-A Primer. CSEG Recorder, April , pp.25-33. 2005

⁶ MEJU, M.A. Geoelectromagnetic exploration for natural resource: Models, case studies and challenges: Surveys in Geophysics, 23, 133-205. 2002

⁷ IAKUBOVSKII, IU. V. y LIAJOV, L. L. Exploración eléctrica. Versión española de la tercera edición rusa. Editorial Reverté S.A. ISBN-84-291-4614-8. 1980

Korb et. al, 2005)⁸ también reporta resistividades altas para hidrocarburos (mayores de 10^{12} Ω .m); sin embargo, Atekwana et al. (2000)⁹ menciona que cuando se trata de un hidrocarburo joven se esperan resistividades altas, pero cuando este se ha degradado las resistividades son bajas; por esta razón, se considera que los hidrocarburos presentes en el área de estudio tendrán resistividades bajas comparadas con un crudo normal debido al alto grado de biodegradación que presentan.

Por esta razón, las arenas bituminosas pueden presentar valores de resistividades entre 900 y 1084 Ω .m según estudios realizados en Nigeria¹⁰ y resistividades entre 110 y 1800 Ω .m reportados en Athabasca por McConnell y Glenn¹¹, Zhdanov¹². Entre tanto, el agua salada presenta resistividades menores a 1 Ω .m y el agua dulce valores mayores a 1 Ω .m y menores a 100 Ω .m^{13, 14}.

Aunque en Colombia no se ha prospectado este recurso con métodos geofísicos, en Canadá y Nigeria se han llevado a cabo investigaciones por medio de métodos geoeléctricos con éxito en la detección de arenas bituminosas. Ejemplo de ello, son la aplicación de técnicas electromagnéticas aéreas¹⁵, sondeos de resistividad

⁸ KORB, M., HUIZAR, R., CAMPOS, J. O. Evaluación hidrogeológica de pozos a través de registros geofísicos. Primera edición. Universidad Nacional Autónoma de México. 2005

⁹ ATEKWANA, E.A., SAUCK, W.A., WERKEMA JR, D.D. Investigations of geoelectrical signatures at hydrocarbon contaminated site, *Journal of Applied Geophysics*, 44, 167-180. 2000

¹⁰ ADEYEMI, G., AKINMOSIN A. A., ALADESANMI A.O., BADMUS G. O. Geophysical and sedimentological characterization of tar sand rich area in South-western Nigeria. *Journal of environment and earth science*. ISSN 2225-0948 (online). Vol. 3, No.14. 2013

¹¹ McCONNELL, D. y GLENN, T. Athabasca Oil Sands Exploration and Development Investigation Using the Helicopter-Borne Transient Electromagnetic Technique. CSPG CSED CWLS conventional. P 701-705. 2008

¹² ZHDANOV, M. S., COX, L., RUDD, J. Paradigm change in 3D inversion of airborne EM surveys: case study for oil sands exploration near Form. McMurray, Alberta. *First break*, Vol. 31. 2013

¹³ IAKUBOVSKII, IU. V. y LIAJOV, L. L. Exploración eléctrica. Versión española de la tercera edición rusa. Editorial Reverté S.A. ISBN-84-291-4614-8. 1980

¹⁴ FALGÁS, E. Hydrogeophysics as a Multidisciplinary Tool on Aquifer Appraisal: Focus on AMT Capabilities. *Universitat de Barcelona*, p. 233. 2007

¹⁵ CRISTALL, J., FARQUHARSON C., OLDENBURG D., Airborne electromagnetic inversion applied to oil sands: expanded abstract, *Can. Soc. Expl. Geophys. Annual Meeting*. 2004

1-D han sido aplicados en la detección directa de hidrocarburos en Alberta¹⁶ y arenas bituminosas en Nigeria^{17, 18, 19}. Por esta razón, se propuso aplicar el método geoelectrico de sondeos eléctricos verticales (SEV) y tomografía de resistividad eléctrica (TRE) para prospectar y caracterizar arenas bituminosas, así como analizar las variaciones de las resistividades en la zona de estudio.

La medición y análisis de las resistividades permitirá establecer la resolución de los métodos seleccionados para identificar anomalías que puedan asociarse con la presencia de crudo extrapesado, y el umbral de resistividades por encima del cual es posible validar una anomalía resistiva como un indicador de un posible yacimiento.

Adicionalmente será posible entender el comportamiento de las resistividades en los yacimientos de arenas bituminosas y podría aplicarse en las otras regiones donde se ha identificado la necesidad de prospectar este tipo de yacimiento en el país, contribuyendo con el proceso exploratorio que adelanta la compañía patrocinadora de esta investigación (ICP-ECOPETROL) para encontrar hidrocarburos no convencionales.

¹⁶ BAUMAN, op. cit

¹⁷ AKO B. D, ALABI A.O, ADEKOE O.S., ENU E.I. Application of Resistivity Soundind in the exploration for Nigeria tar sand, Energy and Explotation. Graham and Trotman Limited, 2 (2). Pages 155-164. 1983

¹⁸ ODUNAIKE, R.K, J. A. LAOYE, O. O. FASUNWON, G. C. IJEOMA, AND AKINYEMI, L. P. Geophysical mapping of the occurrence of shallow oil sands in Idiopopo at Okitipupa area, South-western Nigeria African Journal of Environmental Science and Technology Vol. 4 (1) pp. 034-044. 2010

¹⁹ ADEYEMI, G., AKINMOSIN A. A., ALADESANMI A.O., BADMUS G. O. Geophysycal and sedimentological characterization of tar sand rich area in South-western Nigeria. Journal of environment and earth science. ISSN 2225-0948 (online). Vol. 3, No.14. 2013

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer la validez de la resistividad eléctrica para predecir la presencia de hidrocarburo en el subsuelo por medio de métodos geoelectricos en superficie como una herramienta efectiva para prospección de arenas bituminosas y/o crudos extrapesados.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar los parámetros geológicos y propiedades petrofísicas básicas que caracterizan los yacimientos de arenas bituminosas a nivel mundial para definir rasgos comunes que permitan prospectar este recurso y compararlos con los parámetros de la zona de estudio obtenidos con los sondeos eléctricos verticales y pruebas de laboratorio.
- ✓ Determinar el rango de resistividades que caracteriza las arenas bituminosas del área de estudio a partir de la inversión e interpretación de los datos geoelectricos adquiridos mediante sondeos eléctricos verticales y tomografías de resistividad eléctrica.
- ✓ Caracterizar geoelectrica y geológicamente la zona de estudio identificando propiedades como profundidad, espesor, resistividad y composición litológica del subsuelo a partir de los perfiles adquiridos.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 MÉTODOS GEOELÉCTRICOS

Los métodos eléctricos utilizados en geofísica, también denominados geoeléctricos, estudian por medio de mediciones efectuadas en la superficie del terreno, la distribución en profundidad de alguna magnitud eléctrica²⁰. Las propiedades físicas de un material de acuerdo con su comportamiento electromagnético son: la constante dieléctrica, la permeabilidad magnética y la resistividad.

En general, la geoeléctrica involucra tres variables físicas básicamente: el voltaje, la intensidad de corriente y la resistencia. El voltaje es la causante del movimiento de cargas a través de un medio, su unidad de medida es el voltio (V). La tasa a la cual estas cargas pasan a través de una sección, o también llamado flujo de electrones se denomina corriente o intensidad de corriente (I) y su unidad de medida es el ampere. Este flujo de electrones producidos por el voltaje, provoca fricción en el medio por el cual estas cargas fluyen, a esta capacidad de producir fricción o impedir el movimiento de cargas se le denomina resistencia (R) y su unidad de medida es el ohm.

La ley física que relaciona estas variables se conoce como La Ley de Ohm, la cual establece que "La intensidad de la corriente eléctrica que circula por un conductor eléctrico es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada e inversamente proporcional a la resistencia del mismo". Esta relación se expresa matemáticamente como indica la ecuación **(1)**:

²⁰ ORELLANA, E. Prospección eléctrica por corriente continua. Editorial paraninfo, madrid. Segunda Edición. 1982

$$V = I.R \quad (1)$$

Donde, empleando unidades del Sistema internacional de Medidas, se tiene que:

- I = Intensidad en amperios (A)
- V = Diferencia de potencial en voltios (V)
- R = Resistencia en ohmios (Ω).

Diversos materiales ofrecen distintas resistencia al flujo de electrones que pasa a través de ellos. Esta diferencia es debida a una propiedad intrínseca de cada material que se denomina Resistividad (ρ) y su unidad de medida es (ohm.m).

La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor rango de variación para diversos materiales. En general, en la **Figura 2** se encuentran valores de resistividades para diferentes materiales. Además, su valor depende de diversos factores como la resistividad de los minerales que forman la parte sólida de la roca, la resistividad de los líquidos que rellenan los poros, la humedad del terreno, salinidad del fluido, porosidad, textura, forma y distribución de los poros²¹

Adicionalmente, ciertos minerales tales como metales nativos y grafito conducen electricidad a través del paso de electrones. La mayoría de minerales que forman las rocas son, sin embargo, aislantes, y la corriente eléctrica se realiza a través de una roca principalmente por el paso de los iones en el agua intersticial. Así, la mayoría de rocas conducen electricidad por procesos electrolíticos en lugar de procesos electrónicos. De ello se deduce que la porosidad es el principal factor de control de resistividad de las rocas, la resistividad normalmente incrementa al decrecer la porosidad²².

²¹ IAKUBOVSKII, y LIAJOV, op. cit

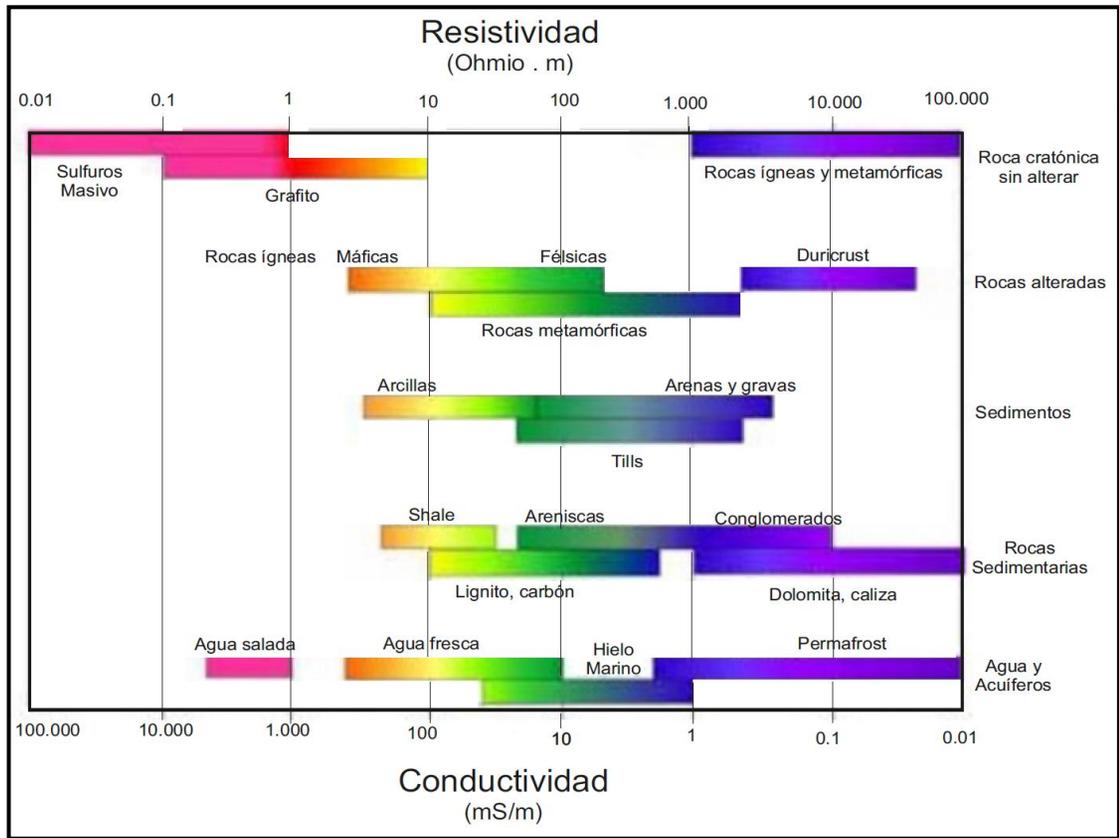
²² KEAREY P., BROOKS M., HILL I., An Introduction to Geophysical Exploration. Third Edition. Blackwell Science. 2002

Así mismo, el registro de resistividad es fundamental en evaluación de formaciones, porque los hidrocarburos no conducen la electricidad mientras que todas las aguas de formación lo hacen. Por lo tanto existe una gran diferencia entre la resistividad de las rocas llenas de hidrocarburos y las rocas llenas de agua de formación. Según Iakubovskii y Liajov²³ si los poros de una formación contienen agua salada presentará alta conductividad y por lo tanto la resistividad será baja, pero si están llenos de petróleo o gas presentará baja conductividad y por lo tanto la resistividad será alta.

La resistividad eléctrica (ρ) es considerada real únicamente cuando el suelo es homogéneo e isotrópico; sin embargo, el terreno suele encontrarse estratificado y con contrastes geológicos, lo cual hace variar los valores del voltaje (ΔV) y la intensidad (I). Esto hace que el valor de resistividad medido, producto de la resistividad medida de todas las capas atravesadas, se denomine resistividad aparente (ρ_a).

²³ IAKUBOVSKII, y LIAJOV, op. cit

Figura 2. Rango de resistividades y conductividades reales de algunos minerales, sedimentos, rocas y fluidos.



Fuente: (Falgás, op. cit.)

Una amplia gama de métodos eléctricos usados en prospección geofísica, apuntan a la medición de la resistividad de los materiales del subsuelo. La interpretación de estos datos pretende una caracterización del medio geológico en cuestión, en base a su resistividad eléctrica.

Finalmente, de los métodos eléctricos se destacan los sondeos eléctricos verticales (SEV), las calicatas eléctricas (CE), tomografía eléctrica (TRE) y polarización inducida (PI) entre otros; sin embargo, a continuación se describen

los SEV y TRE que corresponden a las técnicas empleadas durante el desarrollo de esta investigación.

2.1.1 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV). La teoría del Sondeo Eléctrico Vertical ha sido desarrollada desde principios de siglo pasado por varios autores; donde se destacan los trabajos iniciales de Bewley²⁴ y Orellana²⁵. Aunque existen diversas técnicas para medir esta propiedad los SEV se siguen usando por su sencillez y relativa economía de los equipos necesarios.

De acuerdo a Orellana²⁶, se entiende por Sondeo Eléctrico Vertical a una serie de determinaciones de resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción. Cuya finalidad es averiguar la distribución de resistividades bajo el punto sondeado.

La interpretación de los SEV se realiza por medio de interpretación cualitativa y cuantitativa. La primera permite obtener una idea general de la estructura geológica de la zona investigada y obtener las características cualitativas de las variaciones de facies de los diversos horizontes; mientras la segunda, se realiza para determinar los parámetros del corte geoelectrico, espesores y resistividades y profundidad de los horizontes que conforman el corte^{27, 28, 29}.

²⁴ BEWLEY L.V. theory and tests of the counterpise. American institute of electrical Engineers, transactions of the (volume:53 , issue: 8). 1934

²⁵ ORELLANA, Op. cit

²⁶ Ibid

²⁷ Ibid

²⁸ ORELLANA, Op. cit

²⁹ IAKUBOVSKII, y LIAJOV, Op. cit

2.1.2 Tomografía De Resistividad Eléctrica (TRE). La tomografía eléctrica emplea los valores de resistividad aparente medidos con los dispositivos geoelectrónicos sobre la superficie del terreno, para generar imágenes del subsuelo donde se representan los valores de la resistividad verdadera de las diferentes zonas del subsuelo.

La relación entre la resistividad aparente y la resistividad verdadera, es una relación compleja por lo tanto se aplica la técnica de “inversión” para determinar la resistividad real del subsuelo a partir de los valores de resistividad aparentes.³⁰

Esta técnica genera a partir de una pseudosección, secciones eléctricas del subsuelo expresadas en resistividades aparentes y un modelo hipotético de resistividades verdaderas del subsuelo a través del denominado “cálculo del problema directo” mediante la utilización de programas de computación. Estas resistividades aparentes son comparadas con las medidas reales procediendo al cálculo del error respectivo. Mediante el uso del error se modifica el modelo hipotético real de resistividades verdaderas y se repite el proceso anterior. De este modo, tras una serie de iteraciones, se consigue el modelo de resistividades verdaderas del subsuelo que da explicación a las resistividades aparentes medidas.³¹

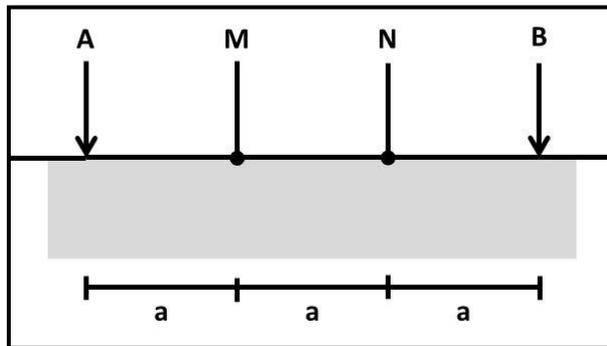
2.1.3 Dispositivos Geoelectrónicos. Para la obtención de los valores de resistividad aparente, en el lugar de medición se colocan en el suelo cuatro electrodos de contacto (A, M, N y B) correspondiendo A y B al circuito de energización (o de corriente), M y N al de recepción (o de potencial), los que se disponen de acuerdo a una de las siguientes modalidades:

³⁰ LOKE, M. H. Tutorial 2D y 3D electrical imaging survey. Geotomo software, Malasia. 2001

³¹ MOLINA, P. Aplicación de diferentes técnicas no destructivas de prospección geofísica a problemas relacionados con contaminación ambiental producida por diferentes actividades antrópicas en la región de Murcia. Tesis Doctoral. Universidad politécnica de Cartagena. 2006

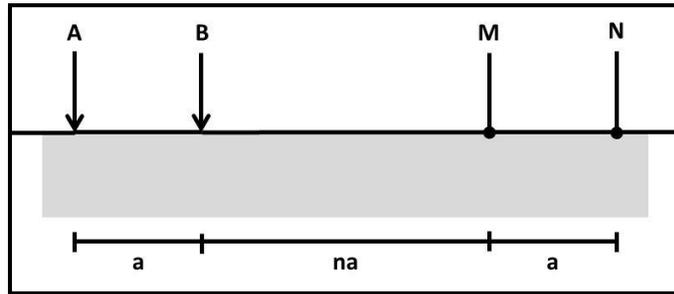
Los métodos para obtener la resistividad se diferencian entre sí por el número de electrodos utilizados y su posición relativa. Cada uno de esos métodos busca la solución de determinados problemas geológicos o físicos para la medición de la resistividad. Según el número de electrodos de la configuración, pueden ser de cuatro electrodos, de tres o de dos. Aunque existen numerosos métodos, los más utilizados en este tipo de estudios son los de Wenner, donde la separación entre los electrodos AM, MN y NB se mantiene constante durante todas las mediciones, como se puede observar en la **Figura 3**; Dipolo – Dipolo, donde los electrodos de corriente AB y los de potencial MN mantienen su distancia constante, variando la distancia entre los polos formado por cada par de electrodos por un factor “n” **Figura 4**; Schlumberger, este arreglo es similar al de Wenner, sin embargo la diferencia radica en que la distancia de los electrodos de potencial MN se mantiene constante, mientras se varia la distancia entre los electrodos de corriente AB (**Figura**).

Figura 3. Dispositivo Wenner.



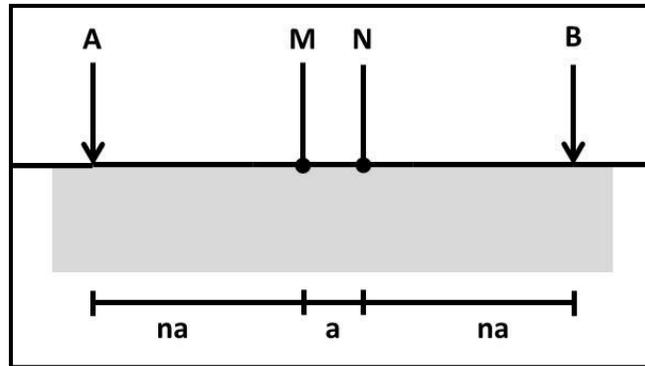
Fuente: (Arias, 2011).

Figura 4. Dispositivo Dipolo - Dipolo.



Fuente: (Arias, 2011).

Figura 5. Dispositivo Schlumberger.



Fuente: (Arias, 2011).

En cualquier dispositivo, si se conoce la distancia entre los electrodos y se mide la intensidad (I) que pasa por los electrodos A y B y la diferencia de potencial entre M y N, es posible calcular la resistividad aparente mediante la **Ecuación (2)**.

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

Donde K es un coeficiente que depende únicamente del tipo de la geometría del dispositivo eléctrico y cuyas dimensiones son de longitud. Por ejemplo, para el caso de un arreglo tipo Schlumberger, el coeficiente se calculará por la Ecuación (3).

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM}} \quad (3)$$

Teniendo en cuenta lo mencionado por Montaña y Vega³², la configuración más usada en prospección para uso en ingeniería eléctrica, es el arreglo tipo Wenner; mientras en prospección geofísica el método más aceptado es la configuración Schlumberger. Se mencionan a continuación las diferencias entre estos arreglos.

En la configuración Schlumberger, la distancia entre los electrodos de potencial MN, es pequeña y siempre es mantenida igual o menor a 1/5 de la distancia entre los electrodos de inyección de corriente AB (AB mayor a 5MN); mientras que en la configuración Wenner AB es siempre igual a 3MN. En los sondeos Schlumberger, los electrodos de potencial únicamente son desplazados ocasionalmente, mientras en los sondeos Wenner, todos los electrodos se desplazan en cada medición. Como consecuencia directa de estas dos diferencias se establece que los sondeos Schlumberger tienen mayor alcance de profundidad (penetración) y resolución para una misma distancia AB. El tiempo y personal necesarios para la ejecución de los sondeos Schlumberger es menor. Las corrientes erráticas producto de fugas en instalaciones industriales, así como las corrientes telúricas afectan más las mediciones realizadas con el dispositivo Wenner, que las realizadas con el método Schlumberger, sobre todo en las mediciones de gran separación eléctrica. Los efectos de heterogeneidades someras laterales afectan menos las mediciones realizadas con el dispositivo Schlumberger, más aún los efectos de las variaciones laterales de resistividad son más fácilmente

³² MONTAÑO, M. F. y VEGA, V. P. Aplicación de métodos eléctricos de prospección geofísica; III congreso CIER de la energía. Revista CIER No. 53 – 2009

reconocidos y corregidos en las curvas Schlumberger que en las Wenner. Una curva de sondeo Schlumberger en oposición a una curva teórica es generalmente discontinua. Esta discontinuidad resulta del incremento de la separación MN, después de varias mediciones; este tipo de discontinuidad en las curvas Schlumberger se considera una ventaja adicional sobre las curvas Wenner, debido a que si la presunción teórica sobre un subsuelo de estratificación horizontal, lateralmente homogénea e isotrópica es válida, entonces las discontinuidades deben ocurrir de una forma teóricamente predecible. La curva entonces puede ser suavizada y rectificada. Por ende, cualquier desviación de la curva Schlumberger, medida en campo y en conjunto con el patrón de la curva teórica indicaría una heterogeneidad lateral o errores de medición. Esta información no es posible obtenerla de las curvas a partir del dispositivo Wenner.

De acuerdo a la comparación anterior, se considera más ventajoso emplear el dispositivo Schlumberger en la adquisición de sondeos eléctricos verticales. Además porque las técnicas de interpretación están mejor desarrolladas y más diversificadas para las curvas Schlumberger.

Después de la adquisición de datos en campo, el resultado final de este tipo de estudio es una imagen con la variación de la resistividad real del subsuelo. Para interpretar esta imagen, es necesario tener un previo conocimiento de la geología de la zona, y con ello los rangos de resistividad, y así por atribución, identificar unidades litológicas de distinta naturaleza, litologías con distinta textura o grado de alteración, aspectos estructurales y geomorfológicos.

2.1.4 Profundidad De Investigación. Aunque no existe un consenso general de la profundidad que se alcanza con cada uno de los métodos, ya que ésta depende tanto de la distancia entre los electrodos como de la estructura particular de cada zona de estudio. Teóricamente, si la distancia entre los electrodos aumenta, la corriente circula a mayor profundidad pero su densidad disminuye.

En cuanto a los SEV, se considera que para un medio isótropo y homogéneo, el 50% de la corriente circula por encima de la profundidad $AB/2$ y el 70.6% por encima de una profundidad AB (Orellana, op. Cit). Mientras en las TRE la profundidad alcanza un 17% de la longitud total del tendido.

2.1.5 Problema inverso y directo. El problema directo en prospección eléctrica consiste en aplicar las leyes del campo eléctrico y un determinado dispositivo electródico (teoría física) a un determinado modelo del terreno que tiene una distribución de resistividades reales para obtener las resistividades aparentes del subsuelo (datos teóricos).

Estos datos teóricos son la solución del problema directo. Posteriormente, se inicia el proceso de inversión (problema inverso) donde se comparan los datos teóricos con las resistividades aparentes obtenidas en el campo (datos experimentales) y si las diferencias entre estos dos modelos son significativas, se modifica el modelo del subsuelo a fin de obtener un nuevo resultado con mejor ajuste entre ellos; este proceso se conoce como iterativo, debido a que se repite la operación hasta encontrar el modelo de resistividades que mejor ajuste los datos teóricos con los experimentales.

Al final, lo que se busca es determinar un modelo numérico que produzca una respuesta similar a los datos medidos y que tenga una expresión geológica coherente.

2.2 ARENAS BITUMINOSAS

Las arenas bituminosas son conocidas con varios nombres, entre ellos: arenas petrolíferas, arenas asfálticas y en inglés son conocidos como *oil sands* y *tar sands*. Estos depósitos ocurren naturalmente y son consideradas una fuente de hidrocarburos no convencional.

Este tipo de yacimiento, es definido como depósitos sedimentarios inconsolidados que contienen hidrocarburo, caracterizado por su alta viscosidad y alta densidad (baja gravedad API) en condiciones de reservorio (Gwynn y Hanson, 2007 en Amigun et al, 2012). Estos depósitos están compuestos principalmente de arena, cuarzo, limo, arcilla, agua y bitumen, junto con cantidades menores de metales y minerales. Una composición típica es:

- 75 a 80% de material inorgánico, con 90% de esta porción inorgánica compuesta de cuarzo.
- 3 a 5% de agua.
- 10 a 12 % de bitumen con saturaciones que varían entre 0 y 18% en peso.

Las arenas bituminosas son generalmente no-consolidadas y por lo tanto son friables y se desquebrajan fácilmente en la mano³³ como se observa en la **Figura 1**.

³³ NATIONAL ENERGY BOARD. Canada's Oil Sands. A Supply and Market Outlook to 2015. 2000

Figura 1. Arenas petrolíferas canadienses.

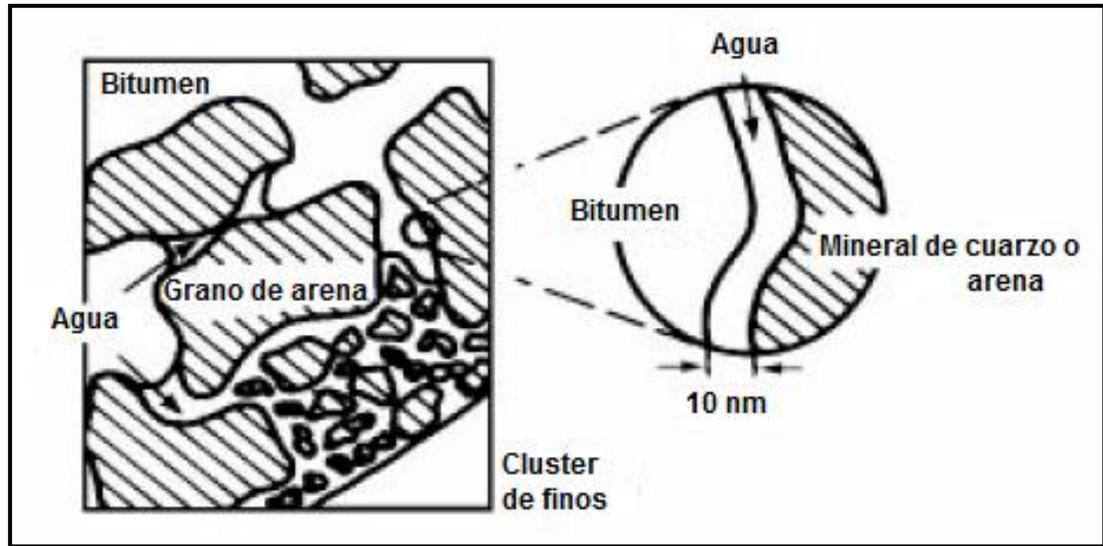


Fuente: <http://ostseis.anl.gov/guide/photos/index.cfm>

Un aspecto clave de los reservorios de arenas bituminosas es la presencia de agua de formación ligada, que rodea los granos de arena en forma de capa **Figura 7**. El bitumen está atrapado en el espacio poroso de la roca, de manera similar a la mayoría de los reservorios convencionales. La presencia de una capa de agua alrededor de los granos permite que el bitumen sea recuperado más fácilmente debido a que las fuerzas de atracción entre el bitumen y el agua son mucho más débiles que aquellas entre el agua y los granos de arena³⁴

³⁴ Ibid

Figura 7. Modelo estructural de una arena petrolífera de Athabasca (Canadá). El agua en la arena aparece de tres formas: como anillos pendulares en puntos de contacto entre los granos, como una capa de ~10nm cubriendo las superficies de los granos y como agua retenida en clúster de finos. El espacio restante es ocupado por el bitumen.



Fuente: Tomado y modificado de National Energy Board, op. cit.

2.2.1 Origen y ocurrencia de crudos pesados y extrapesados. La mayoría de los crudos pesados se originan de crudos convencionales que han sido degradados en el reservorio por uno o varios de los siguientes procesos: lavado con agua, pérdida de volátiles, oxidación inorgánica y biodegradación.

Para Attanasi y Meyer³⁵ este último es el principal factor que influye en la degradación.

³⁵ ATTANASI E.D, MEYER R.F. Natural bitumen and extra-heavy oil, in 2007. Survey of Energy Resources, eds., J. Trinnaman and A. Clarke: World Energy Council, p119-143

Mientras Jiang³⁶ sugiere que la degradación está comúnmente asociada a la invasión de aguas de formación meteórica derivadas de la superficie. La extensión de la degradación está asociada con parámetros como la profundidad, proximidad al contacto con el aire y la salinidad de las aguas de formación³⁷. Finalmente, el resultado de este tipo de alteración es un crudo pesado o extra pesado altamente viscoso.

2.2.2 Características de yacimientos de arenas bituminosas en el mundo.

Con el fin de conocer algunas características de los yacimientos de arenas bituminosas, se realizó la búsqueda de información relacionada con el tema en las bases de datos ScienceDirect, IHS, AAPG, USGS y GSW.

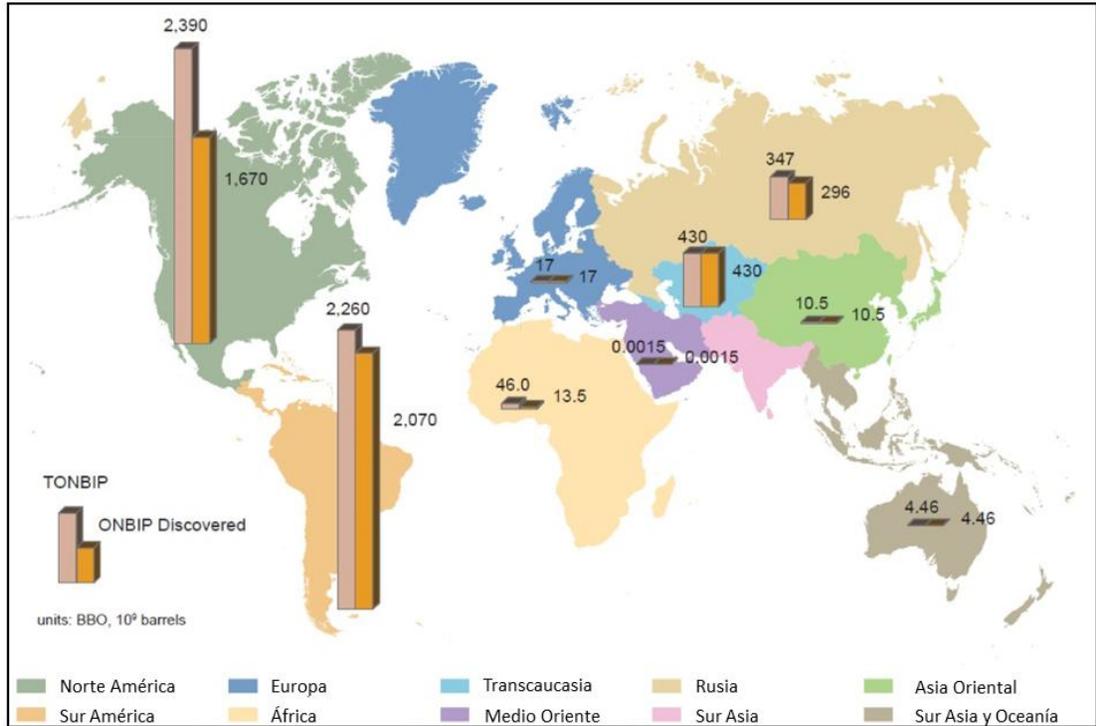
Las principales acumulaciones de arenas bituminosas se encuentran en Canada (las áreas corresponden a *Athabasca*, *Cold Lake* y *Peace River*) y Venezuela; sin embargo en otros países también se ha reportado la existencia de este tipo de recurso como indica la U.S. Geological Survey en su reporte 2007-1084 elaborado por Meyer³⁸, donde indican que las principales acumulaciones de arenas bituminosas se concentran en Norte América, Sur América, Transcaucasia y Rusia, con valores totales de arenas bituminosas *in situ* en billones de barriles (*Total original natural bitumen in place, TONBIP*) que oscilan entre los 2390 y 347 TONBIP para estas cuatro principales regiones, como se indica en la **Figura** .

³⁶ JIANG, Q. Review of Thermal Recovery Technologies for the Clearwater and Lower Grand Rapids Formations in Cold Lake, Alberta. JCPT, Vol. 49 No. 9. 2010

³⁷ Ibid

³⁸ MEYER R. F., ATTANASI E. D., FREEMAN P. A. Heavy Oil and Natural Bitumen Resources in Geological Basins of the World. U.S. Geological Survey. Report 2007-1084. Available online at: <http://pubs.usgs.gov/of/2007/1084/>. 2007

Figura 8. Distribución por regiones de arenas bituminosas a nivel mundial.



Fuente: Tomado y modificado de Meyer et al, 2007.

Posterior a la recopilación de información se definieron los parámetros de interés para la comparación entre varios yacimientos reportados en el mundo, dentro de los cuales están el tipo de cuenca, formación reservorio, ambiente de depositación, régimen tectónico, profundidad, espesor, porosidad, permeabilidad, gravedad API y viscosidad.

Sin embargo, en la etapa de revisión de la información se identificó que a pesar de existir 26 cuencas sedimentarias con reporte de arenas bituminosas³⁹, los países con mayor cantidad de información específica publicada sobre los parámetros a comparar son Canadá, Venezuela, Estados Unidos, China, Nigeria y Rusia, razón

³⁹ Ibid

por la cual, la búsqueda de los parámetros de comparación se centró en estos países.

A continuación se describe brevemente las características geológicas de las cuencas de interés en estos países:

- **CANADA:** La *Western Canadian Sedimentary Basin (WCSB)* es la principal cuenca productora de arenas bituminosas en el mundo, está ubicada en Alberta y sus principales reservorios son los de Athabasca, Peace River y Cold Lake. La WCSB es una cuenca tipo *foreland*, donde los estratos que contienen las arenas bituminosas se pinchan hacia el este contra el basamento cristalino⁴⁰ contra discordancias regionales^{41,42}. La principal roca reservorio es la Formación McMurray, la cual es de edad Cretácico Temprano y fue depositada en ambientes transicionales fluviales, deltaicos y dominados por mareas en un régimen tectónico compresivo^{43, 44}.
- **VENEZUELA:** La Cuenca Oriental de Venezuela o Cinturón de Crudos Pesados del Orinoco es la segunda cuenca productora de crudos pesados y extra pesados en el mundo). La cuenca es de tipo *foreland*, con fallas normales de bajo desplazamiento hacia el centro de la cuenca. La principal roca reservorio es la Formación Oficina de edad Mioceno; fue depositada en ambientes

⁴⁰ DUSSEAULT M. B. Comparing Venezuelan and Canadian Heavy Oil and Tar Sands. Canadian International Petroleum Conference. PAPER 061. 2001

⁴¹ Ibid

⁴² MEYER, ATTANASI, FREEMAN, (2007). Op. Cit

⁴³ PLINT A. G., MCCARTHY P. J. AND FACCINI U. F. Nonmarine sequence stratigraphy: Updip expression of sequence boundaries and systems tracts in a high-resolution framework, Cenomanian Dunvegan Formation, Alberta foreland basin, Canada. AAPG Bulletin, v. 85, no. 11. 2001

⁴⁴ CRERAR E. AND ARNOTT R. W. C. Facies distribution and stratigraphic architecture of the Lower Cretaceous McMurray Formation, Lewis Property, northeastern Alberta. Bulletin of Canadian Petroleum Geology. Vol. 55, No. 2, P. 99–124. 2007

transicionales fluviales, deltaicos y de playa en un régimen tectónico compresivo^{45, 46, 47, 48}.

- **ESTADOS UNIDOS:** La Cuenca Uinta está ubicada en el sector centro y este del estado de Utah; es de tipo *foreland* y está limitada por diferentes sistemas montañosos al oeste y al norte^{49, 50, 51, 52} y se caracteriza por tener un cinturón de venas de gilsonita. Las capas tienen buzamientos suaves cerca a la superficie entre 10 – 35°^{53, 54}. Las principales rocas reservorio son las Formaciones Wasatch y Green River de edad Paleoceno - Eoceno y fueron depositadas en ambientes transicionales fluviales, deltaicos y de playa en un régimen tectónico compresivo, Orogenia Laramide.^{55, 56}

⁴⁵ SUMMA L. L., GOODMAN E. D., RICHARDSON M., NORTON I.O. AND GREEN A.R. Hydrocarbon systems of Northeastern Venezuela: plate through molecular scale-analysis of the genesis and evolution of the Eastern Venezuela Basin. *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 20, pg. 323–349. 2003

⁴⁶ GUEVARA F., CASTILLO J., FAIR JR. W., PORJESZ R. Impacting the bottom line of field performance: Joint reservoir studies in three Venezuelan oil fields. *The Leading Edge*, Pg. 1174 – 1179. 2005

⁴⁷ GODDARD D. *Venezuela Sedimentary Basins, Principal Reservoirs and Completion Practices*. 2006

⁴⁸ MÉNDEZ O. Heavy Oil International Technology Forum. VETRA. Bucaramanga. 2011

⁴⁹ BLACKETT R. E. Tar-Sand Resources of the Uinta Basin, Utah. *A Catalog of Deposits*. Utah Geological Survey. 1996

⁵⁰ KEIGHLEY D., FLINT S., HOWELL J. AND MOSCARIELLO A. Sequence Stratigraphy in Lacustrine Basins: A Model for Part of the Green River Formation (Eocene), Southwest Uinta Basin, Utah, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*, Vol. 73, N. 6, P. 987–1006. 2003

⁵¹ MEYER R., ATTANASI, FREEMAN Op. Cit.

⁵² BADER J. W. Structural and tectonic evolution of the Douglas Creek arch, the Douglas Creek fault zone, and environs, northwestern Colorado and northeastern Utah: Implications for petroleum accumulation in the Piceance and Uinta basins. *Rocky Mountain Geology*, v. 44, no. 2, p. 121–145. 2009

⁵³ BLACKETT Op. Cit.

⁵⁴ MORGAN C. D., MCCLURE P., BERESKIN S. R., DEO M. D., WELLER K.. Reservoir Characterization of the Lower Green River Formation, Southwest Uinta Basin, Utah. Virginia Weyland, Contract Manager, U.S. Department of Energy. 2001

⁵⁵ BLACKETT. Op. Cit.

⁵⁶ BADER Op. Cit.

- **CHINA:** La Cuenca Junggar está ubicada en el sector noroeste de China y es tipo *foreland*^{57, 58, 59}. Las principales rocas reservorio son las Formaciones Kalamay y Tugulu de edad Triásico Tardío – Cretácico Temprano, y fueron depositadas en ambientes transicionales fluviales y deltaicos en un régimen tectónico compresivo, Orogenia Yanshan^{60, 61, 62, 63}.
- **NIGERIA:** La Cuenca Dahomay está ubicada al suroeste de Nigeria, se encuentra en el Golfo de Guinea y se extiende al suroeste del margen de Ghana, Togo y la República de Benin. Según Burke⁶⁴ y Kingston⁶⁵ la cuenca es de tipo peri-cratónica (marginal SAG). La principal roca reservorio corresponde a la Formación Afowo depositada en el Cretácico tardío^{66, 67} en un ambiente marino transicional (Adeyemi et al, op. cit).

⁵⁷ JIN Z., CAO J., HU W., ZHANG Y., YAO S., WANG X., ZHANG Y., TANG Y. AND SHI X. (2008). Episodic Petroleum Fluid Migration in Fault Zones of the Northwestern Junggar Basin (Northwest China): Evidence from hydrocarbon-bearing zoned calcite cement. AAPG Bulletin, v. 92, no. 9, pp. 1225–1243

⁵⁸ XIAO Q., HE S., YANG Z., HE Z, FURONG W., LI S. AND TANG D. (2010). Petroleum Secondary Migration and Accumulation in the Central Junggar Basin, Northwest China: Insights from basin modeling. AAPG Bulletin, v. 94, no. 7, pp. 937–955

⁵⁹ HAO F., ZHANG Z., ZOU H., ZHANG Y. AND YANG Y. (2011). Origin and Mechanism of the Formation of the Low-oil-saturation Moxizhuang Field, Junggar Basin, China: Implication for Petroleum Exploration in Basins Having Complex Histories. AAPG Bulletin, v. 95, no. 6, pp. 983–1008

⁶⁰ RUIQI Y., YUWEN C., XINGE S., JIANQUI W. AND SHUYUAN L. (1998). Resource Evaluation and Development Prospect of Heavy Oil and Tar Sands in Northwestern Margin of Junggar Basin. 7th UNITAR Conference on Heavy Crude and Tar Sands. Oklahoma

⁶¹ LUO X., WANG Z., ZHANG L., YANG W. AND LIU L. (2007). Overpressure Generation and Evolution in a Compressional Tectonic Setting, the Southern Margin of Junggar Basin, Northwestern China. AAPG Bulletin, v. 91, no. 8, pp. 1123–1139

⁶² XIAO HE YANG HE, FURONG LI S. AND TANG Op. Cit.

⁶³ HAO ZHANG ZOU ZHANG Y. AND YANG Op. Cit.

⁶⁴ BURKE, K.C.B., DESSAUVAGIE, T.F.C., WHITEMAN, A.J. (1971). The opening of the Gulf of Guinea and the geological history of the Benue depression and Niger Delta. Nature physical science 233 (38), pp 51-55

⁶⁵ KINGSTON, D.R., DISHROON, C.P., WILLIAMS, P. A. (1983). Global Basin classification system. AAPG. Bull., Vol 67, pp. 2175-2193

⁶⁶ AKINMOSIN, A. A., OMOSANYA, K. O., IKHANE P. R., MOSURO G. O. Characterization of a bitumen seepage in Eastern Dahomey Basin, SW, Nigeria. Pelagia Research Library. ISSN: 0976-8616. Availabe online at www.pelagiaresearchlibrary.com. 2012

⁶⁷ AKINMOSIN, A. A., OMOSANYA, K. O., IGE, T. The occurrence of tar sands at Ijebu-Itele, Eastern Dahomey basin, SW, Nigeria. ARPN Journal of science and technology. Vol. 3. No. 1. ISSN 2225-7217. 2013

- **RUSIA:** La West Siberian Sedimentary Basin (WSSB) está ubicada en el sector centro y norte de RUSIA. La cuenca es de tipo intracratónica SAG^{68, 69, 70}. La principal roca reservorio es la Formación Pokur de edad Cretácico Temprano a Tardío y fue depositada en ambientes transicionales aluviales, deltaicos y de near-shore en un régimen tectónico post – rift y compresivo^{71, 72}.

Para concluir, en la **Tabla 1** se presentan las características geológicas de estos yacimientos, así como sus propiedades petrofísicas. Se evidencia que estos yacimientos tienen características similares, dentro de las que se destaca el tipo de cuenca, ambiente de depositación y régimen tectónico, ya que la mayoría está asociada a cuencas tipo *forland*, ambientes transicionales fluviales y deltaico, así como a regímenes tectónicos compresivos.

⁶⁸ LITTKER., CRAMER B., GERLING P., LOPATIN N. V., POELCHAU H. S., SCHAEFER R. G. AND WELTE D. H. Gas Generation and Accumulation in the West Siberian Basin. AAPG Bulletin, V. 83, No. 10, P. 1642–1665. 1999

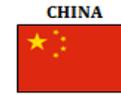
⁶⁹ ULMISHEK G. F. Petroleum Geology and Resources of the West Siberian Basin, Russia. U.S. Geological Survey Bulletin 2201-G. 2003

⁷⁰ MILKOV A. V. Methanogenic Biodegradation of Petroleum in the West Siberian Basin (Russia): Significance for formation of giant Cenomanian gas pools. AAPG Bulletin, v. 94, no. 10, pp. 1485–1541. 2010

⁷¹ LITTKER., CRAMER, GERLING, LOPATIN, POELCHAU, SCHAEFER, AND WELTE. Op. Cit.

⁷² ULMISHEK Op. Cit.

Tabla 1. Características geológicas y petrofísicas de yacimientos de arenas bituminosas.



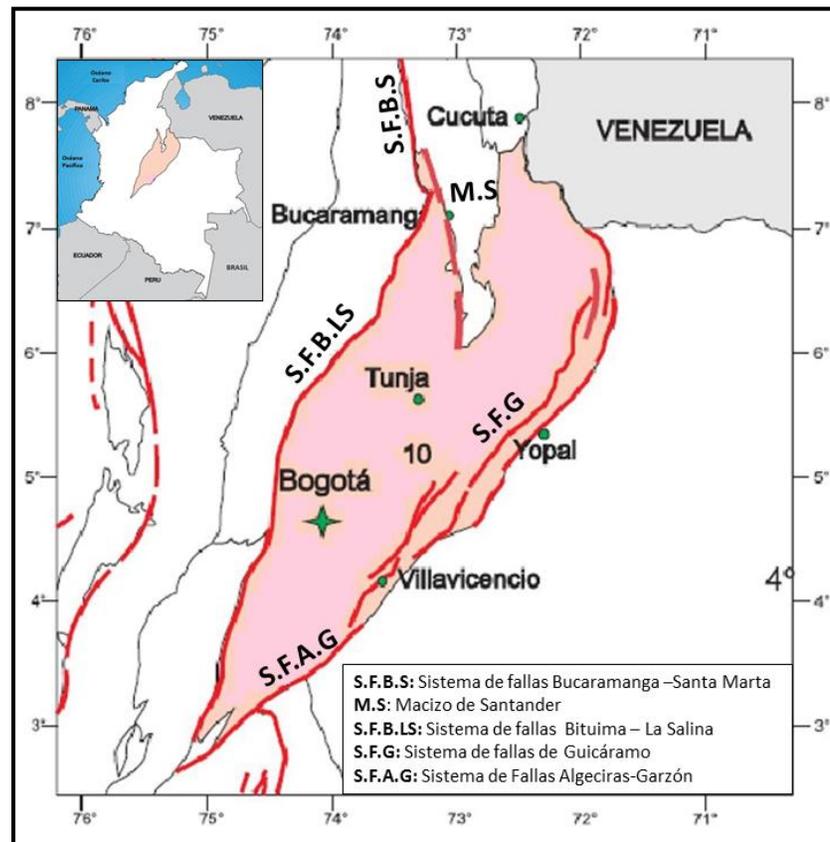
CUENCA	<i>Western Canadian Sedimentary Basin (WCSB)</i>	Cuenca Oriental de Venezuela	<i>West Siberian Sedimentary Basin (WSSB)</i>	Cuenca Uinta	Cuenca Junggar	Dahomey
TIPO DE CUENCA	<i>Foreland</i>	<i>Foreland</i>	Intracratónica	<i>Foreland</i>	<i>Foreland</i>	<i>Marginal SAG</i>
FM. RESERVORIO	Formación McMurray	Formación Oficina	Formación Pokur	Formaciones Wasatch y Green River	Formaciones Kalamay y Tugulu	Formación Afowo
EDAD FM. RESERVORIO	Cretácico Temprano	Terciario (Mioceno)	Cretácico Temprano a Tardío	Terciario (Paleoceno - Eoceno)	Triásico Tardío – Cretácico Temprano	Cretácico Tardío
AMBIENTE DE DEPOSITACIÓN	Transicionales fluviales, deltaico y dominado por mareas	Transicionales fluviales, deltaicos y de playa	Transicionales aluviales, deltaicos y <i>nearshore</i>	Transicionales fluviales, deltaicos y de playa	Transicionales fluviales y deltaicos	Transicional
REGIMEN TECTÓNICO	Compresivo	Compresivo	<i>post rift</i> y compresivo	Compresivo	Compresivo	Margen divergente
PROFUNDIDAD (metros)	305 - 914	137 - 1981	107 - 1494	152 - 610	>305	0,5 - 50
ESPESOR PROM (metros)	-	6 - 24	27 - 46	30 - 91	6 - 9	3 - 23
POROSIDAD (%)	25 - 30	27 - 32	20 - 39	18 - 25	25 - 29	16 - 35
PERMEABILIDAD (mD)	500 - 5000	2000 - 15000	100 – 1000	500 – 1.200	600	868
GRAVEDAD API	8,5 - 9,5	8,0 - 9,0	-	4,8 - 14,7	< 13	5,3 - 14,6
VISCOSIDAD (cP)	10.000 - 1'000.000	4.000 – 20.000	-	100.000	50.000	962.00

3. ANTECEDENTES

3.1 GEOLOGÍA DEL ÁREA

El municipio de Pesca se ubica en el sector noreste de la cuenca Cordillera Oriental. Esta cuenca limita al Oriente por el sistema de fallas de Guaicáramo; al Occidente por los sistemas de fallas de Bituima y La Salina; al Norte por el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta y el Macizo de Santander y al Sur por el sistema de fallas Algeciras-Garzón **Figura 9**.

Figura 9. Localización de la Cordillera Oriental.



Fuente: Tomado y modificado de Barrero et. al. (2007)

3.1.1 Marco estructural. Dentro de los principales elementos estructurales del área se destacan dos sistemas de fallas de tipo inverso, al Occidente la falla de Boyacá y al Oriente la falla de Soapaga. Estas fallas de acuerdo con Kammer y Sánchez⁷³ son la terminación de la Falla de Bucaramanga.

La Falla de Boyacá enfrenta rocas Jurásicas del anticlinal de Arcabuco con rocas Cenozoicas en su bloque yacente, mientras la Falla de Soapaga de dirección aproximada N20E pone en contacto rocas del Cretáceo Inferior con rocas del Terciario Superior al Oeste. Autores como De Freitas⁷⁴ y Tesón⁷⁵ afirman que la falla de Soapaga es una falla de cabalgamiento de alto ángulo.

Entre tanto, el municipio de Pesca y su zona rural donde se desarrolla el presente trabajo, se encuentran la Falla de Soapaga y la Falla El Hato. Estas dos fallas ponen en contacto rocas sedimentarias replegadas del Cretácico, encima de rocas del Terciario, conformando un nido de rocas terciarias con las rocas Cretácicas al Oeste de la Falla de Soapaga y al Este de la Falla El Hato. Adicionalmente, se presentan fallas menores, de tipo normal e inverso que tienen importancia ya que son producto de la conjunción y transmisión de esfuerzos tensionales y compresionales a los que la región ha sido sometida a lo largo de su historia geológica.

⁷³ KAMMER, A. y SÁNCHEZ, J. (2006). Early Jurassic rift structures associated with the Soapaga and Boyacá faults of the Eastern Cordillera, Colombia: Sedimentological inferences and regional implications. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. 21. P. 412-422, Santa Fe de Bogota

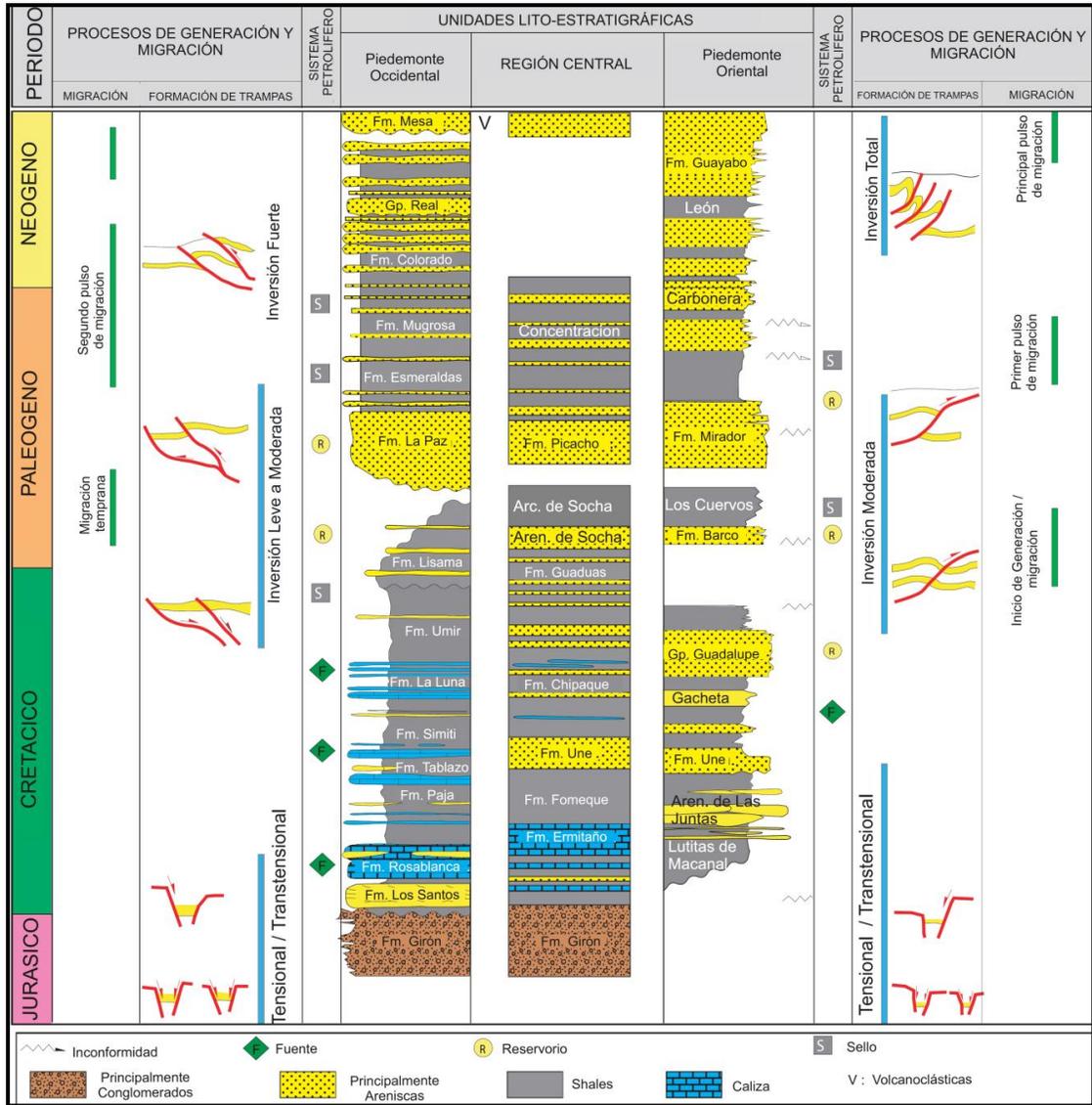
⁷⁴ DE FREITAS, M., FRANÇOLIN, J. COBBOLD. P. 1997. The Structure of the Axial Zone of the Cordillera Oriental, Colombia . VI Simposio Bolivariano "Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas". Asociación Colombiana Geólogos y Geofísicos del Petróleo. Memorias, Cartagena, Tomo II, pp. 38-41

⁷⁵ TESÓN, E., MORA, A., SILVA, A., NAMSON, J., TEIXELL, A., CASTELLANOS, J., CASALLAS, W., JULIVERT, M., TAYLOR, M., IBÁÑEZ-MEJÍA, M., VALENCIA, A. (2013). Relationship of Mesozoic graben development, stress, shortening magnitude, and structural style in the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. *GSA London, Special Publications Online First*

3.1.2 Marco estratigráfico. La cuenca Cordillera Oriental reporta una secuencia geológica que abarca del Jurásico al Neógeno como se observa en la columna estratigráfica generalizada (Figura). El área de estudio se centra en la plancha geológica 191 donde se emplea la nomenclatura de la región central expuesta en la Figura . En el área de estudio afloran rocas con edades que van desde el Cretácico al Cuaternario.

En el sector Oriental de la Falla de Soapaga, se encuentran las formaciones Guaduas, Socha, Picacho y Concentración. En esta investigación las rocas de interés corresponden a las formaciones del Terciario donde se reportan las acumulaciones de asfalto (formaciones Socha, Picacho y Concentración).

Figura 10. Columna generaliza de la Cordillera Oriental.



Fuente: Tomado y modificado de Barrero et. al. (op. cit).

Formación Socha Inferior (Tpsi): Denominación dada por Alvarado y Sarmiento⁷⁶ a una sucesión de areniscas aflorantes en la población de Socha Viejo al NE de Paz de Río. Litológicamente esta formación es predominantemente

⁷⁶ ALVARADO, B. y SARMIENTO, R. (1944). Informe geológico general sobre los yacimientos de hierro y caliza de la región de Paz del Río (Departamento de Boyacá). Informe No 468. Servicio Geológico Nacional

arenosa, conformada por areniscas de grano medio a grueso masivas, intercaladas con niveles de arcillolitas y bancos de areniscas de grano fino y a veces conglomeráticas, hacia la parte inferior; la parte media de la formación tiende a ser mayormente de carácter arcilloso, mientras que la parte superior vuelve a ser arenosa, presentando bancos de areniscas de grano fino a grueso con estratificación cruzada y algunas intercalaciones arcillosas. La formación se originó en facies de estuario con episodios lagunares en la parte inferior y la edad asignada por Van Der Hammen (1957) es del Paleoceno.

Formación Socha Superior (Tpss): Alvarado y Sarmiento⁷⁷ define esta formación como una sucesión de estratos que yacen sobre las areniscas de la Formación Socha Inferior. El nivel superior lo conforman arcillolitas abigarradas, presenta dos niveles de arenisca gris verdosa y parda con estratificación cruzada. El techo de la formación lo constituyen arcillolitas grises y habanas; se aprecian fracturas rellenas de limolita de color rojizo. La edad determinada por Van Der Hammen, para esta formación corresponde al Paleoceno Superior

Formación Picacho (Tp): Este nombre fue asignado por Alvarado y Sarmiento⁷⁸ a las areniscas que forman el cerro Picacho, en el Alto del Portillo, al noroeste del casco urbano de Paz de Río. Esta formación es predominantemente arenosa. Las areniscas son de color blanco a pardo, bastantes limpias, masivas, moderadamente dura a friables, de grano fino a grueso, con niveles conglomeráticos. El miembro inferior consta de gruesos bancos de areniscas (las bancadas en algunos casos pueden alcanzar los 50 m), que siendo muy porosas frecuentemente tiene zonas impregnadas de asfaltos. El miembro superior está constituido hasta en un 60% de arcillolitas, en parte arenosa, con dos intercalaciones importantes de areniscas. El techo está constituido por una arcillolita habana compacta muy característica. Existen variaciones laterales por lo

⁷⁷ Ibid

⁷⁸ Ibid

que las areniscas pueden variar de posición dentro de este miembro. La formación se encuentra en contacto discordante sobre la Formación Socha Superior e infrayace discordante con la formación Concentración⁷⁹.

De acuerdo a Alvarado y Sarmiento⁸⁰, la Formación Picacho presenta un espesor entre 90 y 115m en su localidad tipo al Norte de Betéivita, así mismo indican un espesor de 138.8m en la vía Corrales Paz de Rio; en Ulloa⁸¹, reportan un espesor de 560m al sur de Sogamoso, mientras que Bayona⁸² reporta un espesor en el área de Umbita de 245m.

La edad reportada para esta formación según Van Der Hammen es del Eoceno tardío, Fajardo⁸³ Eoceno Temprano, Pardo y Roche⁸⁴ sugiere una edad de finales del Eoceno tardío al Eoceno Medio. El ambiente de depositación según Saylor⁸⁵ corresponde a un ambiente de tipo fluvial trenzado hacia el Sur de Beteitiva y ambiente de anteplaya hacia el municipio de Paz de Rio. Por su parte, Pardo y Roche⁸⁶ también sugieren un ambiente de ríos trenzados.

⁷⁹ DE PORTA, J. (1974): *Léxico Estratigráfico Internacional Vol 5. Amérique Latine fascicule 4b Colombia. Décima parte. Centre National de la Recherche Scientifique, Paris*

⁸⁰ Alvarado y Sarmiento (op. cit)

⁸¹ ULLOA, C., RODRÍGUEZ, E., FUQUEN, J., ACOSTA, J., (2001). *Memoria Explicativa Geología de La Plancha 192 Laguna de Tota, Ingeominas, Bogotá*

⁸² BAYONA, G.; CARDONA, A.; JARAMILLO, C.; MORA, A.; MONTES, C.; CABALLERO, V.; MAHECHA, H.; LAMUS, F.; MONTENEGRO, O.; JIMENEZ, G.; MESA, A.; VALENCIA, V., (2013). *Onset of fault reactivation in the Eastern Cordillera of Colombia and proximal Llanos basin; response to Caribbean – South American convergence in early Paleogene time, Geological Society, London, Special Publications Online First, 42p*

⁸³ FAJARDO, G. (1998). *Estructural analysis and basin inversión evolutionary model of Arcabuco, Tunja and Sogamoso región Eastern Cordillera*

⁸⁴ PARDO, A. y ROCHE, E. (2011). *Stratigraphy, palinology and paleofacies of the lower Tertiary rocks from the Paz de Rio región (Chicamocha river valley, Eastern cordillera, Colombia).*

⁸⁵ SAYLOR, J.; HORTON, B., CORREDOR, J., MORA, A. (2010). *Evaluating foreland basin partitioning in the northern Andes using Cenozoic fill of the Floresta basin, Eastern Cordillera, Colombia*

⁸⁶ PARDO, A. y ROCHE, E. (2009). *Paleocene-Eocene palynology and palynofacies from northeastern Colombia and western Venezuela. Cuaderno de Investigación 41. Universidad de Caldas, Manizales*

Formación Concentración: La formación fue nombrada por Alvarado y Sarmiento (op. cit) para designar una sucesión de arcillolitas yesíferas y areniscas de grano fino a grueso que presentan estratos de hierro oolítico y su localidad tipo es el sector entre el caserío de Concentración, sobre la vía Paz de Río – Belén, y el Puente del Uvo muy cerca de Paz de Río sobre la misma vía. En la localidad tipo la formación tiene un espesor que oscila entre 1368 a 1554 m.

Ulloa⁸⁷ en una secuencia levantada sobre la carretera Paz de Río – Belén divide la formación en tres conjuntos. El inferior con un espesor de 350,15 m, está formado por arcillolitas grises oscuras y negras, con varios estratos de hierro oolítico hacia la parte inferior y media del conjunto con espesores que varía entre 0,30 y 2,50 m, y con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano fino a medio y localmente grueso. El conjunto medio, con un espesor de 166,80 m, está constituido principalmente por arcillolitas grises claras, amarillentas y rojizas por alteración, con escasa intercalaciones de cuarzoarenitas de grano fino, grises amarillentas, friables y capas de hierro limonítico con espesores de 0,20 m. El conjunto superior de 945,50 m está formado por arcillolitas grises claras a oscuras, amarillentas y rojizas por meteorización, en capas delgadas con presencia de capas de hierro limonítico de 0,20 m hacia la base, laminillas de yeso de 1 cm. hacia la parte media e intercalaciones frecuentes de cuarzoarenitas de grano fino a medio, en lentes, hacia la parte inferior y media del conjunto.

La edad de la formación según Van Der Hammen está entre el Eoceno medio y el Oligoceno medio.

⁸⁷ ULLOA, RODRÍGUEZ, FUQUEN, ACOSTA, Op. Cit.

En cuanto al ambiente de depositación, Ulloa y Rodríguez⁸⁸ interpretan un ambiente lagunar continental a marino cenagoso; Kimberley⁸⁹ relaciona la existencia de una capa de 2 a 12 metros de hierros oolítico en la parte inferior de esta unidad con ambientes de barras litorales en mares interiores.

3.2 PROSPECCIÓN DE ARENAS BITUMINOSAS EMPLEANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS

Los estudios realizados en la cuenca Cordillera Oriental, han estado en su mayoría enfocados a comprender la complejidad estructural del piedemonte oriental y la zona axial, así como su influencia en la formación de trampas. Por otra parte, algunos estudios se han realizado con el fin de estudiar las manifestaciones de hidrocarburos reportadas en el área en forma de rezumaderos, así como estudios realizados al asfalto natural presente en las minas Santa Teresa y La Emilia para caracterizar su comportamiento en la pavimentación de vías^{90, 91}. Sin embargo, hasta el momento no se han llevado a cabo estudios geofísicos que tengan como objetivo investigar o probar los diferentes métodos geoeléctricos encaminados hacia la prospección de hidrocarburos no convencionales como las arenas bituminosas, por esta razón se citan estudios internacionales donde se han aplicado métodos geoeléctricos para identificar zonas de acumulación de arenas bituminosas.

⁸⁸ ULLOA, C. y RODRÍGUEZ, E. (1979) Geología del cuadrángulo K-12, Guateque. Bol. Geol. Ingeominas Vol. 22, Nº 1 .Bogotá

⁸⁹ KIMBERLEY, M. (1980). The Paz de Rio oolitic inland-sea Iron Formation. Economic Geology 75: 97-106

⁹⁰ ULLOA, D. J., GOMÉZ, G. R. (1987). Evaluación técnico-económica de los yacimientos de asfalto en Pesca, Boyacá. Trabajo de grado, escuela de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga

⁹¹ RETAMOSO, LL. C., VILLABONA, R. H. (1997). Estudio para el mejoramiento de capas de pavimento con asfalto natural de Pesca (Boyacá). Trabajo de grado, escuela de Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga

De acuerdo a lo anterior, se presentan en primera instancia los antecedentes de la zona de estudio y posteriormente las investigaciones internacionales de prospección geofísica enfocados a arenas bituminosas.

3.2.1 Prospección geofísica en el área de estudio. Los estudios realizados en el área de Pesca y municipios aledaños que se presentan a continuación están relacionados con manifestaciones de hidrocarburos y los escasos estudios geofísicos llevados a cabo en el área.

Grosse⁹² desarrolló un estudio enfocado a los yacimientos de asfaltos de Tuta, Paipa, Laguna de Tota, Pesca, Toca, Tópaga, Corrales, Sogamoso, Boyacá y Machetá, donde describen las emanaciones de hidrocarburos y caracteriza las muestras a partir de pruebas de laboratorio para determinar porcentajes de Bitumen, inorgánicos, humedad, volátiles y azufre.

Sarmiento⁹³, llevo a cabo un estudio en la mina “La Emilia” con el fin de determinar la posibilidad de explotación económica de unos bancos de arenas con impregnación de asfalto localizados en cercanías al municipio de Pesca. En el estudio reportan la descripción litológica y estratigráfica, generalidades estructurales y destaca que la concentración o grado de impregnación es variable debido a cambios en la porosidad. Los cálculos de reservas efectuados en los dos sectores analizados indican volúmenes de 1’296.000 m³.

⁹² GROSSE, E. (1928). Informe sobre los asfaltos en la parte central del departamento de Boyacá, 21 h. Compilación de estudios geológicos oficiales Colombia. A. 1935. Tomo III. p.7-29

⁹³ SARMIENTO A, A., (1951). Comisión a la mina de asfalto “La Emilia” en Pesca Boyacá. Informe No. 760 Ministerios de Fomento – Sección Quinta Servicio Geológico

Lizarazo y Reyes⁹⁴, realizaron una evaluación geológica de las areniscas asfálticas terciarias en los municipios de Pesca, Beteitiva, Tasco y Tópaga en el departamento de Boyacá, con miras a su explotación y beneficio minero. Además de indicar a las formaciones Socha Inferior y Picacho como las formaciones almacenadoras de este recurso en el municipio de Beteitiva y las formaciones Socha Superior y Concentración en el municipio de Pesca, el estudio estuvo enfocado a levantamiento de secciones estratigráficas.

Carson Helicopters, Inc.,⁹⁵ realizaron el levantamiento Aerogravimétrico y Aeromagnético sobre una porción de la Cordillera Oriental de Colombia (Sector Soapaga, Pie de Monte y Llanos Orientales) y donde la interpretación se centró en la definición del tope estructural del basamento PreCretácico con el objetivo de definir altos estructurales que pudiesen entrapar hidrocarburos en las facies arenosas; así como localizar la profundidad y extensión de las anomalías residuales y obtener información con respecto a la geometría de las estructuras presentes. Finalmente, obtuvieron como resultado un mapa de interpretación estructural donde señalan los principales altos, bajos y lineamientos entre otros elementos geológicos de interés en la exploración de hidrocarburos.

Rodríguez⁹⁶ analizó la correlación espectral de anomalías de gravimetría y magnetometría para modelar contraste de densidad y susceptibilidad magnética asociadas a la presencia de discontinuidades estructurales aplicado a la Falla de Soapaga y su incidencia en el control del espesor de sedimentos y profundidad del basamento cristalino. La metodología de análisis incluyó la aplicación de procesos

⁹⁴ LIZARAZO, N. G. y REYES, O. V (1998), Evaluación Geológica de las areniscas asfálticas terciarias en los municipios de Pesca, Beteitiva, Tasco y Topaga en el departamento de Boyacá. Escuela de Geología. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander

⁹⁵ CARSON HELICOPTERS, INC. (2009). Levantamiento aerogravimétrico y aeromagnético en la Cordillera Oriental Sector de Soapaga y el Piedemonte de La Cordillera Oriental - Llanos Orientales, Colombia. Informe Final de interpretación para la ANH, Contrato N° 035

⁹⁶ RODRIGUEZ, D.M. (2009). Modelo de la falla de Soapaga a partir de correlación espectral de campos potenciales. Tesis de maestría en Ciencias - Geofísica. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

de correlación espectral de anomalías de gravimetría y magnetometría, procesos de normalización, índices de favorabilidad y teorema de *Poisson*. A partir de los resultados obtenidos se realizó la validación de los modelos geofísicos mediante la integración con datos geológicos y otros métodos geofísicos.

Fonseca-Benítez,⁹⁷ empleó los métodos de radiometría, perfiles eléctricos y sondeo eléctrico vertical para generar un modelo geológico, geofísico y un análisis geo estadístico con el fin de caracterizar las litologías de las formaciones presentes en los sectores de Gámeza, Corrales, Chinivita y Macanal, departamento de Boyacá.

Arguello⁹⁸, caracterizó mediante geofísica y petrografía la manifestación mineral de hierro en la Vereda San Antonio, Municipio de Firavitoba, Boyacá aplicando magnetometría, sondeo eléctrico vertical y cuerpo cargado con el objetivo de definir el sector más apropiado para iniciar minería a gran escala. Como resultados se obtuvo un mapa de anomalías magnéticas, un perfil geológico-geofísico y un mapa de isohomas permitiéndoles definir la continuidad y profundidad del techo del mineral de interés, apropiado para la explotación sin realizar perforaciones previas.

3.2.2 Prospección geofísica internacional relacionada con arenas bituminosas. A continuación se citan los estudios realizados en otros países donde se han aplicado métodos geofísicos para identificar zonas de acumulación de arenas bituminosas.

⁹⁷ FONSECA-BENÍTEZ, F. (2012): Modelación geológico-geofísica y análisis geoestadístico de datos en sectores de Boyacá, Colombia. GEOLOGÍA COLOMBIANA. Edición X Semana Técnica de Geología e Ingeniería Geológica. 37 (1), 27. Bogotá, Colombia

⁹⁸ ARGUELLO, G. R. (2012). Caracterización geofísica y petrográfica de la manifestación mineral de hierro en la Vereda San Antonio Municipio de Fivaravitoba, Boyacá. GEOLOGÍA COLOMBIANA. Edición X Semana Técnica de Geología e Ingeniería Geológica. 37 (1),41-43. Bogotá, Colombia

Cristall⁹⁹ realizó un estudio de inversión de datos de sondeos transitorios electromagnéticos (TEM) en Saskatchewan-Canadá para interpretar la profundidad del tope de la formación de interés, espesor y calidad relativa de las arenas petrolíferas a poca profundidad (~ 200m).

McConnell y Glenn¹⁰⁰ ejecutaron sondeos aéreos TEM en Athabasca para definir la ubicación de acuíferos, determinar el tope de las arenas bituminosas, extensión lateral y espesor del shale que actúa como sello del yacimiento, y es muy importante en la evaluación del método de producción conocido con el nombre de *Steam Assisted Gravity (SAGD)*. Adicionalmente, presenta valores de resistividad suministrados por *Associated Geosciences Ltd.* entre 70 y 200 Ω m para arenas bituminosas pobres en bitumen, mientras las zonas con mayor impregnación presentan valores entre 110 y 1800 Ω m. Estos valores corresponden a dos unidades identificadas dentro de la Formación McMurray en Athabasca, Canadá.

Odunaike¹⁰¹ usaron métodos de resistividad eléctrica (SEV - TRE) y magnéticos en la exploración de arenas bituminosas en Ijebu-Imushin, estado de Ogun, SW de Nigeria. Los resultados presentan valores de resistividades para las arenas bituminosas entre 200 y 890 Ω m.

Bauman y Hansen¹⁰² en Calgary, usaron la técnica de tomografía de resistividad eléctrica para delimitar cuerpos de asfalto, canales, espesor de sobrecarga, continuidad de arcilla o capas de shale, delimitación de acuíferos y control espacial de los frentes de vapor en proyectos de desarrollo; así mismo, algunas compañías han aplicado la técnica para evaluar el potencial de arenas bituminosas y diseñar campañas de exploración mediante perforación.

⁹⁹ CRISTALL, FARQUHARSON, OLDENBURG Op. Cit.

¹⁰⁰ McCONNELL, y GLENN, Op. Cit.

¹⁰¹ ODUNAIKE, IJEOMA, EDIGBE, BABATOPE Op. Cit.

¹⁰² BAUMAN, P. y HANSEN, B., (2010). Routine Geoelectric Exploration for Shallow Gas and Oil Sands Using Electrical Resistivity Tomography (ERT). AAPG International Convention and Exhibition, September 12-15, 2010 Calgary, Alberta, Canada

Odunaike¹⁰³, Aplicaron sondeos eléctricos verticales en Idiopopo, Okitipupa en el estado de Ondo al suroeste de Nigeria, donde adquirieron 11 SEV a lo largo de 3 perfiles y como resultado obtuvieron de 4 a 5 capas geoelectricas identificando en una de ellas la presencia de asfalto con un valor de resistividad de 165 Ωm ; también señalan que resistividades menores a 750 Ωm obtenidas en otros SEV pueden ser posibles indicadores de hallar bitumen a lo largo del perfil a diferentes profundidades y concentraciones.

Smith¹⁰⁴ empleando sondeos transitorios electromagnéticos logro identificar una formación conductiva superpuesta a la Formación McMurray que presenta arenas bituminosas así como un acuífero en un área al norte de Fort McMurray en Alberta. El autor también menciona que las técnicas electromagnéticas aéreas han sido usadas para estudios ambientales relacionados a la explotación de este tipo de yacimientos.

Cox¹⁰⁵, presentan un caso de estudio aplicando sondeos transitorios electromagnéticos aéreos aplicados a la exploración de arenas bituminosas cerca de Fort McMurray (Alberta) empleando inversión 3D. El modelo obtenido fue capaz de resolver con mejor resolución los paleocanales que los métodos 1D, lo cual permite planear con mejor precisión la actividad de explotación minera. El documento indica valores de resistividad para las arenas bituminosas contenidas en la Formación McMurray entre 100 y 1000 Ωm con un espesor entre 50 y 100m.

¹⁰³ ODUNAIKE, R.K., Ijeoma G.C., Edigbe R. O., Babatope A. H. (2009). Oil sands exploration in Ijebu-Imushin using magnetic and electrical resistivity methods. 11th SAGA Biennial Technical Meeting and Exhibition Swaziland, 16-18 September. Pages 247-252

¹⁰⁴ SMITH, R., (2010). Airborne electromagnetic methods: applications to minerals, water and hydrocarbon Eexploration - CSEG Distinguished lecture tour

¹⁰⁵ COX, L.H., WILSON, G.A., AND ZHDANOV, M.S., RUDD J., WILSON, J. (2012). Large-scale 3D inversion of helicopter electromagnetic surveys for oil sands exploration near Fort McMurray, Alberta. Geoconvention 2012 (Vision). Calgary TELUS Convention Centre & ERCB Core Research Centre, Calgary, AB, Canada, 14-18 May 2012

Amigun¹⁰⁶ integraron la información adquirida con los métodos magnéticos y geoelectricos (SEV) para llevar a cabo la exploración de arenas bituminosas en Agbabu al SW de Nigeria. Las curvas de resistividad obtenidas revelaron hasta un máximo de cinco capas geoelectricas. La inversión de los parámetros geoelectricas tanto de la SEV y las tomografías indican la posible presencia de arenas bituminosas con valores de resistividad que oscilan entre 122 y 530 Ω m y espesores que varía entre 22 y 73 m.

Adeyemi¹⁰⁷, desarrollaron un estudio detallado al suroeste de Okitipupa (Nigeria) integrando información de sondeos eléctricos verticales con estudios sedimentológicos detallados de muestras de núcleo. Las correlaciones entre las secciones geoelectricas y los análisis de pozo revelo que la profundidad del horizonte de arenas bituminosas varió desde 0,5 hasta 50,0 m. El nivel freático esta entre 13 y 15 metros aproximadamente medidos en los pozos excavados donde se producen sobre el horizonte de arena bituminosas. Por medio de la geoelectrica se identificó una capa con contenido de arenas bituminosas con un rango de resistividades entre 0 y 250 Ω m

Akinmosin¹⁰⁸, realizaron un estudio en Ijebu-Itele al este de la cuenca Dahomey, suroeste de Nigeria, donde aplicaron SEV, TRE y perforación de 5 pozos con una profundidad que vario entre 45 y 109 metros. Los resultados obtenidos a partir de la correlación entre la información obtenida de los pozos con la información geoelectrica revelan un rango de resistividades entre 900-1084 Ω m para las arenas bituminosas.

¹⁰⁶ AMIGUN J.O., ADELUSI A.O., AKO B. D. (2012). The application of integrated geophysical methods in oil sand exploration in Agbabu área of southwestern. International research journal of geology and mining (IRJGM). 2276-6618 Vol. 2 (9), pp. 243-253

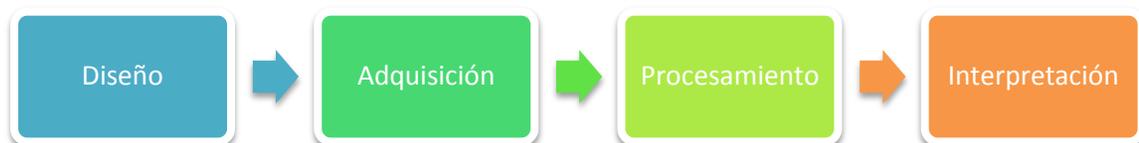
¹⁰⁷ ADEYEMI, AKINMOSIN, ALADESANMI, BADMUS. Op. Cit.

¹⁰⁸ AKINMOSIN, OMOSANYA, IKHANE, MOSURO Op. Cit.

4. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Se llevó a cabo la descripción litológica de los afloramientos expuestos en la zona y SEV paramétrico que permitieran correlacionar la información litológica con los datos geoelectrónicos. Adicionalmente, la etapa netamente geofísica se desarrolló en cuatro fases como se indica en la **Figura 11**.

Figura 11. Flujo de trabajo para el desarrollo de la investigación.



4.1 DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA Y SEV PARAMÉTRICO

Debido a las condiciones del área no fue posible ubicar una sección geológica que permitiera levantar la descripción de una columna estratigráfica junto con el SEV paramétrico teniendo en cuenta que los afloramientos de las minas habían sido intervenidos por la actividad minera.

En los afloramientos correspondientes a las minas La Emilia y Santa Teresa las condiciones se observan en las **Figura 12** y **Figura 13** donde se evidencia la imposibilidad de llevar a cabo el levantamiento de la columna estratigráfica; adicionalmente en estas minas las condiciones del terreno en la parte superior de los afloramientos no facilitaron la adquisición de ningún sondeo paramétrico. Sin embargo, en la mina La Emilia se pudo realizar un análisis y descripción de las

rocas para tenerlas presentes en la etapa de interpretación (Figura 14 y Figura 15).

Figura 2. Panorámica de la mina Santa Teresa donde se observa el afloramiento cubierto por material derrumbado y tajo adyacente a la zona de operación minera que se mantiene lleno de agua probablemente por flujo vertical de agua subterránea.



Figura 3. Panorámica de la Mina La Emilia. En la imagen se señala la parte superior del afloramiento como zona de riesgo debido al peligro que representaba ubicar el equipo en cualquier punto dentro de esta línea.



MINA LA EMILIA

Dentro de las características generales del afloramiento en la mina La Emilia (Figura 4), se observa que la zona de interés (arenas bituminosas), corresponden a unas arenas de grano medio, sin cemento, con cuarzos subredondeados y friables que actúan como roca reservorio, la capa suprayacente corresponde a una capa de arcillolitas tipo caolín considerada como la roca sello. Las capas presentan una orientación N25E/ 15NW. Así mismo, se puede observar un cuerpo de agua que fluye naturalmente hacia la superficie debido a los trabajos de minería realizados en la zona, donde además se encuentra hidrocarburo flotando sobre ella (Figura 5).

Figura 4. Detalle del contacto entre la roca reservorio (arenas bituminosas) y la roca sello (arcillolitas).



Figura 5. Secuencia de base a tope conformada por arenas bituminosas (alta a baja impregnación de color negro a café), seguida por arcillolitas color verde y areniscas limosas amarillentas.



Finalmente, en la segunda campaña de campo llevada a cabo en el mes de Agosto de 2014, el municipio acababa de reabrir la mina a cielo abierto que se encuentra ubicada a 200 metros aproximadamente de la mina Santa Teresa, donde se pudo adquirir un SEV y hacer una descripción litológica de las unidades observadas en el afloramiento para emplearlo como sondeo paramétrico (**Figura 16**). Adicionalmente se localizaron dos puntos con manifestación de arenas bituminosas. El primer punto se encuentra en cercanías al SEV Hb, donde se

ubicó una mina que en adelante denominaremos “Don Marcos”, esta área se encuentra en etapa de exploración y ya se reportó el recurso de interés en una de las 4 bocaminas abiertas. El segundo punto, se encuentra en medio de los SEV Bb y Bc, llamándolo Afloramiento “C”. Los hallazgos se presentan a continuación.

AFLORAMIENTO MINA SANTA TERESA

Este afloramiento se encuentra localizado en las coordenadas N:1.106.783 / E:1.113.312 a una altura de 2647 msnm. El afloramiento fue separado en 4 capas como se indica en la **Figura 16** y el detalle de las litologías encontradas se presenta en la **Figura 17**. De esta forma, la zona I corresponde a una capa de derrumbe compuesta por areniscas limosas y arcillolitas, la zona II está compuesta por areniscas de grano medio con cemento lodoso, color gris verdosa y superficialmente se observa rojiza producto de la oxidación. La zona III representa areniscas de grano medio a fino (gradación normal) color café producto de la impregnación de hidrocarburo muy biodegradado con intercalaciones de capas muy delgadas a delgadas de arcillolita; en la zona IV se observa de base a tope una arenisca conglomerática con matriz de arena media a gruesa, sin cemento, mal seleccionada, con porosidad e impregnación visual muy buena, seguida por arenas de grano medio a grueso, sin cemento, friables, con impregnación de crudo y porosidad visual muy buenas; las capas presentan una orientación N22E / 25 NW.

Figura 6. Afloramiento de la mina a cielo abierto propiedad del municipio de Pesca, adjunta a la mina Santa Teresa y localización del SEV paramétrico denominado ST2.

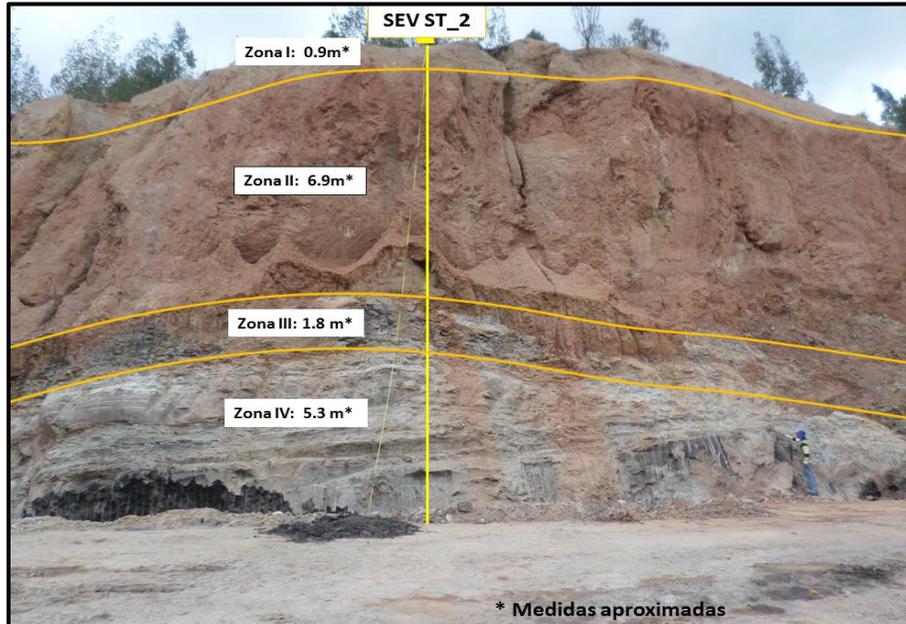
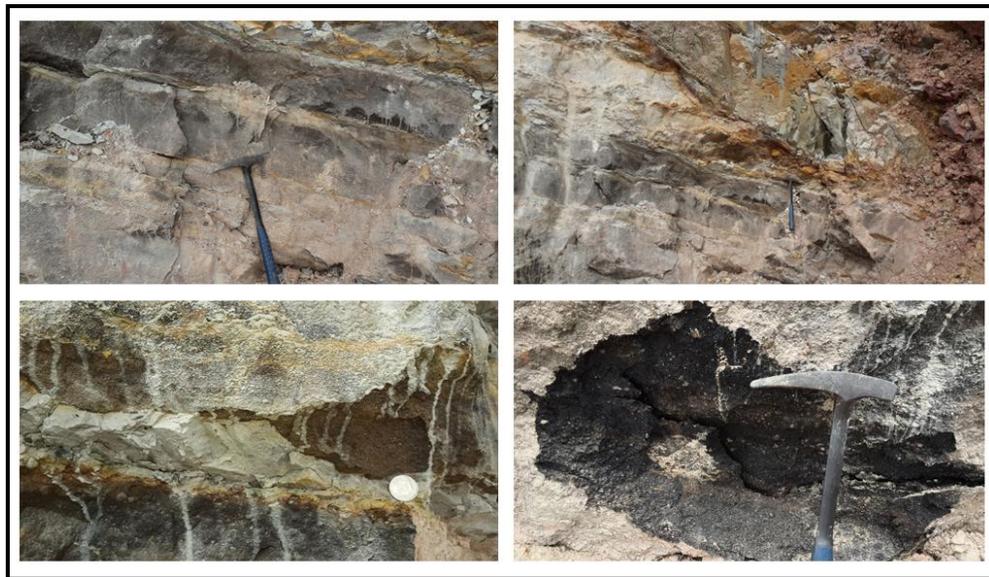


Figura 7. Detalle de las capas encontradas en el afloramiento ST 2. El grado de impregnación varía de mayor a menor de base a tope respectivamente.



Entre tanto, la respuesta eléctrica del SEV paramétrico se presentara en el capítulo relacionado con el procesamiento de los sondeos para no generar incertidumbre.

MINA DON MARCOS

Esta mina se localiza en las coordenadas N: 1.108.450 / E: 1.117.254 a una altura de 2824 msnm (**Figura 18**). Allí se encontró a 8 metros de profundidad, una capa de arenas bituminosas compuestas de arenas de grano medio, friables, sin cemento, con porosidad e impregnación visual muy buena donde se tomó una muestra para análisis petrofísicos; la capa suprayacente está compuesta de arena color blanco a amarillo claro, friable, con impregnación incipiente. Esta mina se encuentra inundada.

En otra bocamina (**Figura 19**) con coordenadas N: 1108402 / E: 1117166 a altura de 2820 msnm se realizó un túnel sin inclinación, donde se capas, una capa de areniscas de grano medio, friables color amarillo-claro contacto con una capa de arcillolitas color gris claro como se observa en la (

Figura). En este túnel se evidencia la constante filtración de agua en la zona y las capas presentan una orientación que varía de N20E/15NW a N10E / 25NW. Esta mina fue abandonada y los trabajos exploratorios continúan.

Figura 18. Mina “Don Marcos” y muestra de arena bituminosa compuesta de arena grano medio friables con porosidad en impregnación visual muy buena.



Figura 19. Bocamina abierta horizontalmente sobre el terreno donde se observan dos capas, una capa de areniscas de grano medio, friables color amarillo-claro en contacto con una capa de arcillolitas color gris claro.



AFLORAMIENTO “C”

El afloramiento se encuentra localizado en las coordenadas N: 11008823 / E: 1116334 a una altura de 2589 msnm, de acuerdo a la plancha 191 del servicio geológico la unidad corresponde a la Formación Concentración. Allí se identificó de base a tope, una capa de arcillolitas, seguida por una capa de areniscas de grano grueso a medio (secuencia granodecreciente) con gránulos y guijos de cuarzo blancos subredondeados, moderada porosidad e impregnación visual; intercaladas con capas delgadas de arcillolitas; la siguiente capa, la constituye una capa muy gruesa de arena fina, friable, sin cemento, con alta porosidad e impregnación visual de bitumen. La capa superior la conforma un conglomerado de guijos subredondeados a subangulares con matriz de arenas media de granos subredondeados, fragmentos lodosos y moderada impregnación (**Figura**).

Figura 20. Afloramiento con secuencia de arcillolitas color gris claro y capas de arenas bituminosas con alta impregnación visual. Las capas presentan una orientación N65E/37 NW.



En la **Figura 20** se observa el afloramiento y el detalle de una de las capas con alta impregnación. Las condiciones del terreno en la parte superior del afloramiento no permitieron llevar a cabo la adquisición de ningún sondeo, considerando que la apertura máxima que podía realizarse era de $AB/2$ igual 10 metros y por lo tanto la profundidad de alcance iba a hacer insuficiente para analizar la respuesta de las arenas bituminosas.

Finalmente, de acuerdo a las observaciones y descripciones realizadas en las áreas mencionadas anteriormente, la roca reservorio está constituida por arenas de grano medio y grueso sin cemento, impregnadas de asfalto. En la capa superficial el material es duro y el bitumen está oxidado (menor impregnación), pero a medida que se profundiza se hace más blando, facilitando su extracción. Lo cual evidencia que el grado de impregnación aumenta con la profundidad.

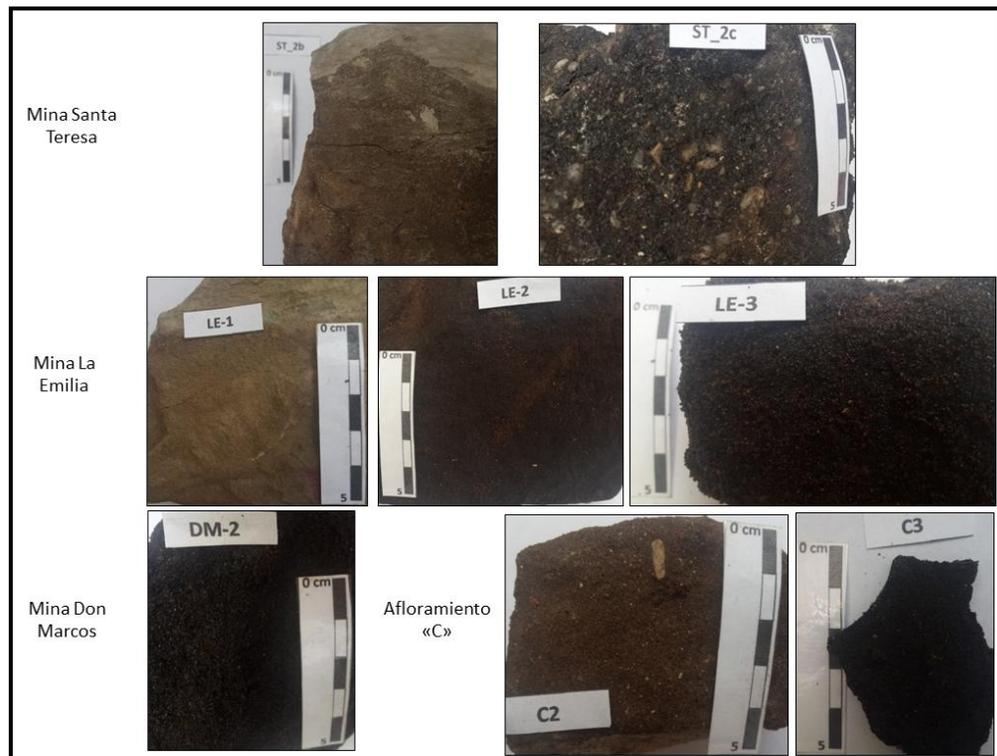
Las cuatro zonas con arenas bituminosas (minas La Emilia, Santa Teresa, Don Marco y el afloramiento "C") presentan características similares:

- La roca reservorio está compuesta de arenas con buena selección, porosidad e impregnación visual muy buena, sin cemento, friables. Así como algunos niveles conglomeráticos también impregnados, con mala selección y friables.
- Las capas de arenas bituminosas presentan como roca sello, lodolitas y/o arcillolitas que en algunos casos es caolín.
- Considerando la presencia de agua en las tres minas, se infiere que existe conexión lateral de los yacimientos con la superficie.

4.2 PRUEBAS DE LABORATORIO

Con el objetivo de obtener parámetros petrofísicos que permitiera comparar el yacimiento de la zona de estudio con los yacimientos a nivel mundial, se llevaron a cabo pruebas de petrofísica básica (saturación de agua, saturación de aceite, porosidad y permeabilidad) en el laboratorio de Especial del Instituto Colombiano del petróleo a las muestras tomadas en las minas La Emilia, Don Marcos, Santa Teresa y Afloramiento “C”. Las muestras tomadas en campo se presentan en la **Figura 21**.

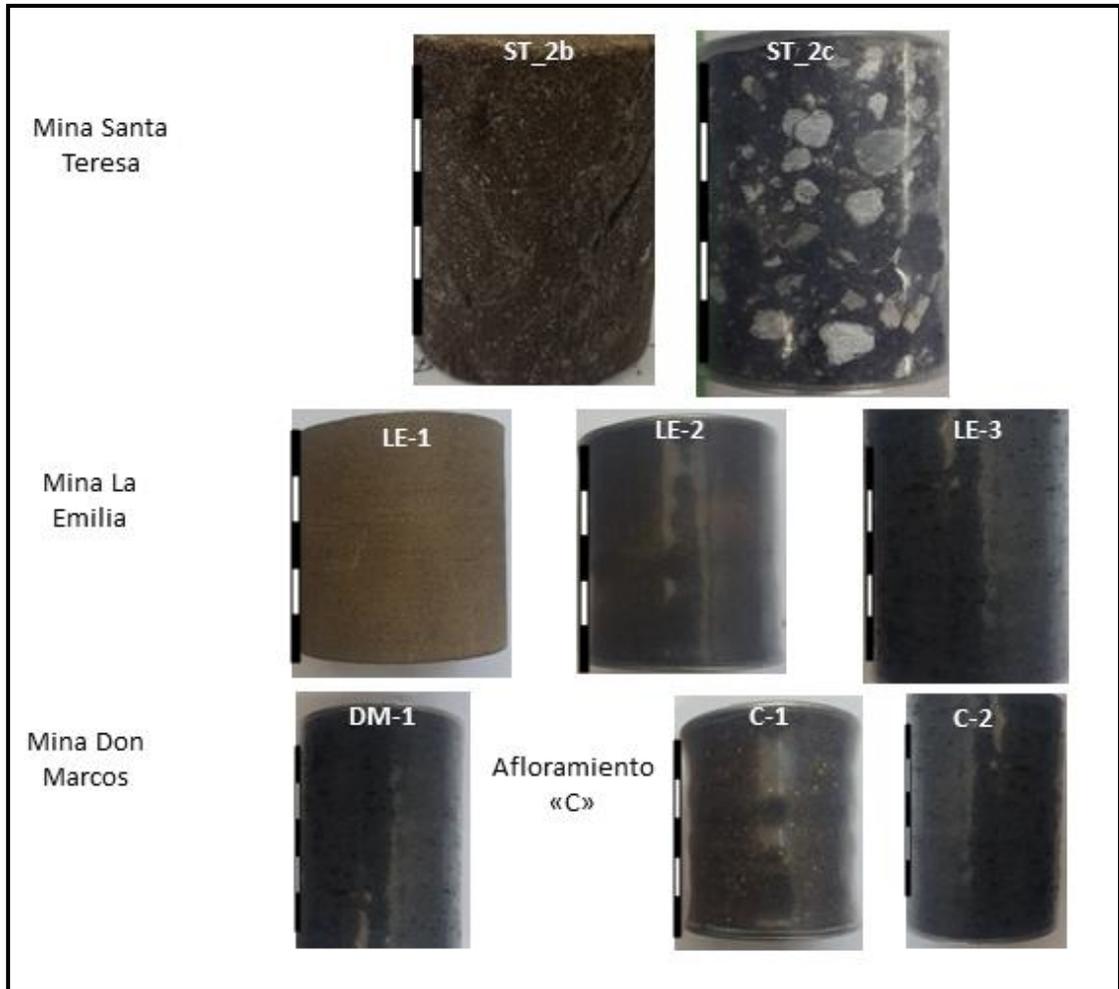
Figura 21. Imágenes de las muestras tomadas en campo en las minas Santa Teresa, La Emilia, Don Marcos y el afloramiento “C”. Nótese la variación de impregnación y los cambios granulométricos en las muestras.



4.2.1 Metodología

- **Procedimiento para el corte de muestras:** Las muestras se congelaron utilizando hielo seco. Posteriormente se realizó el corte del *plug* con una broca de 1.5 pulgadas de diámetro interno con insertos de diamante utilizando nitrógeno líquido como fluido de refrigeración; una vez cortado el *plug* este es colocado en una cortadora de cuchillas fijas, en la cual se perfilaron sus caras para obtener un cilindro regular perfecto, de acuerdo a lo recomendado por la norma API RP 40 de 1998. Debido al carácter inconsolidado de la roca, es necesario proteger la muestra para evitar la desintegración de su estructura por la pérdida de granos durante la manipulación en las diferentes pruebas a las que va a ser sometido. Esta protección consiste en la colocación o inserción del *plug* en una manga de teflón termoencogible y en sus caras fue protegido con un juego de mallas metálicas mesh 125 y mesh 320 (**Figura 22**).

Figura 22. Plugs de las muestras procesadas donde se observa variación de impregnación y granulometría; así mismo todas las muestras están protegidas con la manga de teflón termoencogible y mallas metálicas excepto las muestras ST_2b y LE_1. La escala representa 5 cm en total con subdivisiones cada centímetro.



- **Procedimiento técnico de saturación de fluidos método *Dean Stark*:** La saturación de fluidos se realizó por el método *Dean Stark* el cual mide directamente el volumen de agua de la muestra por extracción-destilación con un solvente orgánico (Tolueno), cuando se completa el proceso de destilación

se registra el volumen de agua (V_w). Con el volumen de agua y la densidad del agua (1 g/cm^3) se obtiene la masa; posteriormente se calcula la masa del aceite (W_O) en forma indirecta por la diferencia de peso entre la muestra saturada (W_S) y la muestra seca (W_D), restando el peso del agua recuperada (W_W) obtenido por el método gravimétrico, la **Ecuación 4** indica la operación a realizar.

$$W_O = W_S - W_D - W_W \quad (4)$$

Seguido se calcula el porcentaje de agua y de aceite en la muestra neta saturada (W_{NS}), según la **Ecuación 5**.

$$\% \text{ de agua} = \frac{W_W}{W_{NS}} ; \quad \% \text{ de aceite} = \frac{W_O}{W_{NS}} \quad (5)$$

- **Procedimiento técnico de limpieza de muestras:** La limpieza de muestras se realizó en el equipo tipo *Soxhlet*, primero con Tolueno tipo industrial con el fin de dejar el medio poroso libre de crudo. Luego la muestra se sometió a limpieza con mezcla Tolueno-Metanol 50/50, para eliminar las sales solubles del espacio poroso. Después de hacer un control de calidad para verificar que las muestras quedaran limpias y libres de fluidos, fueron secadas en un horno de humedad relativa controlada a temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ y 40% de humedad.

Durante este proceso las muestras fueron pesadas hasta lograr peso constante lo cual indica que la muestra queda totalmente seca y su medio poroso está libre de los solventes utilizados durante el proceso de limpieza. Este estado permite realizar con confiabilidad los ensayos de porosidad y permeabilidad.

- **Procedimiento técnico de ensayo para determinación de densidad de granos en muestras *plug*:** Para determinar el volumen de granos (V_g) se utilizó el equipo Porosímetro convencional Vinci, este equipo utiliza gas helio, y aplica la ley de Boyle para medir el volumen sólido de la muestra. La densidad de granos se calcula con base en el volumen de granos obtenido en el porosímetro Vinci, y el peso de la muestra medido en una balanza analítica (W_t). Para hallar este parámetro se emplea la **Ecuación 6**.

$$\text{Densidad de granos g/cm}^3 = \frac{W_t}{V_g} \quad (6)$$

- **Procedimiento técnico de ensayo para determinación de porosidad a presión de confinamiento en muestras *plug*:** Para el cálculo de la porosidad en el equipo Porosímetro convencional Vinci se mide el volumen poroso (V_p) de la muestra a presión de confinamiento y el volumen de grano (V_g), **Ecuación 7**.

$$\text{Porosidad a presión de confinamiento \%} = \frac{V_p}{V_p + V_g} \times 100 \quad (7)$$

- **Procedimiento técnico de ensayo para determinación permeabilidad estado estable:** El permeámetro convencional de estado estable permite medir la permeabilidad al gas usando un flujo continuo de nitrógeno gaseoso a través del espacio poroso hasta obtener condiciones estables de caudal y presión. La permeabilidad Klinkenberg se obtiene realizando 4 o 5 mediciones de permeabilidad al gas variando la presión media de flujo (P_m), una regresión lineal de K_g vs $1/P_m$ permite calcular la permeabilidad klinkenberg y el factor de deslizamiento del gas.

4.2.2 Resultados analíticos. A partir de la etapa analítica se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla . En el caso de la porosidad y permeabilidad, los valores se obtuvieron para dos presiones de confinamiento, el primer valor corresponde a 400 psi y el segundo a 800 psi; se evidencia que la porosidad no varía significativamente al duplicar la presión de confinamiento, sin embargo en la permeabilidad se observa una notoria disminución debido probablemente a que los poros pierden conectividad por la compresión ejercida, lo cual afecta inmediatamente esta propiedad.

A partir de estos resultados y el análisis geológico del área se elaboró la misma tabla presentada en el capítulo de antecedentes para yacimientos de arenas bituminosas de 6 países pero con los datos Colombianos. En la **Tabla 3** se pueden observar las características de las arenas bituminosas del municipio de Pesca.

Tabla 2. Resultados de parámetros petrofísicos

Sitio	ID Muestra	Saturación de aceite por peso (%)	Saturación de agua por peso (%)	Densidad de Granos (g/cm ³)	Porosidad (%)	Permeabilidad (mD)
Mina Santa Teresa	ST-2b	3.26	0.79	2.64	24.4 - 24.2	1160 - 851
	ST-2c	4.13	1.08	2.64	17.5 - 17.1	856 - 654
Mina La Emilia	LE-1	2.87	0.67	2.66	20.2 - 20.1	89 - 41
	LE-2	5.4	4.72	2.64	26.8 - 26.3	1094 - 605
	LE-3	5.69	2.73	2.64	27.1 - 26.9	6542 - 5002
Mina Don Marcos	DM-2	7.59	2.03	2.65	29.1 - 28.9	10751 - 9716
Afloramiento "C"	C-2	2.27	0.18	2.64	26.2 - 27.4	4389 - 3575
	C-3	8.36	1.39	2.93	25.6 - 25.2	301 - 281

Tabla 1. Características geológicas y petrofísicas de las arenas bituminosas del municipio de Pesca.

COLOMBIA	
	
CUENCA	Cordillera Oriental (Sector Sogamoso)
TIPO DE CUENCA	<i>Foreland</i>
FM. RESERVORIO	Formación Picacho y Concentración
EDAD FM. RESERVORIO	Terciario (Eoceno - Oligoceno)
AMBIENTE DE DEPOSITACIÓN	Fluvial y lagunar continental a marino
REGIMEN TECTÓNICO	Compresivo
PROFUNDIDAD (Metros)	30 - 100
ESPESOR PROM. (Metros)	6 - 25
POROSIDAD (%)	17 - 30
PERMEABILIDAD (mD)	281 - 10751
GRAVEDAD API*	<12

De la información obtenida se puede observar que el yacimiento presenta características similares a los depósitos de arenas bituminosas en el mundo. Entre los aspectos geológicos comparte correlación con Canadá, Venezuela, EEUU y China en cuanto al tipo de cuenca. Con respecto a la edad de depositación de la roca reservorio se correlaciona con Venezuela y EEUU, en relación con el espesor promedio de interés se relaciona con Venezuela, China y Nigeria. En cuanto a las propiedades petrofísicas, todas las cuencas presentan porosidades entre 16 y 35%, mientras la permeabilidad para las cuencas analizadas en Rusia, EEUU,

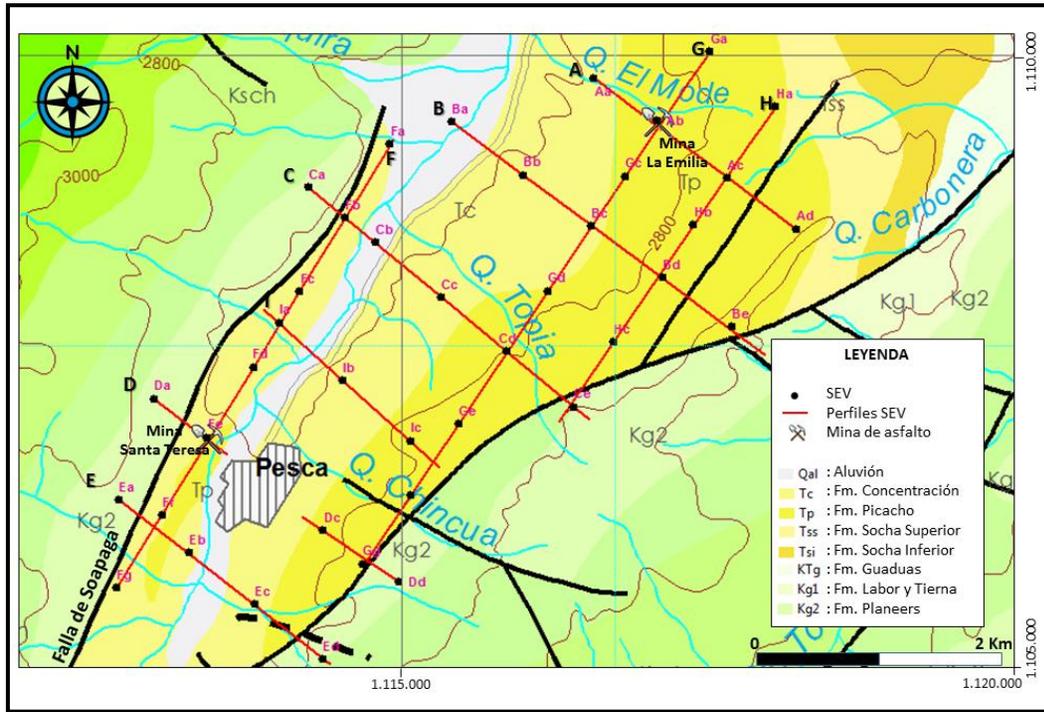
China y Nigeria varía entre 100 y 1200 mD, para Canadá y Venezuela varía entre 500-5000 mD y 2000-15000mD respectivamente; por lo tanto los datos permiten una mejor correlación con estos dos últimos países.

Se infiere que los yacimientos de arenas bituminosas del municipio de Pesca presentan mejor correlación con Venezuela y en algunos casos con Canadá.

4.3 ETAPA GEOFÍSICA - SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

4.3.1 Diseño. Para abarcar el área de estudio asignada (25 Km²), y definir las características eléctricas del subsuelo se plantearon 9 perfiles (6 perfiles perpendiculares y 3 paralelos a la Falla de Soapaga) con el fin de tener una aproximación del buzamiento y/o geometría de las capas así como el rumbo de la estructura respectivamente. La distancia entre cada sondeo es de 700 metros aproximadamente, para un total de 40 SEV (Figura).

Figura 23. Distribución de los perfiles y SEV en el área de estudio.



Fuente: Basado en la Plancha geológica 191 del SGC (Renzoni, et. al., 1998)

De acuerdo a las diferencias mencionadas en el capítulo 2 entre los tipos de dispositivos para llevar a cabo la adquisición de SEV, se seleccionó el arreglo tipo Schlumberger.

La apertura total de AB se definió en 600 metros, con el objetivo de tener una profundidad de investigación de 200 metros aproximadamente, considerando que los yacimientos de arenas bituminosas (Minas La Emilia y Santa Teresa) reportan el tope de la primer capa de interés entre los 20 y 30 metros de profundidad y la base de la zona de interés entre 80 y 100 metros.

En campo se trabajó con distancias predeterminadas entre los electrodos, utilizando la siguiente separación en metros de electrodos de corriente (AB/2): 1.5, 2.5, 4.0, 6.0, 8.0, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 125, 150, 175, 200,

250 y 300; por lo tanto se llevó calculado el coeficiente geométrico (K) del dispositivo con el fin de optimizar el tiempo durante la adquisición.

El formato empleado se presenta en la **Figura 24**. Donde ya están preestablecidos los datos de AB/2, MN/2 y K. En campo se registraron los datos de voltaje telúrico, corriente e intensidad medidos, a partir de los cuales se calculara la resistividad aparente (ρ_a). En el caso de las medidas tomadas con el equipo ABEM, se registró en la tabla el valor de resistividad aparente inmediatamente debido a que este equipo realiza el cálculo directamente.

Figura 24. Formato de campo.

SEV _____		Altura _____ (msnm)		Rumbo _____				
coordenadas		Norte	Este	Equipo:				
Centro								
-A								
-B				Fecha:	Hora:			
Observaciones:								
N°	AB/2 (m)	MN/2 (m)	K	Voltaje telurico	DC medido (mV)	DC final (mV)	I (mA)	ρ_a
1	1.5	0.5	6.28					
2	2.5	0.5	18.85					
3	4	0.5	49.48					
4	6	0.5	112.35					
5	8	0.5	200.28					
6	10	0.5	313.37					
7	12	0.5	451.6					
8	15	0.5	706.07					
9	20	0.5	1256					
10	25	0.5	1963					
11	30	0.5	2827					
12	30	10	125.66					
13	40	10	235.62					
14	50	10	376.99					
15	60	10	549.78					
16	75	10	867.86					
17	75	25	314.16					
18	100	25	589.05					
19	125	25	942.48					
20	150	25	1374					
21	150	50	628.32					
22	175	50	883.57					
23	200	50	1178					
24	250	50	1885					
25	300	50	2749					
Dibujo:								
Fotos:								

4.3.2 Adquisición. El proceso de adquisición inició con la ubicación de las coordenadas de cada SEV y se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos para garantizar la calidad de los datos:

- La Topografía debía ser lo más plana posible.
- Garantizar el espacio requerido hacia ambos lados para asegurar que la apertura (AB/2) planeada fuera la ejecutada en campo.
- Realizarla apertura en el mismo sentido de las curvas de nivel (excepto donde las condiciones del campo no lo permitieron).
- Las capas debían presentar un buzamiento menor a 30°.
- No debían haber tendidos eléctricos cerca o que se encontraran por encima de la zona donde se iba a realizar el sondeo.
- El suelo no debía estar saturado de agua.
- No posicionar la sección del sondeo sobre tuberías.

Una vez echas estas apreciaciones se procedió así:

- ***Ubicación de la unidad central y los cuatro carretes:***

La unidad central debe ir al frente de los carretes MN, equidistantes a estos se disponen los carretes que contienen los cables para los electrodos AB.

- ***Ubicación de los cuatro electrodos:*** se clavan los electrodos a una distancia ya fijada con cintas guías, verificando el buen contacto con el suelo, preferiblemente a una profundidad mínima de 6cm.
- ***Conexiones:*** Se procede a conectar las pinzas en los respectivos electrodos (M-N-A-B) procurando un buen contacto y verificando que en la unidad central las conexiones tengan la misma polaridad.
- ***Configuración de los medidores:*** Los medidores se emplean para registrar la intensidad de corriente que circula entre los electrodos A y B, así como para medir la diferencia de potencial entre los electrodos M y N. Estos se conectan directamente al panel frontal teniendo en cuenta la correspondencia entre los

colores y la polaridad. Se selecciona el tipo de arreglo y demás especificaciones para iniciar la corrida.

- **Energizar el equipo:** Se conecta la batería a la caja central por medio de los conectores y se le inyecta corriente al sistema empleado. Cabe recalcar la importancia de los elementos de protección ya que la diferencia de tensión empleada representa un riesgo eléctrico.
- **Captura de datos:** Luego de inyectar corriente al subsuelo a través de los electrodos A y B, se visualizan en el medidor izquierdo los valores de potencial entre los electrodos M y N y en el medidor derecho el valor de la corriente que circula por los electrodos A y B. para consignar los datos medidos se congelan los datos en pantalla, se registran y se continua la toma.

Los SEV fueron tomados con dos equipos de geoelectrica debidamente calibrados para garantizar la calidad de los datos y los cuales se describen brevemente a continuación:

EQUIPO 1 - ABEM TERRAMETER: Se utilizó un Terrámetro SAS 1000/4000 de la marca Sueca ABEM (**Figura 25**) propiedad de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. A continuación se presenta una lista de los componentes del Terrámetro:

- Batería de NiCd incorporada con un sistema de enganche
- Adaptador SAS-EBA para batería externa de 12 V
- 4 Electrodos de acero inoxidable o no polarizables
- Juegos de cable:
 - 2x750m de cable de corriente, $0,75 \text{ mm}^2$, en carrete
 - 2x250m de cable de potencial, $0,75 \text{ mm}^2$, en carrete
 - 2x2m de cable de conexión, rojo
 - 2x2m de cable de conexión, negro
 - 4 pinzas de cocodrilo

Figura 25. Terrámetro ABEM SAS 1000/4000 utilizado en campo para la adquisición de datos.

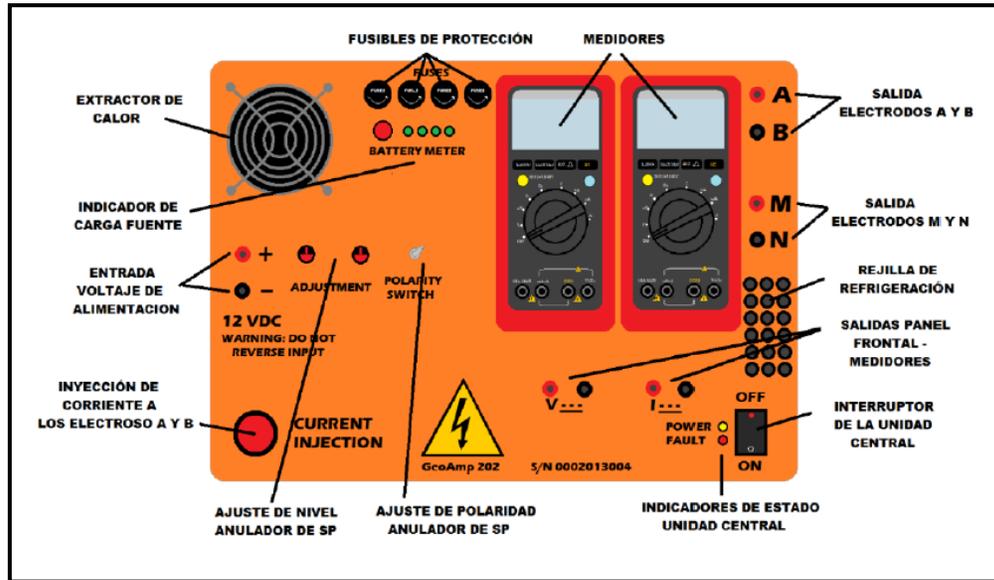


Fuente: Disponible en: <http://www.abem.se/resistivity/sas1000.htm>

EQUIPO 2 - GeoAmp202: El equipo GeoAmp202 (**Figura 26**) propiedad de la empresa SUBSUELO3D consta de las siguientes partes:

- 1 Unidad central.
- 2 Medidores para voltaje y corriente UNI-T Ref. UT61B.
- 4 Electrodo de acero inoxidable de 60 centímetros de longitud.
- 2 Carretes metálicos con 300 metros de cable Centelsa AWG 14 c/u.
- 2 Carretes metálicos con 100 metros de cable Centelsa AWG 14 c/u.
- 4 Soportes metálicos para carretes.
- 8 Conectores para el panel frontal.
- 2 Almádanas para fijar carretes y electrodos.

Figura 8. Panel Frontal de la unidad central GeoAmp 202.



Fuente: Manual de Operación del Equipo GEOAMP 202 (Giraldo, 2013).

Adicionalmente, cada equipo cuenta con una batería de alimentación de 12 voltios y una caja de herramientas que contenía los siguientes elementos:

- Mapa geológico y topográfico del área de estudio
- Formato de campo para la toma de datos
- 2 GPS Garmin
- 4 *Walkie talkie*
- Guantes industriales
- Cinta métrica
- Martillo

Finalmente, con los equipos y materiales mencionados se llevó a cabo la adquisición de los sondeos eléctricos verticales en el municipio de Pesca.

En la **Tabla 4** se presenta la identificación de cada SEV, formación sobre la que se llevó a cabo el sondeo según la plancha geológica 191 del SGC, equipo empleado, coordenadas, altura y apertura AB/2 en metros. Los datos medidos en campo correspondientes a cada SEV, se presenta en el **ANEXO A**.

Tabla 4. Ubicación de los SEV generales

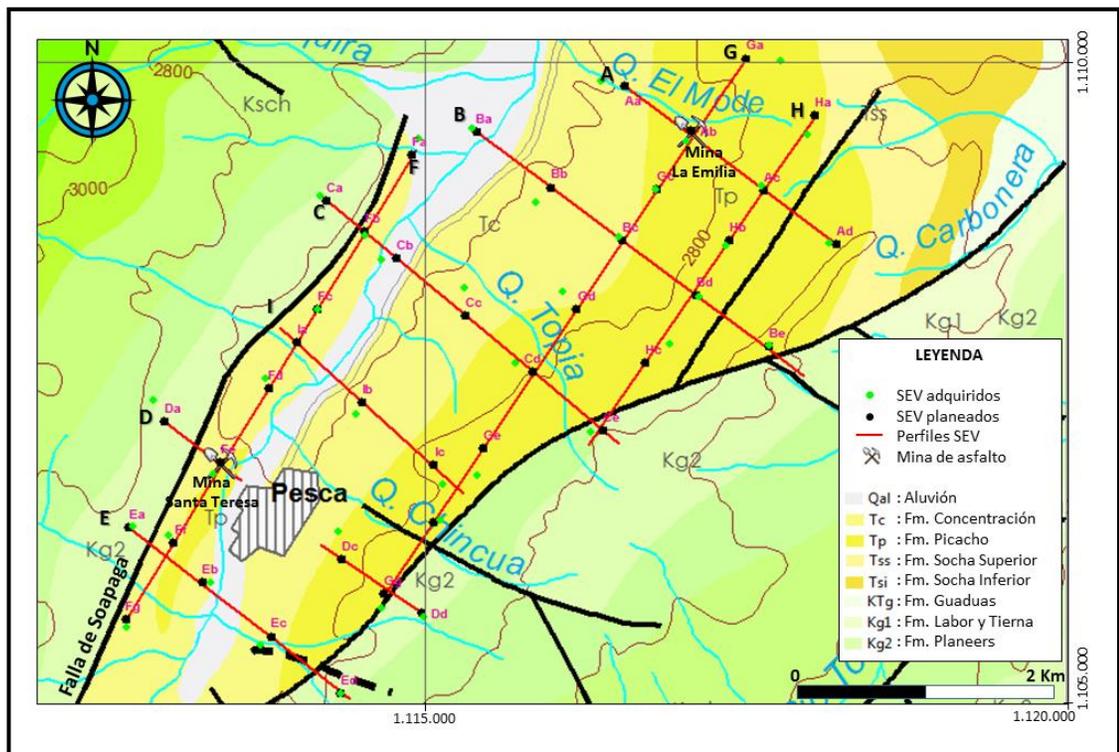
Perfil	SEV	Formación	Equipo	Norte	Este	Altura	AB/2
A	Aa	Concentración	GeoAmp 202	1109856	1116375	2626	250
	Ab	Picacho	GeoAmp 202	1109388	1117038	2751	300
	Ac	Picacho	GeoAmp 202	1109040	1117632	2903	300
	Ad	Picacho	GeoAmp 202	1108595	1118158	2985	300
B	Ba	Aluvi3n	GeoAmp 202	1109489	1115368	2587	300
	Bb	Concentraci3n	ABEM*	1108908	1115873	2650	300
	Bc	Concentraci3n	GeoAmp 202	1108645	1116511	2722	300
	Bd	Picacho	GeoAmp 202	1108171	1117140	2877	300
	Be	Picacho	ABEM*	1107793	1117687	2991	300
C	Ca	Planeers	GeoAmp 202	1108955	1114194	2721	300
	Cb	Aluvi3n	GeoAmp 202	1108459	1114662	2546	300
	Cc	Concentraci3n	ABEM*	1108239	1115316	2654	300
	Cd	Picacho	ABEM*	1107661	1115707	2782	300
	Ce	Conejo	GeoAmp 202	1107119	1116296	3016	300
D	Da	Conejo	GeoAmp 202	1107366	1112888	2784	300
	Db	Picacho	GeoAmp 202	1106796	1113356	2629	300
	Dc	Concentraci3n	ABEM*	1106343	1114329	2765	300
	Dd	Planeers	ABEM*	1105680	1114991	2933	300
E	Ea	Planeers	ABEM*	1106385	1112724	2746	300
	Eb	Concentraci3n	ABEM*	1105944	1113332	2725	300
	Ec	Concentraci3n	ABEM*	1105459	1113722	2722	300
	Ed	Planeers	ABEM*	1105077	1114351	2892	300
F	Fa	Aluvi3n	ABEM*	1109402	1114960	2559	300
	Fb	Concentraci3n	GeoAmp 202	1108654	1114533	2632	300
	Fc	Concentraci3n	GeoAmp 202	1108075	1114172	2633	300
	Fd	Concentraci3n	GeoAmp 202	1107536	1113762	2609	300
	Ff	Concentraci3n	ABEM*	1106312	1113011	2668	250
	Fg	Concentraci3n	ABEM*	1105598	1112677	2704	300
G	Ga	Picacho	GeoAmp 202	1110015	1117783	2985	300
	Gc	Picacho	GeoAmp 202	1109008	1116805	2754	300
	Gd	Concentraci3n	ABEM*	1108209	1116082	2753	300
	Ge	Picacho	GeoAmp 202	1106777	1115417	2879	300
	Gf	Picacho	GeoAmp 202	1106429	1115120	2844	300
	Gg	Planeers	ABEM*	1105747	1114662	2861	300
H	Ha	Picacho	GeoAmp 202	1109437	1117991	2965	300
	Hb	Picacho	GeoAmp 202	1108575	1117354	2862	300
	Hc	Picacho	GeoAmp 202	1107804	1116918	2986	300
I	Ib	Concentraci3n	ABEM*	1107261	1114468	2681	300
	Ic	Picacho	ABEM*	1106709	1115146	2840	300

*ABEM TERRAMETER SAS 4000-1000

Los perfiles A, B, C, D, E, I son perpendiculares a la Falla de Soapaga
Los perfiles F, G, H son paralelos a la Falla de Soapaga

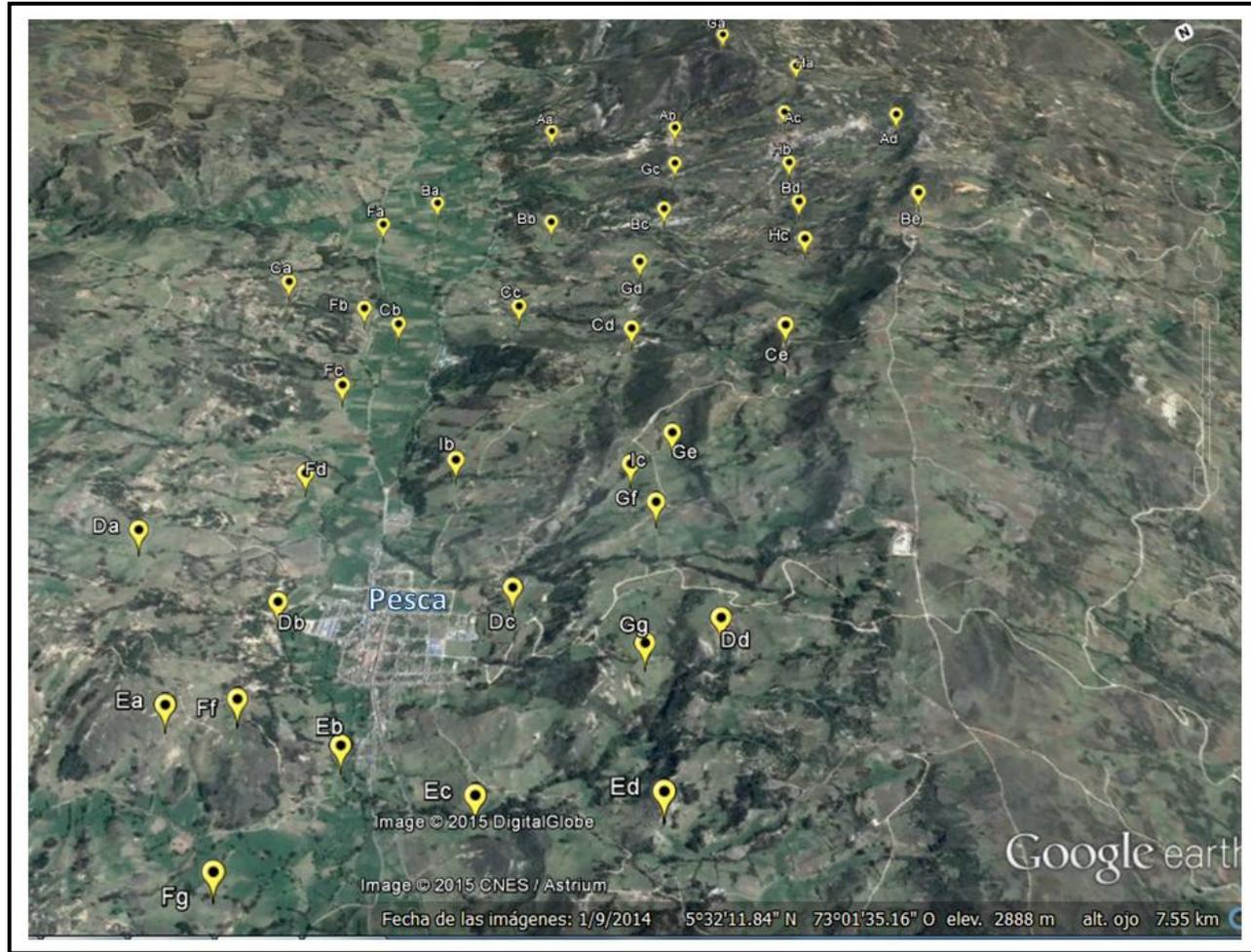
En la **Figura 27** se observa la distribución de los SEV en la zona de estudio sobre el mapa geológico y en la **Figura** se observan todos los SEV en una imagen satelital tomada de *Google Earth*. Algunos SEV fueron reubicados en campo, en ocasiones porque la topografía lo impedía y/o con el fin de garantizar la apertura planeada; en otros casos, por la falta de permiso por parte de los propietarios de los predios.

Figura 27. Localización de los SEV adquiridos



Fuente: Basado en la plancha geológica 191 del SGC (Renzoni et. al, 1998).

Figura 28. Localización de los SEV generales en el municipio de Pesca, Boyacá.



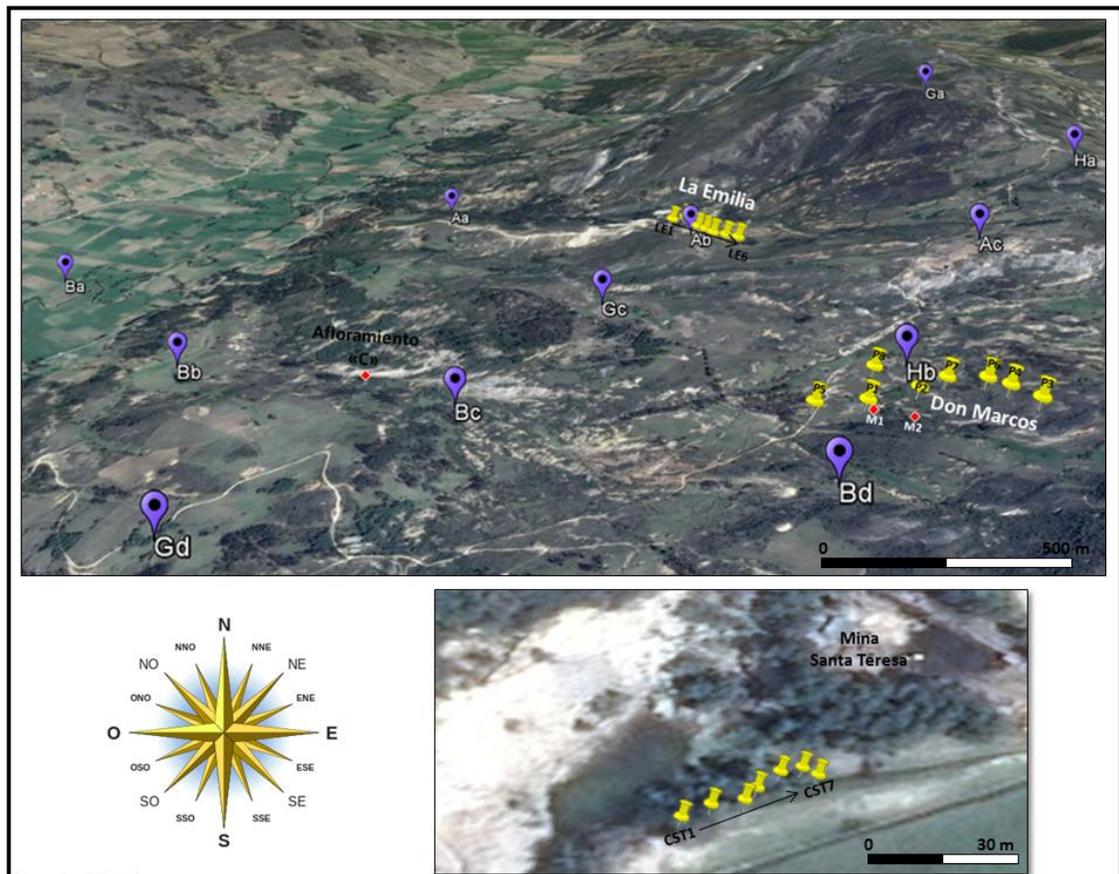
Fuente: Google Earth como herramienta de análisis. Fecha de imagen 1/9/2014. Fecha de captura 10/11/2014.

Adicionalmente, en la **Tabla 5** se presentan las coordenadas, altura y apertura AB/2 realizada, formación y equipo empleados en la adquisición de los SEV de detalle con el fin de parametrizar la respuesta eléctrica de las litologías presentes en las minas la Emilia, Santa Teresa y Don Marco. Los datos adquiridos en campo se pueden consultar en el **ANEXO B**, y en la Figura se presenta la localización sobre una imagen satelital de los SEV que conformaran los perfiles.

Tabla 5. Ubicación de los SEV de detalle

SEV	Formación	Equipo	Norte	Este	Altura	AB/2
P1	Picacho	ABEM*	1108418	1117238	2828	30
P2	Picacho	ABEM*	1108443	1117332	2856	30
P3	Picacho	ABEM*	1108317	1117484	2910	30
P4	Picacho	ABEM*	1108387	1117462	2888	30
P5	Picacho	ABEM*	1108436	1117152	2827	30
P6	Picacho	ABEM*	1108429	1117440	2883	30
P7	Picacho	ABEM*	1108460	1117383	2859	30
P8	Picacho	ABEM*	1108542	1117280	2834	30
ST1	Concentración	ABEM*	1107033	1113393	2671	30
ST2	Picacho	ABEM*	1106783	1113312	2647	30
ST3	Picacho	ABEM*	1106803	1113347	2626	30
ST4	Picacho	ABEM*	1106696	1113331	2632	30
LE1	Picacho	ABEM*	1109490	1116992	2738	30
LE2	Picacho	ABEM*	1109366	1117045	2751	30
LE3	Picacho	ABEM*	1109327	1117060	2770	30
LE4	Picacho	ABEM*	1109293	1117074	2777	30
LE5	Picacho	ABEM*	1109268	1117102	2779	30
LE6	Picacho	ABEM*	1109241	1117128	2781	30
EBA	Picacho	ABEM*	1109518	1117028	2741	30
CST1	Picacho	ABEM*	1106969	1113465	2622	100
CST2	Picacho	ABEM*	1106972	1113470	2622	100
CST3	Picacho	ABEM*	1106973	1113476	2622	100
CST4	Picacho	ABEM*	1106976	1113478	2622	100
CST5	Picacho	ABEM*	1106980	1113482	2622	100
CST6	Picacho	ABEM*	1106981	1113486	2624	100
CST7	Picacho	ABEM*	1106979	1113489	2623	100

Figura 29. Localización de los SEV de detalle en las minas del municipio de Pesca, Boyacá. M1 y M2 representan las bocaminas encontradas en la Mina Don Marcos.



Fuente: Google Earth como herramienta de análisis. Fecha de imagen 1/9/2014. Fecha de captura 10/11/2014.

4.3.3 Procesamiento. Los datos de campo fueron procesados con el software IPI2WIN¹⁰⁹ de acceso libre. Está diseñado para la interpretación automática o semiautomática de datos de Sondeos Eléctricos Verticales obtenidos soportando varias configuraciones de campo.

¹⁰⁹ BOBACHEV A; I MODIN; V. SHEVNIN. (2003) Software IPI2WIN. Versión 3.0.1e. 14.03.03 (1990-2003). Moscow State University, Russia. Disponible en: <http://geophys.geol.msu.ru/ipi2win.htm>

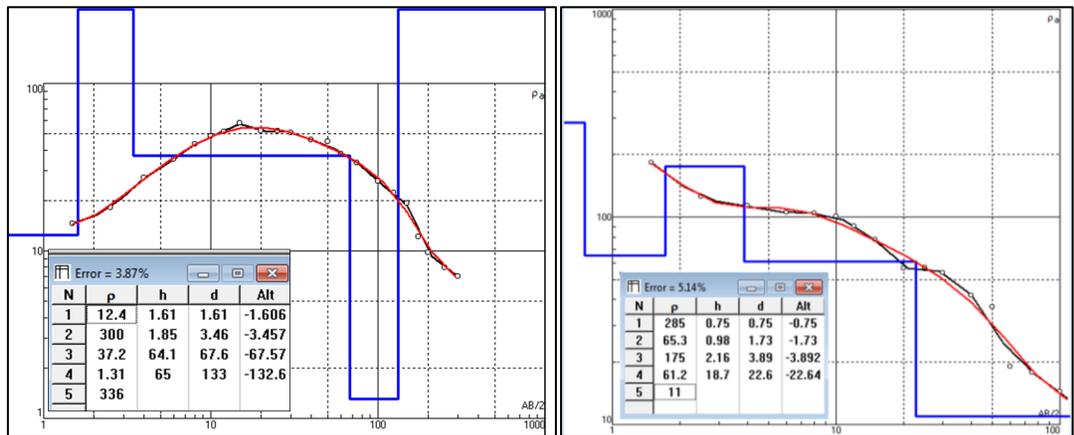
El proceso iterativo es resuelto usando filtrado lineal y cuyos filtros fueron desarrollados en el laboratorio de prospección eléctrica somera de la facultad de geología de la Universidad Estatal de Moscú; así mismo, el problema inverso es resuelto usando una variante del algoritmo de Newton para el número mínimo de capas o el algoritmo regularizado de minimización del error de ajuste que utiliza la aproximación de Tikhonov para resolver el problema de la ambigüedad en la solución de la tarea inversa.

Es importante resaltar, que durante la etapa de procesamiento se debe involucrar el conocimiento geológico del área con el fin de determinar cuál respuesta producto de la inversión es acorde con los datos y la zona de estudio.

Finalizado el procesamiento de los datos, se obtuvo a partir de la curva de resistividad aparente de campo, la distribución vertical de la resistividad bajo el punto sondeado, obteniendo para cada SEV el modelo de capas. Este resultado indica resistividad y espesor de cada capa identificada, así como el porcentaje de error de ajuste entre la curva teórica y la curva medida en campo.

La línea azul indica el modelo geoelectrico obtenido: resistividad real (ρ), espesor (h), profundidad (d) y altitud de las capas; la curva negra indica los datos medidos en campo y la línea roja es la representación de la curva teórica para el modelo analizado, como se puede observar en los ejemplos de la **Figura 30**. Los modelos geoelectricos obtenidos para todos los SEV se presentan en el **ANEXO C**.

Figura 9. Resultado del procesamiento realizado para el SEV Fa (izquierda) y SEV CST5 (derecha).



4.3.4 Resultados

Interpretación cualitativa: A partir de los resultados obtenidos en la etapa anterior, se identificó el tipo de curva a la cual pertenece cada sondeo dentro de la clasificación propuesta por Orellana¹¹⁰. En la **Tabla 6** se indica el nombre del SEV, la formación, profundidad alcanzada y el porcentaje del error obtenido luego de la inversión para cada SEV; en la **Figura 31** se presenta un diagrama de frecuencia de los tipos de curvas y en el **ANEXO C** se presentan todas las curvas obtenidas.

¹¹⁰ ORELLANA, Op. Cit.

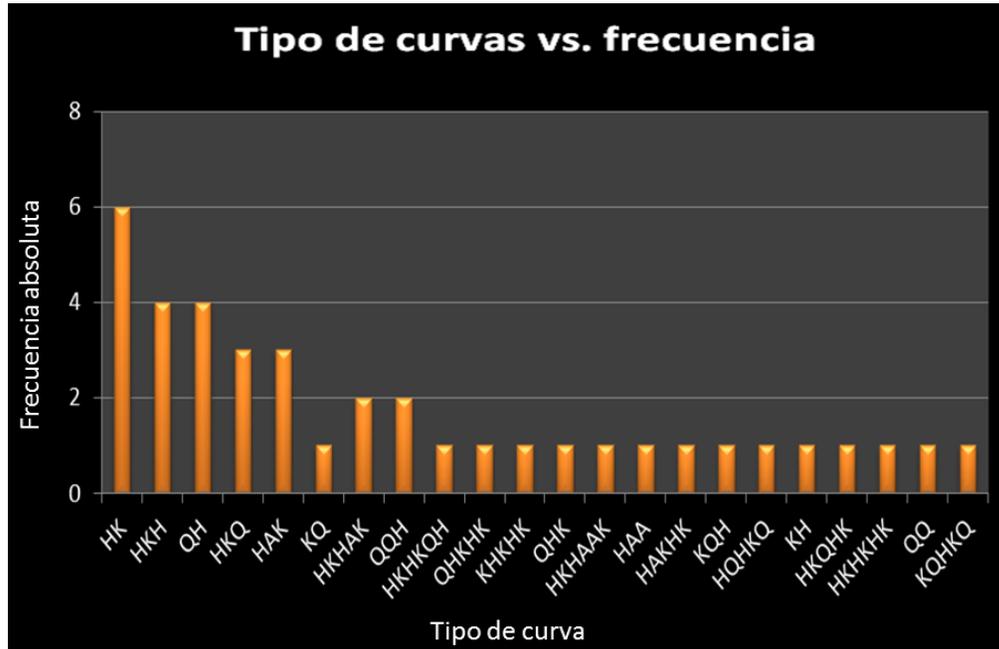
Tabla 6. Tipo de curvas obtenidas para los sondeos realizados.

	SEV	Formación	Apertura AB/2	Tipo de Curva	Profundidad alcanzada (m)	%Error	Datos anómalos eliminados
Perfil A	Aa	Concentración	250	HK	84.47	9.72	
	Ab	Picacho	300	HKQ	141.8+	11.1	
	Ac	Picacho	300	HKH	69.3	7.44	
	Ad	Picacho	300	QH	67.75*	7.02	24-25
Perfil B	Ba	Aluvión	300	HKHKQH	138.2	3.19	
	Bb	Concentración	300	QH	140.3+	14	
	Bc	Concentración	300	QHKHK	134	4.78	
	Bd	Picacho	300	HK	16.35*	18.5	
	Be	Picacho	300	HQHKQ	104.3	7.5	
Perfil C	Ca	Planeers	300	HAK	90	9.02	
	Cb	Aluvión	300	KHKHK	113.3+	5.55	
	Cc	Concentración	300	HKQ	59.14	9.17	
	Cd	Picacho	300	KQ	45.59*	27.4	
	Ce	Conejo	300	HK	56.71	7.35	22-23
Perfil D	Da	Conejo	300	HKHAK	82.17	3.1	
	Db	Picacho	300	HKQ	188.2+	8.08	
	Dc	Concentración	300	HAK	35.05*	8.09	
	Dd	Planeers	300	QHK	72.01	9.81	
Perfil E	Ea	Planeers	300	HKHAK	143.6	4.48	
	Eb	Concentración	300	HKHAAK	148	1.04	
	Ec	Concentración	300	HAA	152+	4.99	
	Ed	Planeers	300	HAKHK	121.6*	4.32	
Perfil F	Fa	Aluvión	300	KQH	132.6	3.87	
	Fb	Concentración	300	QQH	178.9	5.52	
	Fc	Concentración	300	KH	155.4	3.85	
	Fd	Concentración	300	HAK	123.7*	10.5	
	Ff	Concentración	250	KQHKQ	146.9	2.19	
	Fg	Concentración	300	QH	185+	12.5	
Perfil G	Ga	Picacho	300	HK	102.2	12.2	1,2,12
	Gc	Picacho	300	HKH	32.97	4.5	
	Gd	Concentración	300	HKH	21.47*	17.2	
	Ge	Picacho	300	HKQHK	28.89	3.63	
	Gf	Picacho	300	QH	119.5+	11.3	23,24,25
	Gg	Planeers	300	QQH	70.15	5	
Perfil H	Ha	Picacho	300	HK	53.4*	10	
	Hb	Picacho	300	HK	118.9	6.41	1
	Hc	Picacho	300	HKH	121.5+	3.75	1
Perfil I	Ib	Concentración	300	HKHKHK	121.6+	3.33	
	Ic	Picacho	300	QQ	41.82*	20.2	

* Indica el SEV con menor profundidad alcanzada dentro del perfil

+ Indica el SEV con mayor profundidad alcanzada dentro del perfil

Figura 31. Diagrama de barras para los SEV generales.



Estos resultados evidencian variaciones en las resistividades, lo cual sugiere variación lateral de facies, anisotropía de las rocas sumada a factores tectónicos que plegan y/o desplazan las capas afectando su continuidad y por lo tanto los resultados.

De la tabla anterior se evidencia que la profundidad de investigación varió entre 16,35 metros con un error del 18,5% y 188,2 metros con un error del 8.08% para los SEV Bd y Db respectivamente, los cuales representan el valor mínimo y máximo de esta adquisición. En general, el error oscilo entre 1,04 y 27,4% con un error promedio del 8,25%; lo cual indica una buena adquisición de los datos teniendo en cuenta que desde el diseño se planteó que el error debía estar por debajo del 30%, considerando las condiciones topográficas del terreno, la complejidad estructural de la zona y las limitaciones de la técnica.

Interpretación cuantitativa

En esta etapa se interpretó y analizó la respuesta eléctrica del conjunto de capas con el propósito de determinar los valores de resistividad verdadera y espesor de las unidades geoelectricas obtenidas a partir del software IPI2win. Los resultados se presentan en la **Tabla 7**, de igual forma pueden ser consultados en el **ANEXO C**.

Tabla 7. Interpretación cuantitativa de los SEV generales

SEV	ρ (Ohm.m)								Espesor (m)								Prof. (m)							
	ρ 1	ρ 2	ρ 3	ρ 4	ρ 5	ρ 6	ρ 7	ρ 8	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	Prof.1	Prof.2	Prof.3	Prof.4	Prof.5	Prof.6	Prof.7	Prof.8
Aa	335	10.5	280	2.02	-	-	-	-	9.68	44	30.8	-	-	-	-	-	9.68	53.68	84.48	-	-	-	-	-
Ab	574	160	1137	78.8	0.391	-	-	-	0.75	1.7	6.17	133	-	-	-	-	0.75	2.45	8.62	141.62	-	-	-	-
Ac	809	161	22110	108	24978	-	-	-	0.75	1.1	10.3	57.2	-	-	-	-	0.75	1.85	12.15	69.35	-	-	-	-
Ad	284	86.8	41.2	12507	-	-	-	-	0.905	12.4	54.4	-	-	-	-	-	0.905	13.305	67.705	-	-	-	-	-
Ba	327	21.2	114	29.3	84.4	26.3	3.87	380	0.75	0.617	1.63	4.19	21.1	48.5	61.5	-	0.75	1.367	2.997	7.187	28.287	76.787	138.29	-
Bb	1027	69.6	22.6	2477	-	-	-	-	0.75	9.09	130	-	-	-	-	-	0.75	9.84	139.84	-	-	-	-	-
Bc	1639	135	44.1	587	123	1188	-	-	0.896	3.7	3.42	4.35	122	-	-	-	0.896	4.596	8.016	12.366	134.37	-	-	-
Bd	156	21.7	17808	17.7	-	-	-	-	2.17	4.67	9.51	-	-	-	-	-	2.17	6.84	16.35	-	-	-	-	-
Be	71.1	726	83.2	19.2	238	0.892	-	-	1.49	1.04	23.6	20.8	57.4	-	-	-	1.49	2.53	26.13	46.93	104.33	-	-	-
Ca	171	8.41	32.2	267	0.521	-	-	-	1.27	0.624	52	36.2	-	-	-	-	1.27	1.894	53.894	90.094	-	-	-	-
Cb	23	267	4.5	25.2	2.51	-	-	-	0.75	7.74	15.1	32.7	57	-	-	-	0.75	8.49	23.59	56.29	113.29	-	-	-
Cc	724	527	55.7	708	41	7.47	-	-	-	0.919	1.88	2.77	53.6	-	-	-	-	0.919	2.799	5.569	59.169	-	-	-
Cd	347	1645	155	2.03	-	-	-	-	2.11	1.05	42.4	-	-	-	-	-	2.11	3.16	45.56	-	-	-	-	-
Ce	334	35.8	287	32.4	-	-	-	-	0.75	4.2	51.8	-	-	-	-	-	0.75	4.95	56.75	-	-	-	-	-
Da	27.3	6.04	31.6	4.89	69.8	112	-	-	1.03	0.859	2.12	3.84	74.3	-	-	-	1.03	1.889	4.009	7.849	82.149	-	-	-
Db	1707	11.6	198	106	1.92	-	-	-	0.75	0.351	25.8	161	-	-	-	-	0.75	1.101	26.901	187.9	-	-	-	-
Dc	515	14.2	107	1024	1.25	-	-	-	0.75	0.18	8.76	25.4	-	-	-	-	0.75	0.93	9.69	35.09	-	-	-	-
Dd	433	89.7	9.25	241	0.786	-	-	-	1.82	9.57	13	47.6	-	-	-	-	1.82	11.39	24.39	71.99	-	-	-	-
Ea	326	30	500	13	93.4	5638	-	-	0.848	0.943	2.44	9.35	130	-	-	-	0.848	1.791	4.231	13.581	143.58	-	-	-
Eb	56.24	14.59	67.66	8.742	20.81	60.13	3150	-	0.75	0.543	2.217	2.567	46.1	95.82	-	-	0.75	1.293	3.51	6.077	52.177	148	-	-
Ec	140	3.56	22.2	223	28626	-	-	-	0.75	0.163	11.6	140	-	-	-	-	0.75	0.913	12.513	152.51	-	-	-	-
Ed	251	4.95	41.2	127	38.7	3791	-	-	0.75	0.284	8.57	4.33	108	-	-	-	0.75	1.034	9.604	13.934	121.93	-	-	-
Fa	12.4	300	37.2	1.31	336	-	-	-	1.61	1.85	64.1	65	-	-	-	-	1.61	3.46	67.56	132.56	-	-	-	-
Fb	373	179	84.9	40.4	4161	-	-	-	0.75	2.83	8.82	167	-	-	-	-	0.75	3.58	12.4	179.4	-	-	-	-
Fc	22.3	38.9	10.9	801	-	-	-	-	2.03	28.1	125	-	-	-	-	-	2.03	30.13	155.13	-	-	-	-	-
Fd	337	1.68	22.3	109	0.876	-	-	-	0.75	0.104	21.8	101	-	-	-	-	0.75	0.854	22.654	123.65	-	-	-	-
Ff	321	1089	580	146	781	4.64	-	-	0.875	0.823	7.21	9.77	128	-	-	-	0.875	1.698	8.908	18.678	146.68	-	-	-
Fg	837	103	12.8	1925	-	-	-	-	0.75	2.73	102	-	-	-	-	-	0.75	3.48	105.48	-	-	-	-	-
Ga	21447	6477	37321	55.1	-	-	-	-	6.57	56.8	38.9	-	-	-	-	-	6.57	63.37	102.27	-	-	-	-	-
Gc	1620	170	5405	51.1	170000	-	-	-	0.75	3.04	3.77	13.9	-	-	-	-	0.75	3.79	7.56	21.46	-	-	-	-
Gd	620	48.2	230	14.9	29455	-	-	-	0.75	0.27	10.5	17.4	-	-	-	-	0.75	1.02	11.52	28.92	-	-	-	-
Ge	3766	26	676	43.1	9.41	6590	-	-	3766	26	676	43.1	9.41	-	-	-	3766	3792	4468	4511.1	4520.5	-	-	-
Gf	544	157	36.8	32502	-	-	-	-	2.05	13.9	17	-	-	-	-	-	2.05	15.95	32.95	-	-	-	-	-
Gg	546	117	35	6.94	6606	-	-	-	0.75	1.03	37.3	31.1	-	-	-	-	0.75	1.78	39.08	70.18	-	-	-	-
Ha	169	30.4	1633	3.16	-	-	-	-	1.07	24.2	28.1	-	-	-	-	-	1.07	25.27	53.37	-	-	-	-	-
Hb	350	89.7	1223	4.74	-	-	-	-	2.45	20.5	95.9	-	-	-	-	-	2.45	22.95	118.85	-	-	-	-	-
Hc	1263	220	1737	77.5	11842	-	-	-	5.62	15.8	35.2	65	-	-	-	-	5.62	21.42	56.62	121.62	-	-	-	-
Ib	530	44.7	256	22.4	299	28.5	5777	-	0.75	0.289	14.2	13.9	28.7	63.9	-	-	0.75	1.039	15.239	29.139	57.839	121.74	-	-
Ic	36604	7529	76.1	0.0263	-	-	-	-	0.864	12.5	28.5	-	-	-	-	-	0.864	13.364	41.864	-	-	-	-	-

De acuerdo a las variaciones de resistividad obtenidas en el análisis cualitativo y la incertidumbre que se genera en estos perfiles debido a la gran distancia de separación que existe entre un sondeo y otro, la variación lateral de facies, anisotropía, y en especial la diferencia de alturas entre los sondeos (**Tabla 4**) y la topografía del área, no se analizaron a más detalle estos perfiles para no incurrir en falsas interpretaciones. Por lo tanto, el análisis de permeabilidad y saturación de hidrocarburo que se pretendía hacer con los SEV generales para amarrarlo a los resultados petrofísicos de las arenas bituminosas de la zona de estudio, así como los mapas de isorresistividades aparentes y reales no fue posible realizarlos por la situación anteriormente explicada.

Por esa razón, de aquí en adelante se trabajó solo con los SEV de detalle. En la **Tabla 8** se presentan los resultados obtenidos para los SEV de detalle, indicando la Formación, profundidad de investigación alcanzada, % error y tipo de curva.

Tabla 8. Resultados de los SEV de detalle.

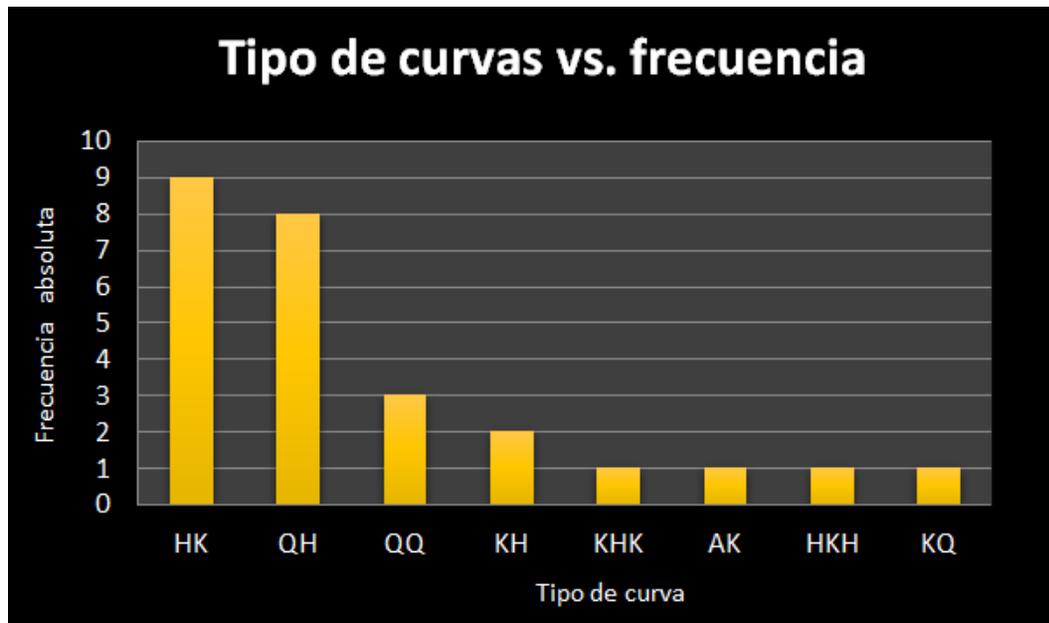
SEV	Formación	Profundidad (m)	% Error	Tipo de curva
P1	Picacho	13	3.96	QH
P2	Picacho	8.04	12.60	QH
P3	Picacho	17.75	6.55	HK
P4	Picacho	7.67	12.20	HK
P5	Picacho	14.43	7.93	QQ
P6	Picacho	10.96	7.03	HK
P7	Picacho	12.05	2.45	QH
P8	Picacho	11.35	4.29	QH
ST1	Concentración	15	3.97	KHK
ST2 - Paramétrico	Picacho	14.99	6.23	HK
ST3	Picacho	1.723	2.81	HK
ST4	Picacho	12.55	5.19	AK
LE1	Picacho	30	5.18	KH
LE2	Picacho	10.92	4.59	HK
LE3	Picacho	15	9.20	HKH
LE4	Picacho	22.49	4.03	KQ

Tabla 8. (Continuación)

SEV	Formación	Profundidad (m)	% Error	Tipo de curva
LE5	Picacho	13.16	10.40	QQ
LE6	Picacho	11.39	8.32	QH
EBA	Picacho	10.22	4.10	KH
CST1	Picacho	42.03	12.70	QH
CST2	Picacho	28.49	7.72	QH
CST3	Picacho	23.99	9.64	QH
CST4	Picacho	21.96	13.9	QQ
CST5	Picacho	22.64	5.14	HK
CST6	Picacho	6.69	13.8	HK
CST7	Picacho	7.85	7.29	HK

Adicionalmente, en la **Figura 32** se presenta un diagrama de barras que permite visualizar la distribución de frecuencia absoluta (número de veces que repite el dato) versus el tipo de curva.

Figura 32. Diagrama de barras indicando los tipos de curvas hallados.

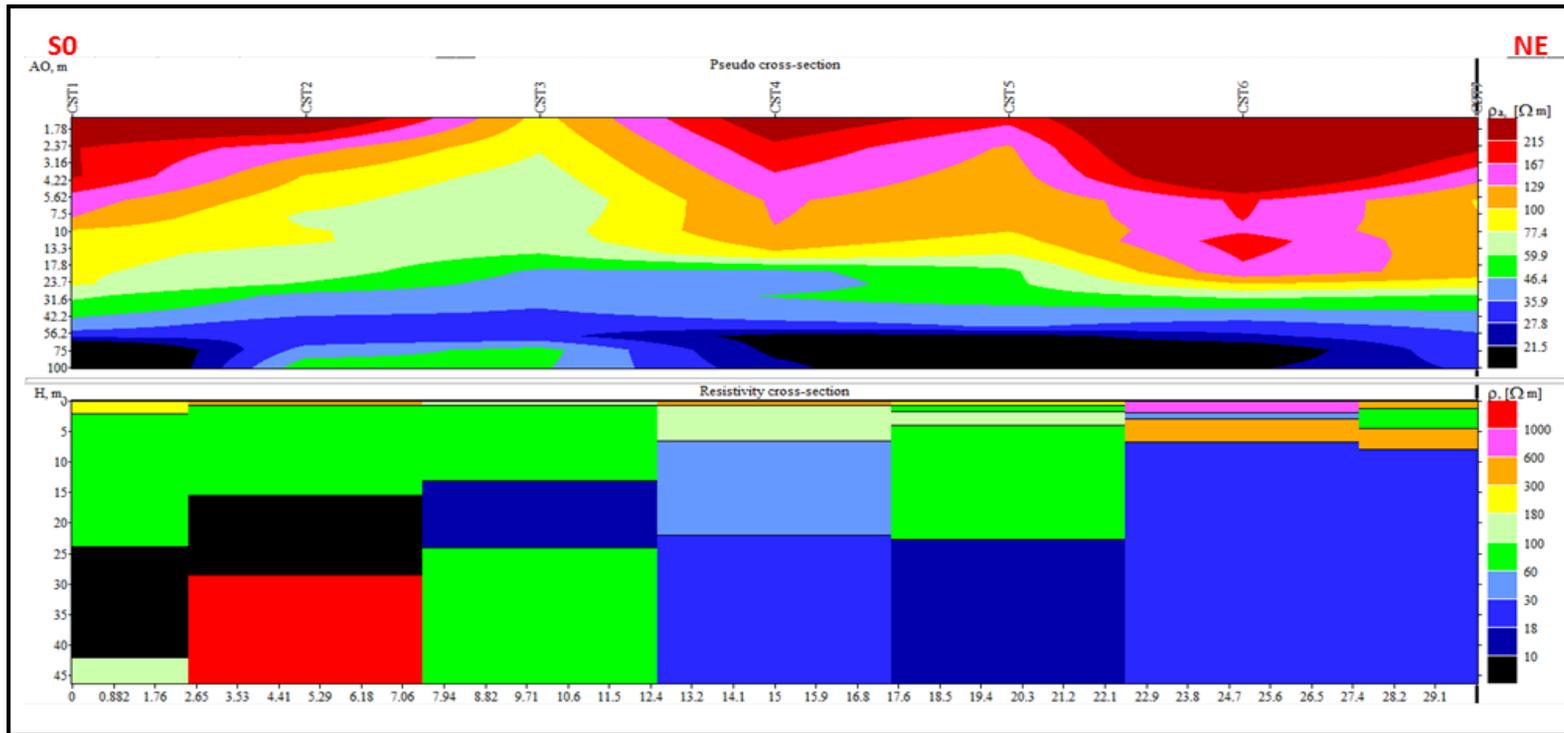


Los sondeos de detalle son en total 26; de los cuales el 65.4% de los datos está representado por curvas tipo HK y QH, seguido por curvas tipo QQ con el 11.5%, el 7.7% corresponde a curvas tipo KH mientras las curvas KHK, AK, HKH Y KQ presentan igual distribución y representan el 15.4% de los datos.

A continuación se presentan las pseudosecciones conformadas con estos sondeos que fueron adquiridos donde se conoce la presencia de arenas bituminosas: Mina Santa Teresa (**Figura 33**), Mina La Emilia (**Figura 34 y Figura 35**) y Mina Don Marcos (**Figura 36, Figura 37 y Figura 38**) con el fin de caracterizar adecuadamente la respuesta eléctrica y mejorar la resolución vertical.

- PSEUDOSECCIÓN MINA SANTA TERESA

Figura 33. Perfil ST. A) Distribución de las resistividades aparentes a lo largo de la pseudosección. B) Perfil geoelectrico donde se observan las resistividades reales obtenidas después de la inversión. La longitud total de este perfil es de 30 m aproximadamente.

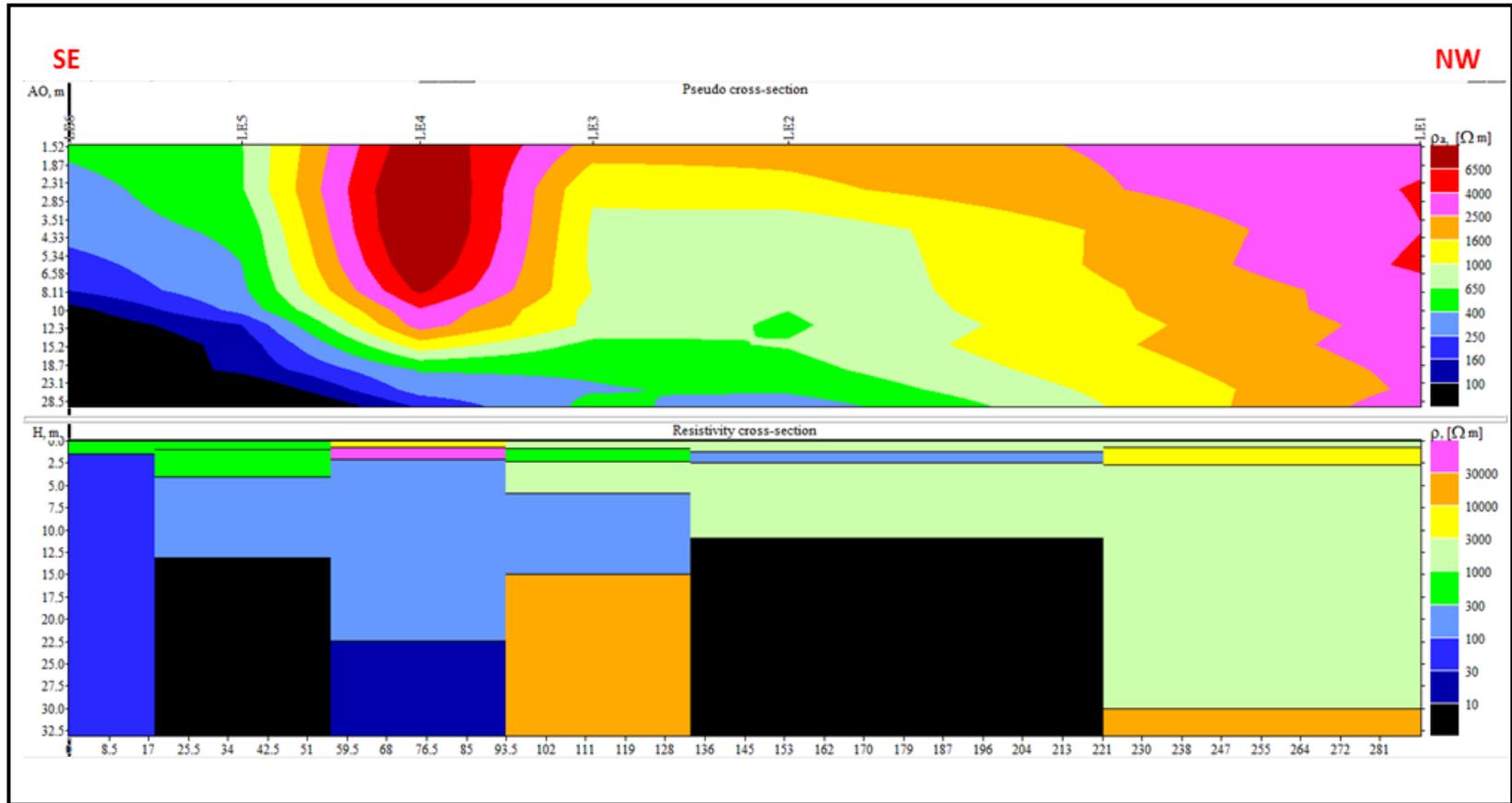


- **PSEUDOSECCIÓN MINA LA EMILIA:** Cabe mencionar que esta pseudosección representa una aproximación por intentar caracterizar la respuesta eléctrica sobre uno de los mejores afloramientos que se tenía, pero debido a las condiciones observadas en la **Figura 34** no fue posible tomar ningún SEV en el sector señalado en la imagen con la línea roja, el cual corresponde al lugar con presencia de arenas bituminosas pero debido a condiciones de seguridad este espacio solo pudo usarse para pasar con el cable y realizar las aperturas de los SEV LE1 y LE2 que se realizaron a lado y lado del afloramiento. En la **Figura 35** se presenta el perfil construido con los SEV del LE1 al LE6.

Figura 34. Panorámica de la Mina La Emilia, donde se indica la zona de riesgo y ubicación de los SEV LE 1 y LE2.

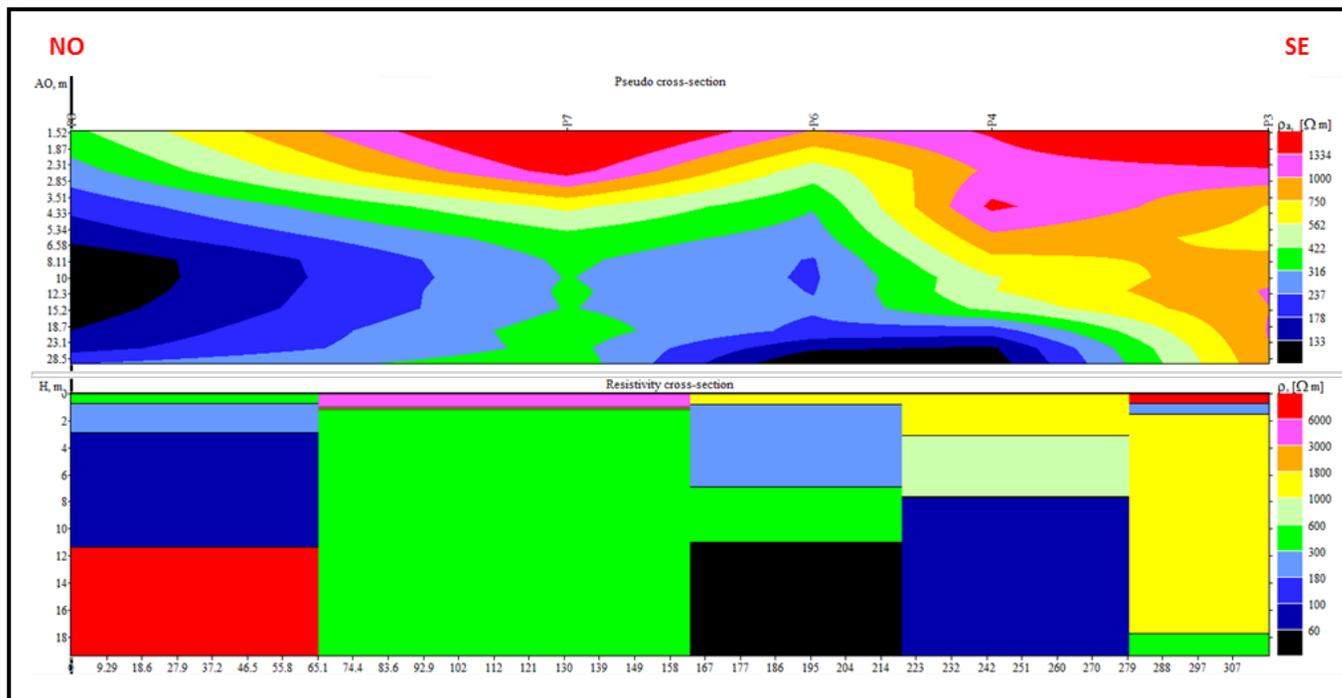


Figura 35. Perfil LE. A) Distribución de las resistividades aparentes a lo largo de la pseudosección. B) Perfil geoelectrico donde se observan las resistividades reales obtenidas después de la inversión.



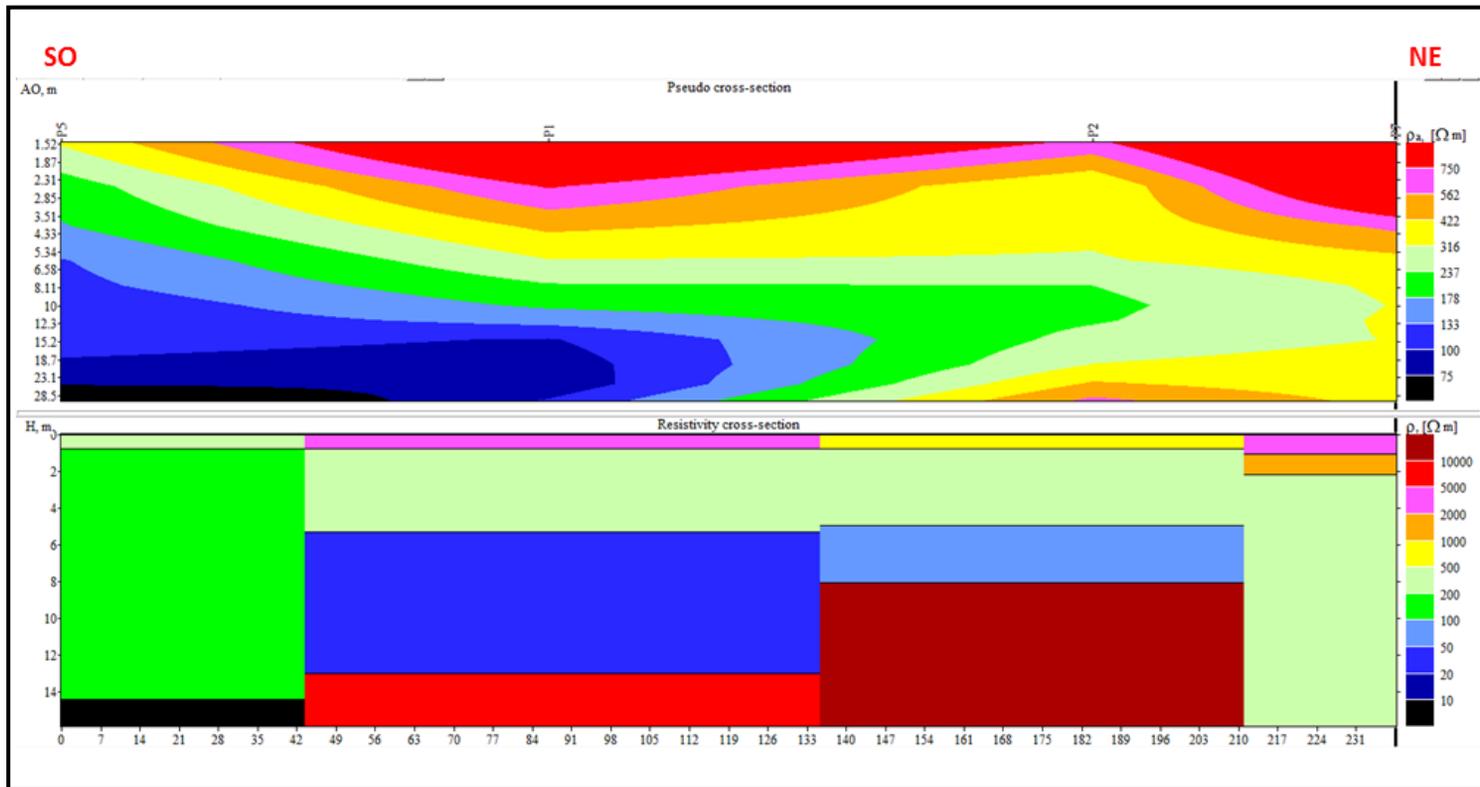
- **PSEUDOSECCIONES MINA DON MARCOS:** En esta mina se construyeron 3 perfiles empleando los 8 SEV adquiridos en el lugar. El perfil P1 (**Figura 36**) está conformado por los SEV P8-P7-P6-P4-P3. El perfil P2 (**Figura 37**) está integrado por los SEV P5-P1-P2-P7 y el perfil P3 (**Figura 38**) se realizó con los SEV P5-P1-P3.

Figura 36. Perfil P1. A) Distribución de las resistividades aparentes a lo largo de la pseudosección. B) Perfil geoelectrico donde se observan las resistividades reales obtenidas después de la inversión.



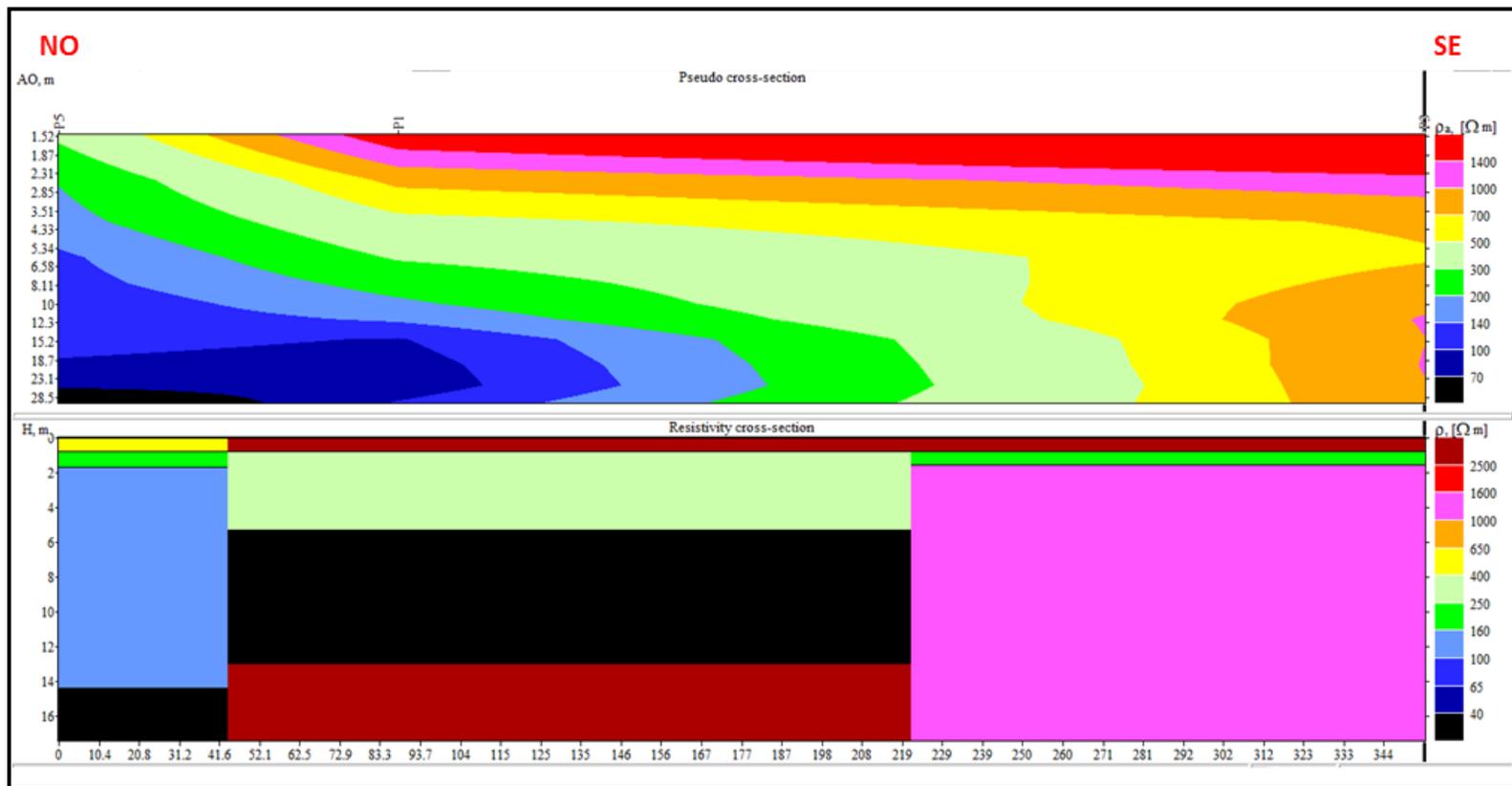
PSEUDOSECCION P2

Figura 37. Perfil P2. A) Distribución de las resistividades aparentes a lo largo de la pseudosección. B) Perfil geoelectrico donde se observan las resistividades reales obtenidas después de la inversión.



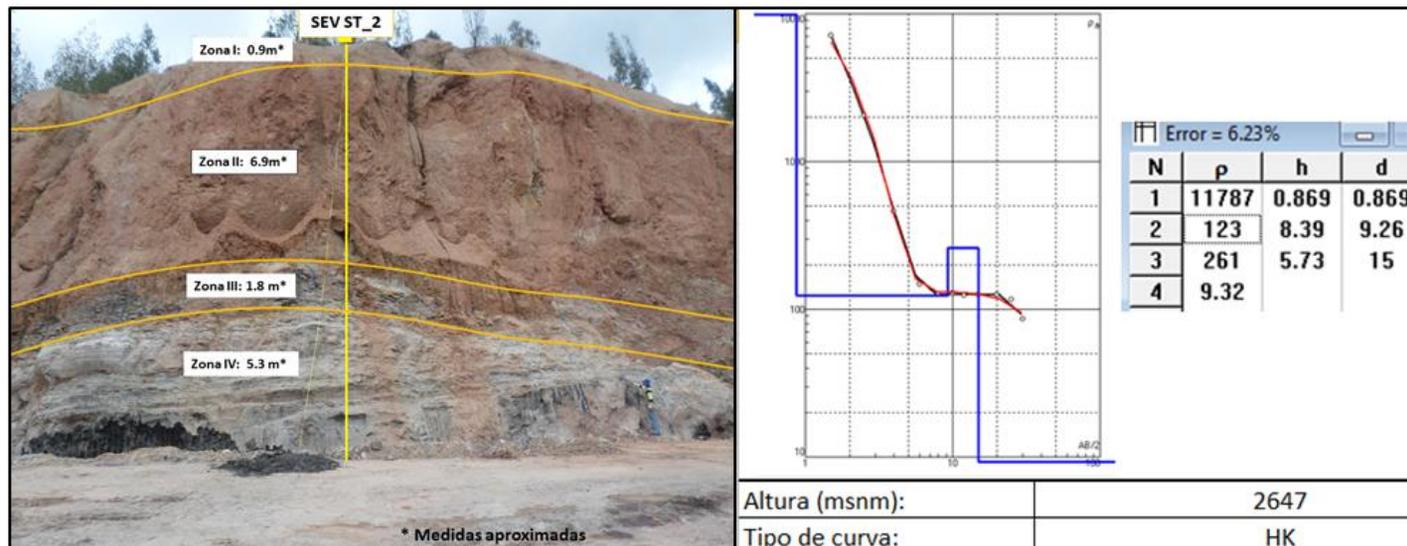
PSEUDOSECCION P3

Figura 38. Perfil P3. A) Distribución de las resistividades aparentes a lo largo de la pseudosección. B) Perfil geoelectrico donde se observan las resistividades reales obtenidas después de la inversión.



4.3.4.1 SEV paramétrico: En el afloramiento denominado Mina Santa Teresa adjunto, se tuvo la oportunidad de adquirir un sondeo justo en la parte superior del yacimiento con una apertura $AB/2= 30$ metros (Figura); desafortunadamente por las condiciones del terreno no fue posible realizar una mayor apertura que permitiera conocer la respuesta eléctrica a mayor profundidad. Sin embargo, en la Figura 18 se presenta el resultado obtenido para este SEV, el cual alcanzo una profundidad de investigación de 15 metros aproximadamente con un error de ajuste del 6.2%.

Figura 39. Afloramiento adjunto a la mina Santa Teresa donde se evidencian las cuatro capas litológicas identificadas y el resultado del procesamiento del SEV ST2 donde se observa la curva de resistividad obtenida y un modelo de 4 capas identificadas por su resistividad (ρ), espesor (h) y profundidad (d).



En la **Tabla 9** se presenta la correlación entre las zonas identificadas en el afloramiento con las capas obtenidas en el sondeo SEV ST2, donde se infiere que el valor de resistividad que caracteriza la capa de arenas bituminosas con baja impregnación intercalada con estratos de arcillolita y lodolitas corresponde a 261 ohm.m para este caso. La capa con mayor impregnación y compuesta de arenas conglomeráticas no alcanzo a ser identificada por este sondeo.

Tabla 9. Relación entre la secuencia de capas obtenida en el afloramiento con las resistividades del SEV ST2.

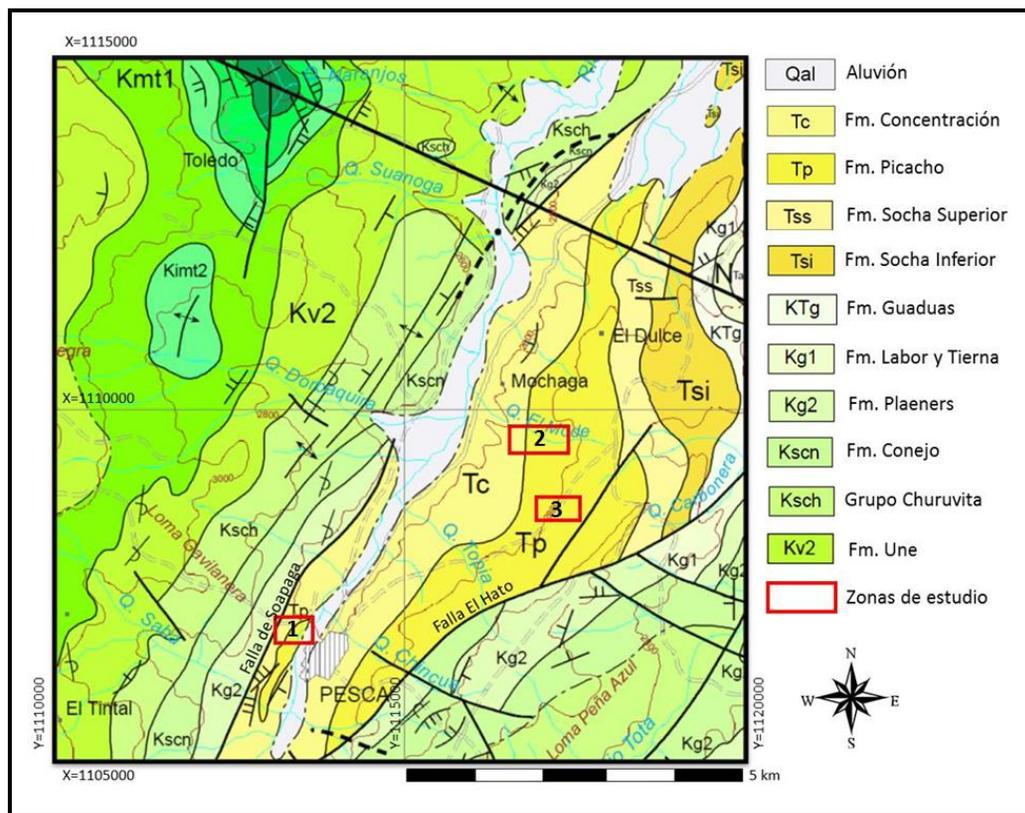
Litología	ρ (Ohm.m)	Espesor (m)	Prof. (m)
Zona I	11787	0.87	0.87
Zona II + Zona III	123	8.39	9.26
Zona IV: Arenas Bituminosas	261	5.73	15

4.4 ETAPA GEOFÍSICA – TOMOGRAFÍAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

4.4.1 Diseño. Se planteó la adquisición de 5 perfiles en las zonas donde ya está probada la existencia de las arenas bituminosas empleando el dispositivo geoelectrico Wenner. Para tal fin se definió llevar a cabo la adquisición de dos perfiles en cada una de las minas donde la explotación del recurso se está llevando a cabo y por lo tanto garantiza la existencia del yacimiento (minas Santa Teresa y La Emilia) y un perfil en la mina Don Marco donde están realizando la etapa inicial de exploración.

Las zonas seleccionadas se indican en la Figura 40. La longitud del tendido podría oscilar entre 100 y 400 metros teniendo en cuenta que por ser zonas de explotación activas siempre están modificando las condiciones del terreno y se llevaran a cabo con diferente espaciamiento entre electrodos por dos razones (espacio en el terreno y analizar la diferencia en la resolución).

Figura 40. Marco geológico del área de estudio. Los números corresponden a la ubicación de las minas (1. Santa Teresa, 2. La Emillia, 3. Don Marcos)



Fuente: Basado en la Plancha 191 del SGC (Renzoni, et. al., 1998).

La adquisición se llevó a cabo con un TERRAMETER ABEM LS propiedad de la empresa Hydroingeniería S.A. En la **Figura 41** se muestra un sistema completo excepto por el número total de electrodos y conectores de electrodos empleados.

En total, el equipo consta de 72 electrodos, un set de cables LUND (4 cables, con 21 salidas a un intervalo de 10 metros), conector de cables (2) y 75 *jumper* cable-electrodo.

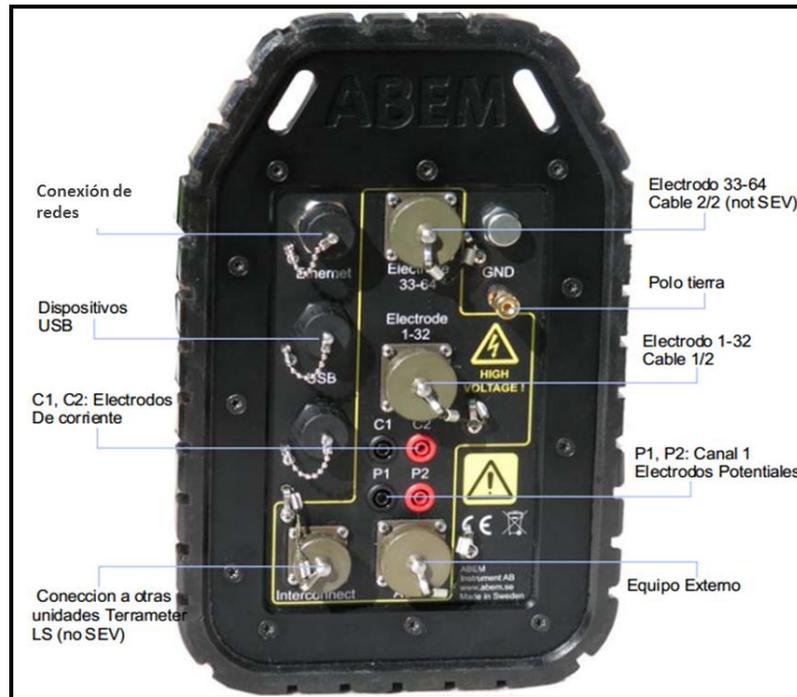
Figura 1041. Imagen de un Terrameter LS con todos los accesorios necesarios para la adquisición.



Fuente: Disponible en: <http://www.abem.se/>

Todos los conectores excepto los de las fuentes externas de poder están situados en el panel de la parte derecha del *Terrameter LS* como se observa en la **Figura 42**.

Figura 42. Panel de conexiones del Terrameter LS.



Fuente: Disponible en: <http://www.abem.se/>

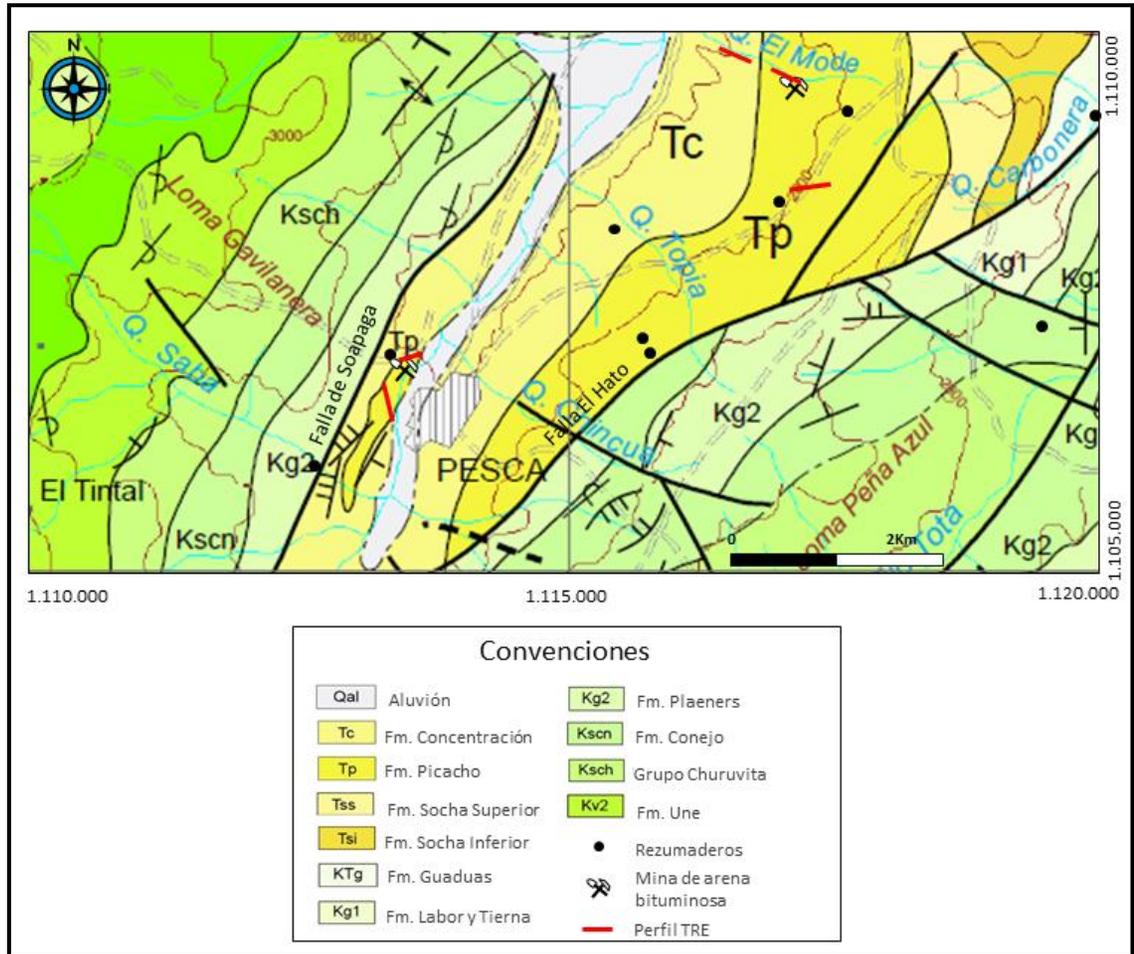
Finalmente, las tomografías eléctricas fueron tomadas del 3 al 5 de octubre de 2014 para un total de 5 perfiles. Las coordenadas se presentan en la **Tabla 10** y los datos de campo producto de la adquisición se pueden consultar en el **Anexo D**.

Tabla 10. Coordenadas, longitud y espaciamento de electrodos para las TRE.

NOMBRE	Punto Inicial			Punto Final			LONGITUD (m)	Espaciamento entre electrodos (m)
	X	Y	Z	X	Y	Z		
LA EMILIA 1	1117191	1109549	2730	1116918	1109602	2722	280	3.5
LA EMILIA 2	1116664	1109721	2675	1116383	1109847	2637	320	4
DON MARCO	1117393	1108475	2859	1117009	1108402	2821	400	5
SANTA TERESA 1	1113319	1106712	2630	1113377	1106356	2623	160	2
SANTA TERESA 2	1113370	1106854	2624	1113568	1106986	2619	240	3

Según el mapa geológico publicado por el Servicio Geológico Colombiano (**Figura 43**), las TRE realizadas en el presente estudio se encuentran localizadas en zonas donde afloran principalmente rocas sedimentarias de edad terciaria (formaciones Concentración y Picacho).

Figura 43. Localización de las tomografías sobre el mapa geológico.



Fuente: Basado en la Plancha 191 del SGC (Renzoni, et. al., 1998).

De acuerdo a la información geológica, en la **Figura 44** se observa una línea negra discontinua que indica el contacto geológico entre las formaciones Picacho y Concentración, necesario para identificar las rocas aflorantes en las zonas de estudio lo cual es un apoyo indispensable para la interpretación de los resultados. Debe tenerse en cuenta que el contacto geológico fue extraído del mapa de la plancha 191- Tunja, escala 1:100.000¹¹¹ la cual representa una escala mucho

¹¹¹ RENZONI, G., ROSAS, H., ETAYO, F. (1998). Geología de La Plancha 191-Tunja, Escala 1:100.000. Ingeominas, Bogotá

menor a la de la imagen tomada de *Google Earth* y puede presentar un error con respecto a la posición real del contacto.

Las TRE ubicadas en las minas Santa Teresa (**Figura 44**) y Don Marcos (**Figura 45**), se encuentran distribuidas sobre la Formación Picacho. En la mina Santa Teresa las TRE se localizan muy cerca al contacto con la Formación Concentración, como se observa en la **Figura 44**. Según el mapa geológico del SGC (Plancha 191,) ¹¹² y teniendo en cuenta las observaciones de la **Figura 46**, las TRE ubicadas en la mina La Emilia se encuentran distribuidas en formaciones geológicas diferentes. La TRE LE-1 se ubica en una zona donde afloran rocas de la Formación Picacho mientras que la TRE LE-2 está distribuida sobre rocas de la Formación Concentración.

En la mina La Emilia surgió una incertidumbre a partir de la revisión bibliográfica ya que como se explicó anteriormente, en esta zona afloran rocas principalmente pertenecientes a las formaciones Picacho y Concentración, sin embargo, Sarmiento (1951) establece que en la zona donde se ubica la TRE LE-1 afloran rocas de la Formación Socha inferior (Areniscas de Socha). Pero el informe, como lo indica su autor, se toma con cierta reserva ya que se basó en varias suposiciones e hizo falta el desarrollo de otros trabajos para verificar su hipótesis. Teniendo en cuenta la distribución de las formaciones en la zona de estudio, la litología, la secuencia estratigráfica, los datos estructurales tomados en campo y las observaciones realizadas a partir del análisis de imágenes satelitales, se pudo determinar que la formación geológica aflorante en este sector de la mina La Emilia corresponde a la Formación Picacho concordando con lo reportado en la plancha geológica 191 ¹¹³

¹¹² RENZONI, ROSAS, ETAYO, Op. Cit.

¹¹³ Ibid

Figura 44. Distribución de las TRE en la mina Santa Teresa (Pesca, Boyacá).



Fuente: Google Earth como herramienta de análisis. Fecha de imagen 1/9/2014. Fecha de captura 12/11/2014.

Figura 1145. Distribución de las TRE en la mina Don Marcos (Pesca, Boyacá).



Fuente: Google Earth como herramienta de análisis. Fecha de imagen 1/9/2014. Fecha de captura 12/11/2014.

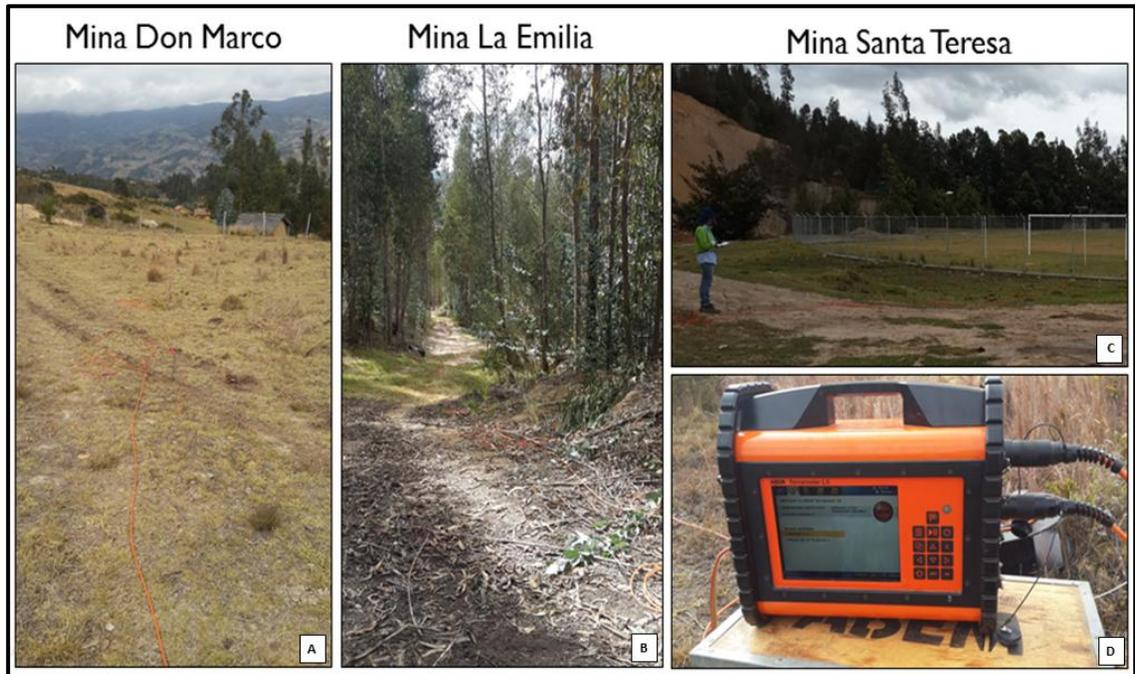
Figura 46. Distribución de las TRE en la mina La Emilia (Pesca, Boyacá).



Fuente: Google Earth como herramienta de análisis. Fecha de imagen 1/9/2014. Fecha de captura 12/11/2014.

En la **Figura 47** se observa la adquisición realizada en campo para las tres zonas, indicando tres de las TRE realizadas, donde adicionalmente se registraron los datos de altura en cada cambio dependiente con ayuda del GPS GARMIN Serie GPSMAP 62, con el objetivo de crear el perfil topográfico de cada tomografía e incluirla en el procesamiento de los datos. Los datos topográficos se presentan en el **ANEXO E**.

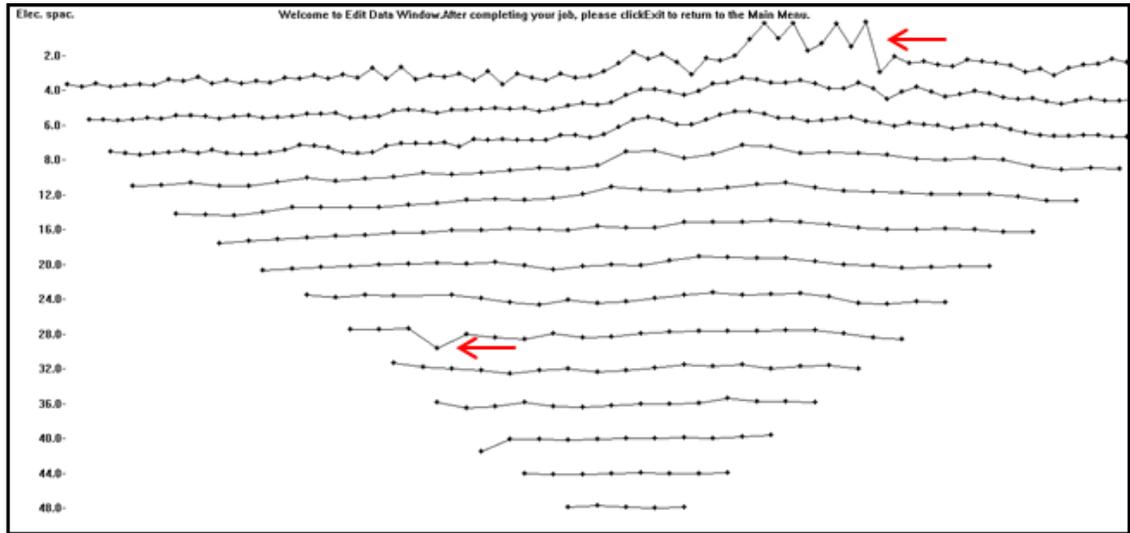
Figura 47. Adquisición de las TRE. A) TRE-DM1; B) TRE-LE2; C) TRE-ST2; D) Equipo empleado.



4.4.2 Procesamiento. Con el fin de obtener perfiles 2D de resistividad real a partir de las pseudosecciones de datos aparentes obtenidas en campo, se precisó de un programa de inversión. En este caso se empleó el *software* RES2DINV, desarrollado por *Geotomo Software (2013)*.

Esta etapa inicia con un pre-procesamiento de datos para evitar datos erróneos que pueden alterar el comportamiento de los demás valores debido a diversos tipos de ruido que afectan los datos observados y los más comunes son el ruido instrumental, ruido topográfico, ruido geológico y cultural. El pre-procesamiento se realiza de forma manual y se lleva a cabo directamente en el *software* mencionado anteriormente, el criterio para eliminar algún dato es la continuidad de la forma de la curva, como se puede observar en la **Figura 48** donde los datos tienen un patrón y se observan picos que no siguen la tendencia general.

Figura 48. Edición de datos ruidosos para la TRE-ST1. Los datos anómalos corresponden a los picos que sobresalen en la tendencia general de cada línea, especialmente en la primera y novena línea del perfil como indican las flechas.



Inversión 2D

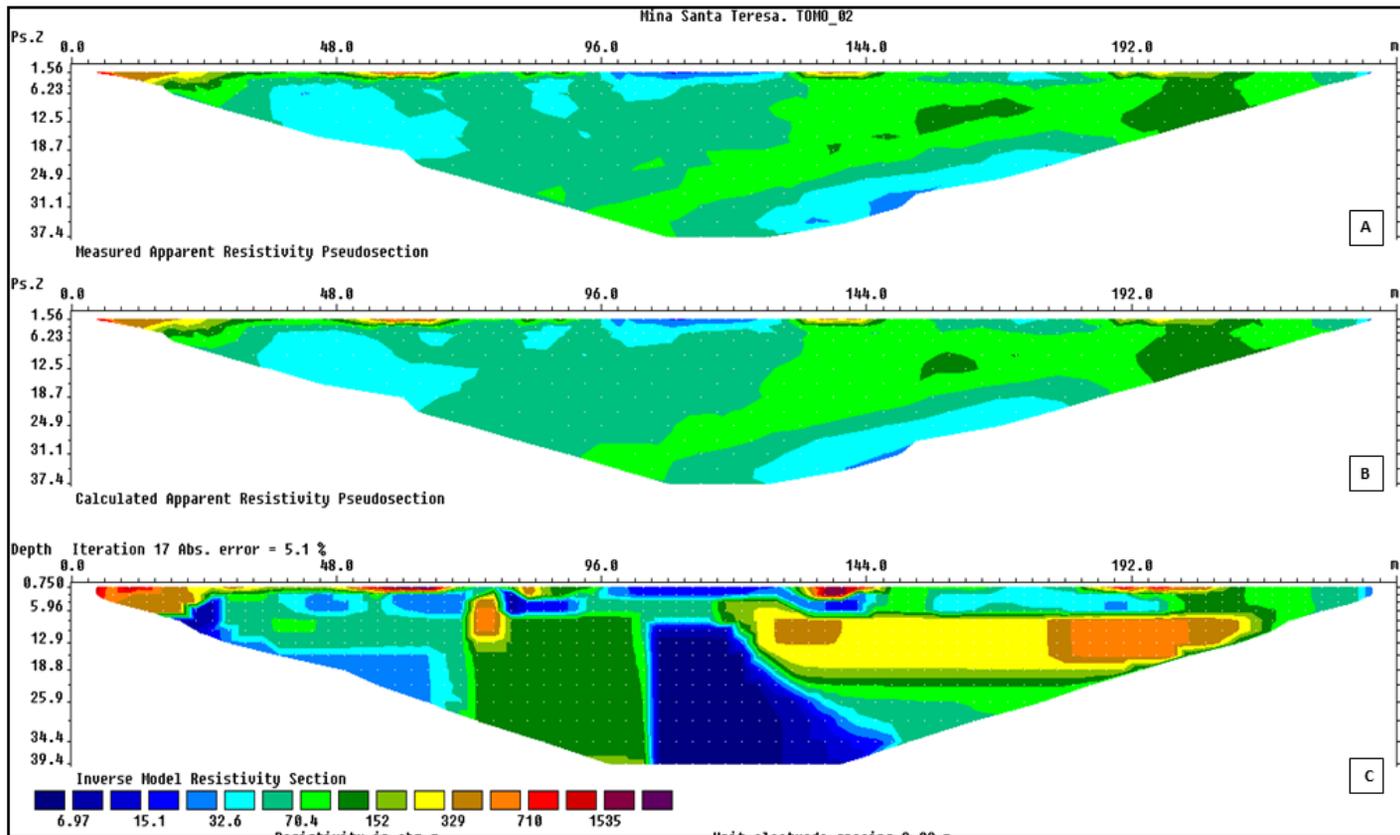
Las técnicas de inversión para datos 2D pueden dividirse en dos clases, dependiendo del tiempo de computo necesario¹¹⁴ (Loke y Barker, 1996). La primer clase es el resultado de tiempo modesto de cálculo para un modelo de datos de estructuras simples tales como *horst* y canales (Olayinka, 1988), cuerpos elípticos (Mundry y Homilus, 1972) o un límite ajustable entre varias capas homogéneas (Lee, 1972). La segunda clase se utiliza para casos donde existe mayor complejidad de estructuras geológicas, en la cual se divide al subsuelo en una serie de bloques rectangulares y utiliza la técnica de optimización no lineal para mejorar el modelo inicial (Loke y Barker, 1996). Esta técnica de optimización no lineal de mínimos cuadrados se rige mediante el uso de un factor de amortiguamiento (Sasaki, 1992).

¹¹⁴ LOKE, M. H. (2001). Tutorial 2D y 3D electrical imaging survey. Geotomo software, Malasia

Teniendo en cuenta la geología del área de estudio se empleó la inversión de segunda clase, es decir, el terreno fue discretizado en bloques trabajando con elementos finitos (por tener topografía irregular). Posteriormente, el programa genera un modelo de resistividades, calcula el modelo aparente con el medido en campo, luego realiza un proceso iterativo con el fin de encontrar el modelo de resistividades reales, tal que la diferencia entre el modelo de resistividades aparentes calculado y el medido sean mínimos. El criterio de convergencia del proceso está relacionado con el cálculo del error cuadrático medio (RMS), determinado entre los datos experimentales (datos de campo) y la respuesta del modelo deducido. Cuando se fije en un valor menor al 10% se considera que el ajuste entre los datos y los resultados es óptimo (GEOTOMO SOFTWARE, 2013).

Los resultados de los datos procesados en el software de Geotomo (RES2INV) son tres imágenes para cada perfil de resistividad. En la primera imagen se muestra la Pseudosección de resistividades aparentes medida en campo, la siguiente es la pseudosección de resistividad aparente calculada por el ordenador y la última imagen es la distribución de resistividades real con respecto a la profundidad verdadera. En la **Figura 49** se presenta el ejemplo con la tomografía ST-2.

Figura 49. Resultados del proceso de inversión en la TRE ST-2. A) Pseudosección de resistividades aparentes medida en campo. B) Pseudosección de resistividad aparente calculada. C) Distribución de resistividades reales. Valores de resistividad reportados en Ohm.m.



4.4.3 Resultados. Finalizado el procesamiento, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla donde se evidencia la profundidad alcanzada y el error obtenido para cada perfil.

Tabla 11. Características de las tomografías de resistividad eléctrica.

Nombre	Longitud (m)	Espaciamiento entre electrodos (m)	Profundidad alcanzada (m)	RMS - Error (%)
LA EMILIA 1	280	3.5	48	3.8
LA EMILIA 2	320	4	52	8
DON MARCO	400	5	68	3.6
SANTA TERESA 1	160	2	25	3.1
SANTA TERESA 2	240	3	38	5.1

Los modelos de resistividades reales incluida la topografía se presentan de la **Figura 50** a la **Figura 59**.

Figura 50. Modelo de resistividades reales incluida la topografía para la TRE ST-1 obtenidas después del proceso de inversión.

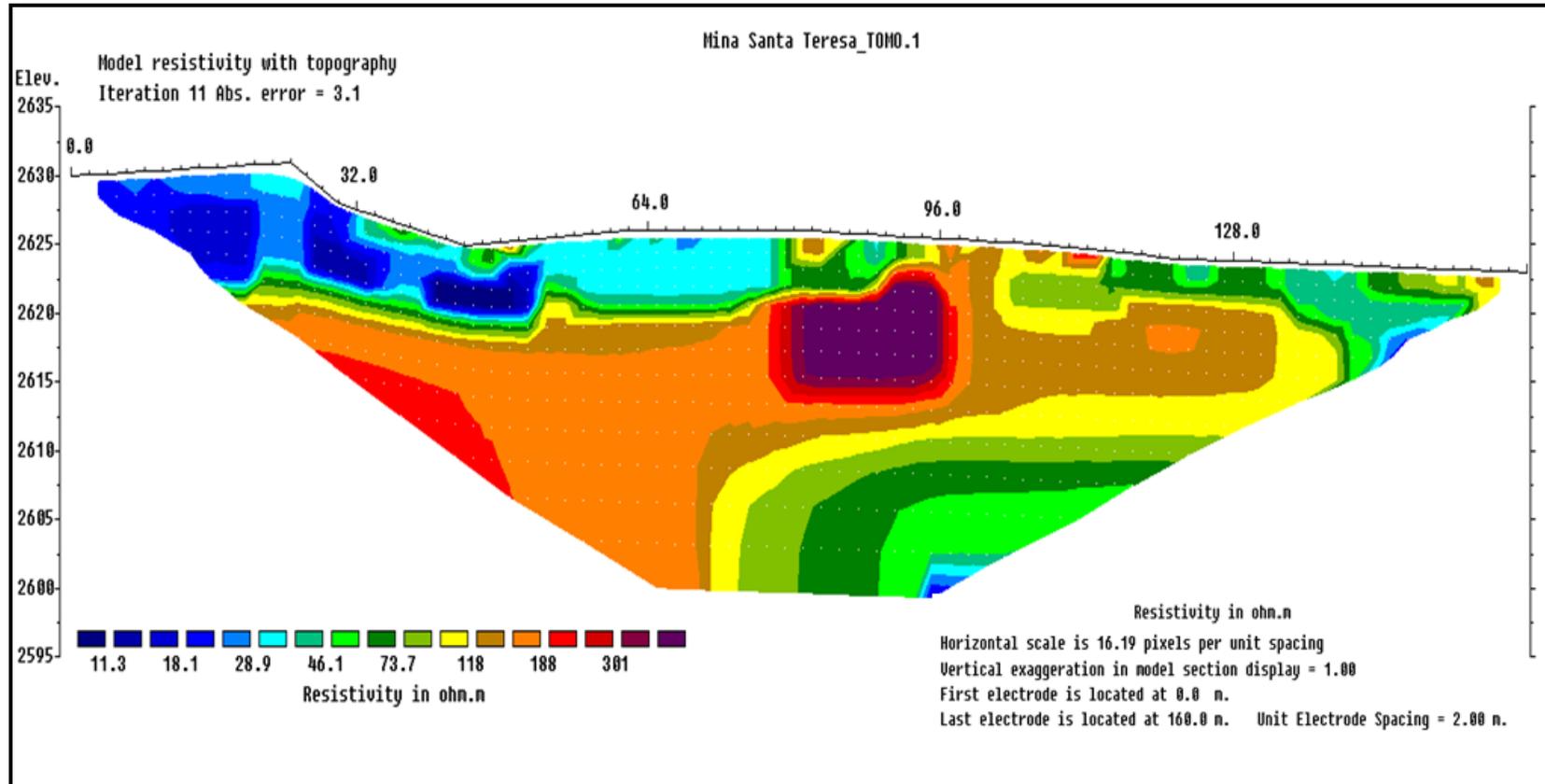


Figura 51. Modelo de resistividades reales incluida la topografía para la TRE ST-2 obtenidas después del proceso de inversión.

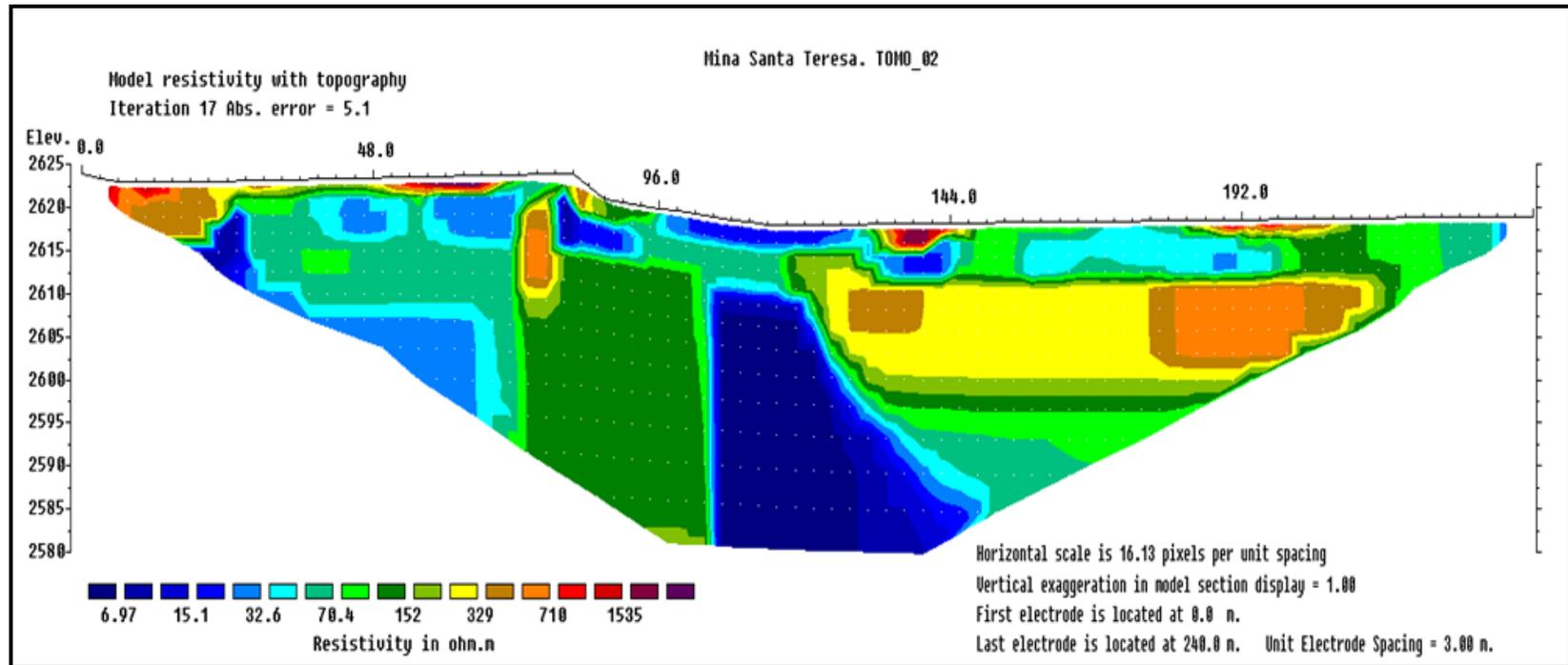


Figura 52. Modelo de resistividades reales incluida la topografía para mina La Emilia-1 obtenidas después del proceso de inversión.

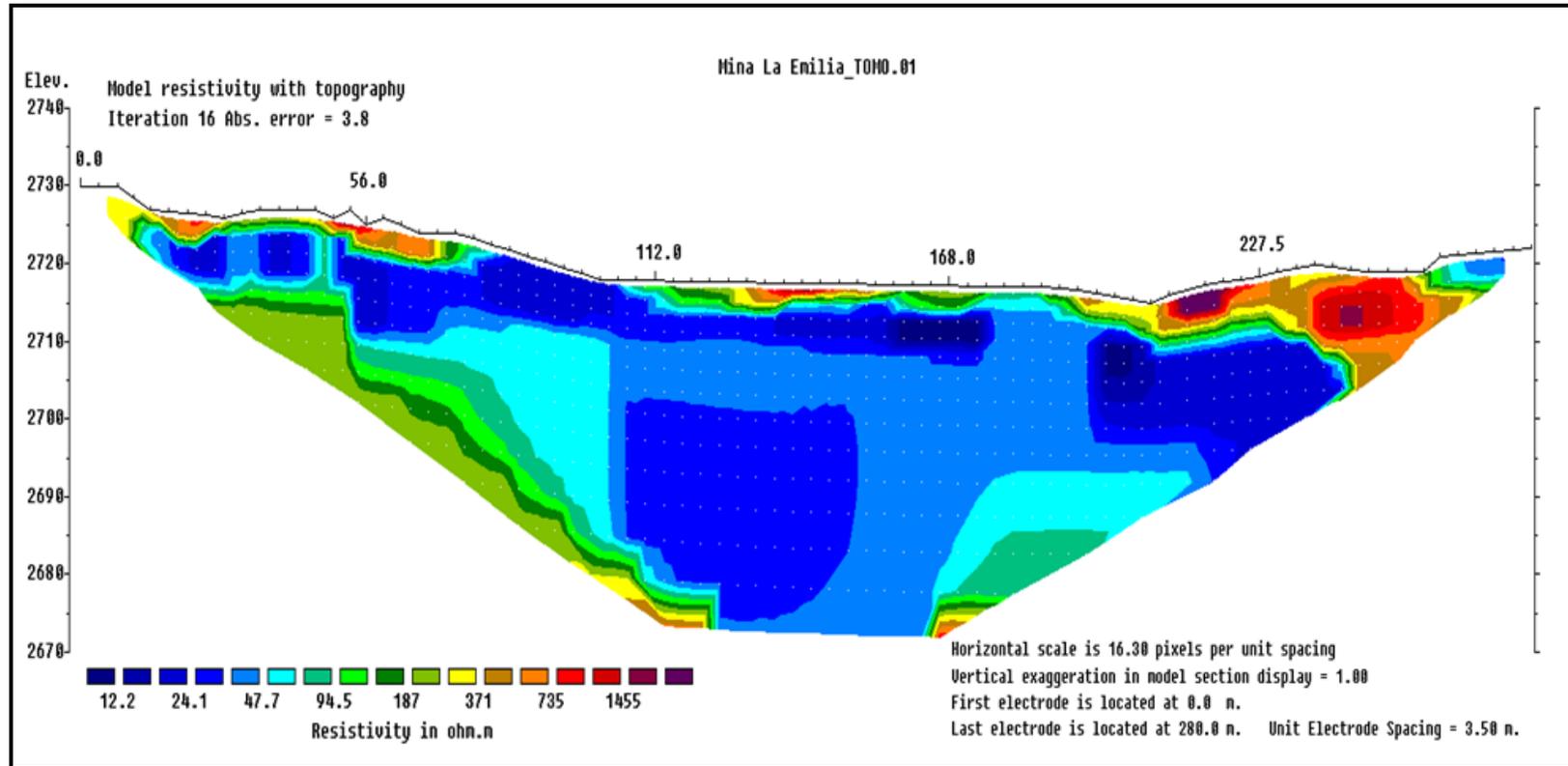


Figura 53. Modelo de resistividades reales incluida la topografía para mina La Emilia-2 obtenidas después del proceso de inversión.

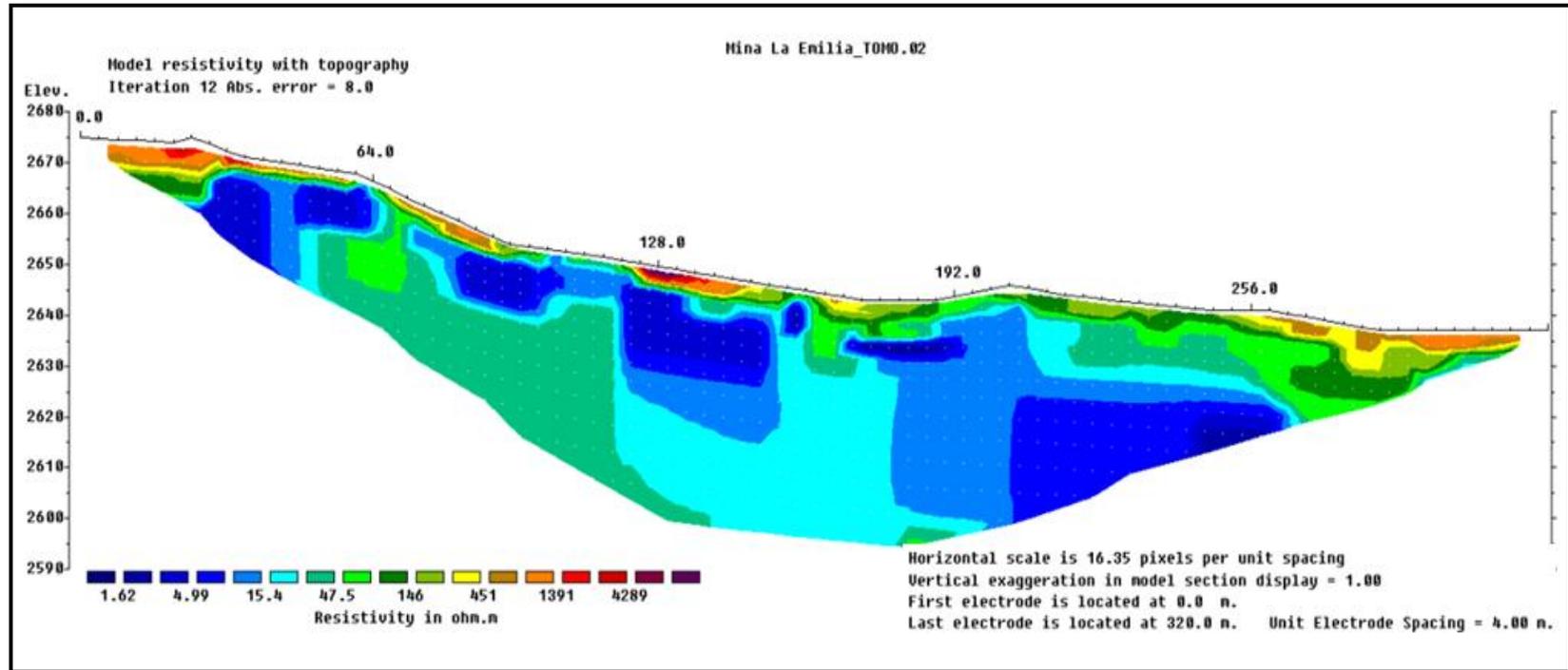
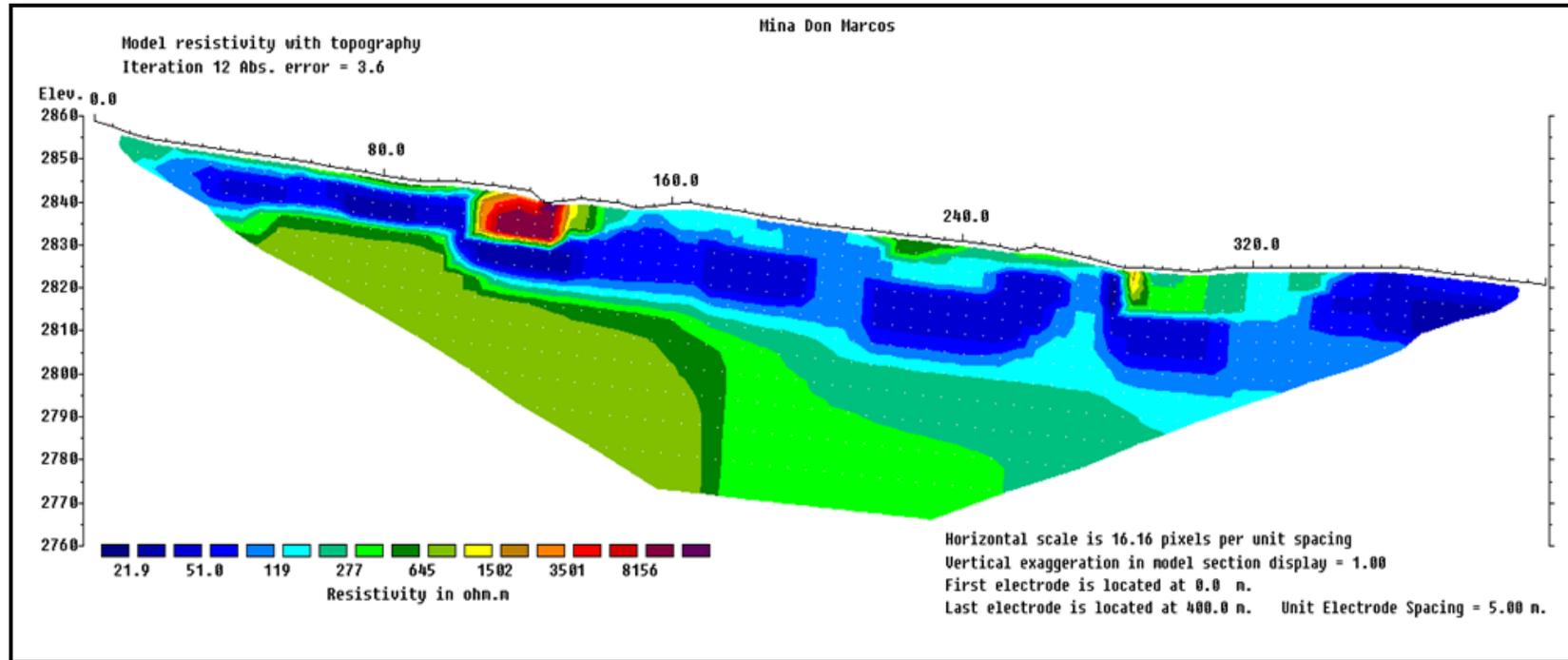


Figura 54. Modelo de resistividades reales incluida la topografía para la mina Don Marcos obtenidas después del proceso de inversión.



4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

4.5.1 Análisis de resultados. A partir de los perfiles geoelectricos generados con los sondeos, se exportaron los datos para graficarlos en el *software Surfer* usando interpolación por el método de *Krigging*, con el fin de obtener el contorneo de las resistividades reales y facilitar la interpretación de las secciones. A partir de estos resultados, se obtuvieron los perfiles presentados en las siguientes imágenes (Figura a

Figura) donde se observó en términos generales que los valores de resistividad más altos siempre están suprayaciendo los valores de resistividad más bajos como veremos más adelante, lo cual se atribuye a que en estos sectores las litologías encontradas corresponden a areniscas de grano medio a grueso conglomeráticas, hecho que aumenta los valores para la propiedad estudiada.

En el caso de las tomografías (**Figura 60 a Figura 64**) los valores de resistividad variaron entre 5 y 4000 Ohm.m, donde predominan valores de resistividad bajos y medios. Los valores de resistividad más altos (>2000 Ohm.m) encontrados en superficie se generan a partir del contraste de resistividad en la zona superficial, los cuales son omitidos en la etapa de interpretación considerando que estos valores son la respuesta a la actividad antrópica llevada a cabo en esos sectores por la actividad minera.

El análisis de resultados partió de la correlación entre las resistividades y la litología que se pudo establecer con el SEV paramétrico, la litología descrita en las minas y el reconocimiento geológico general realizado en la zona de estudio integrado con la geología reportada en la zona y la correlación entre las dos técnicas empleadas. Dentro de los aspectos principales tenidos en cuenta para definir las unidades geoelectricas se encuentran los siguientes:

- En el SEV paramétrico se pudo observar que el valor de resistividad que caracteriza a la capa de arenas bituminosas intercalada con estratos de arcillolitas y lodolitas es igual a 261 Ohm.m, correspondiente a la Formación Picacho.
- La capa observada en la TRE ST1 que presenta resistividades entre 120 y 500 ohm.m puede correlacionarse con la capa de arenas bituminosas reportada en el SEV paramétrico.
- La bocamina 1 (M1) ubicada en la Mina Don Marcos permitió constatar que la anomalía observada en las perfiles P2 y P3, representa una zona de arenas bituminosas con alta impregnación asociada a valores entre 120 y 800 ohm.m.
- En la bocamina 2 (M2) se presenta una capa gruesa (10m aprox.) de arenisca blanco-amarillenta, friable que permite correlacionarla con valores de resistividad mayores a 1500 ohm.m.

De acuerdo a este análisis se definieron 5 unidades geoelectricas como se observa en la **Tabla 12**. Donde, la unidad geoelectrica con los valores de resistividad más baja está denominada como UG1 y representa un rango de resistividad entre 0 y 20 Ohm.m, mientras que la unidad geoelectrica con valores de resistividad entre 20 y 120 Ohm.m es designada como UG2. La unidad geoelectrica con valores de resistividad media (entre 120 y 800 Ohm.m) es denominada UG3. Por último la unidades geoelectricas que representa los valores de resistividad más altos (mayores a 800 Ohm.m) han sido designadas como UG4 (800 a 2000 ohm.m) y UG5 (>2000ohm.m).

Tabla 12. Definición de unidades Geoeléctricas

Unidad Geoeléctrica	Resistividad (Ωm)
UG1	5 a 20
UG2	20 a 120
UG3	120 a 800
UG4	800-2000
UG5	>2000

Definidas las unidades geoeléctricas se procede a presentar la interpretación de los perfiles geoeléctricos obtenidos con los SEV de detalle y las tomografías, los cuales son mostrados como imágenes de la variación de resistividad real en profundidad y extensión.

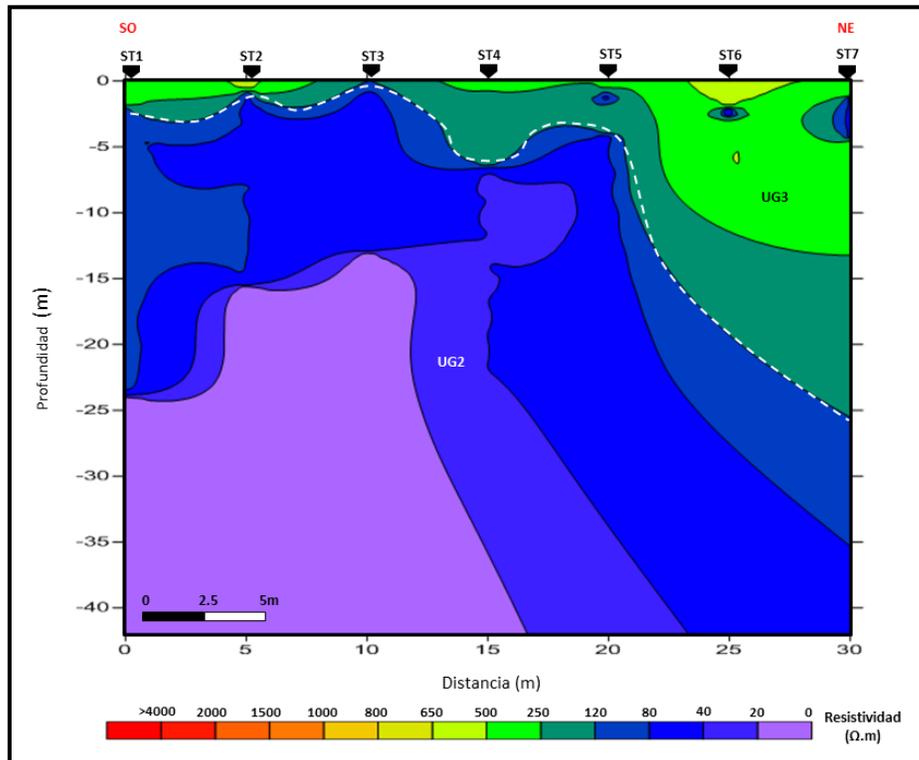
4.5.2 Interpretación geoeléctrica. En primera instancia se presentan la interpretación de las secciones geoeléctricas obtenidas con los sondeos y posteriormente las tomografías.

4.5.2.1 Interpretación geoeléctrica de los perfiles realizados con los SEV

- **Mina Santa Teresa**

En la **Figura** se observa una capa casi horizontal de 1 a 5 metros aproximadamente de espesor que cubre la parte superior del corte y presenta mayor espesor hacia el costado nororiental con espesores entre 15 y 25 metros, con valores de resistividad entre 120 y 650 Ohm.m, representativos de la UG 3. Adicionalmente, se observa una anomalía vertical con valores entre 1 y 120 Ohm.m característicos de la unidad UG 2 que afecta la geometría de las unidad suprayacente como se observa en la **Figura 55**.

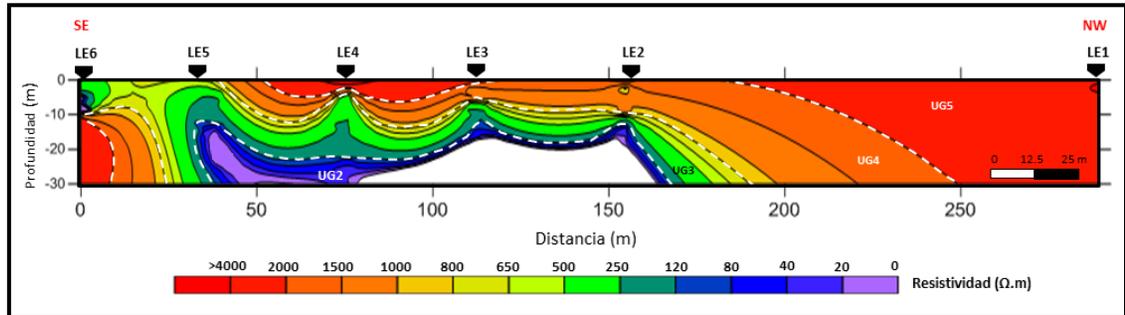
Figura 55. Modelo geoelectrico interpretado para la mina Santa Teresa donde se identifican 2 unidades (UG2 y UG3).



- **Mina La Emilia**

En la **Figura** se presenta el perfil geoelectrico obtenido en la mina La Emilia, donde predominan dos unidades con valores de resistividades mayores a 800 ohm.m que representan las unidades UG4 y UG5, seguidas por una capa con resistividades entre 120 y 800 ohm.m. Infrayace una capa con resistividades medias características de la UG3. Las capas inferiores tienen los valores más bajos de resistividad correlacionables con la unidad UG2. Las capas presentan una inclinación hacia el noroeste como se observa en la figura desde el SEV LE5 al LE2, mientras el margen izquierdo del perfil representa una anomalía vertical con valores de resistividad medio a altos característico de las unidades UG4 y UG5.

Figura 56. Modelo geoelectrico interpretado para la mina La Emilia donde se identifican 4 unidades.



- **Mina Don Marcos**

En el sector denominado Mina Don Marcos, se presentan los 3 perfiles geoelectricos realizados en las **Figura 57**, **Figura 58** y **Figura 59**. Donde se evidencia un predominio de las unidades UG3 y UG4 con resistividades que abarcan desde 120 a 2000 ohm.m distribuidas a lo largo de los perfiles. Mientras la unidad con resistividad baja (< 120 ohm.m) es característica de la unidad UG2 y está presente solo en dos sectores de los perfiles e infrayece las demás unidades.

Figura 57. Modelo geoelectrico interpretado para el perfil P1 en la mina La Emilia, donde se identifican 3 unidades.

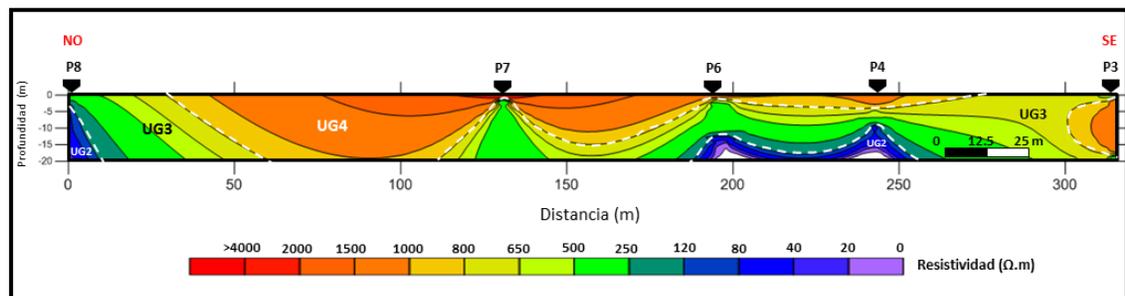


Figura 58. Modelo geoelectrico interpretado para el perfil P2 en la mina La Emilia, donde se identifican 3 unidades. M1 y M2 corresponden a dos bocaminas proyectadas sobre el perfil y se encuentran a 35 y 30 metros de distancia respectivamente.

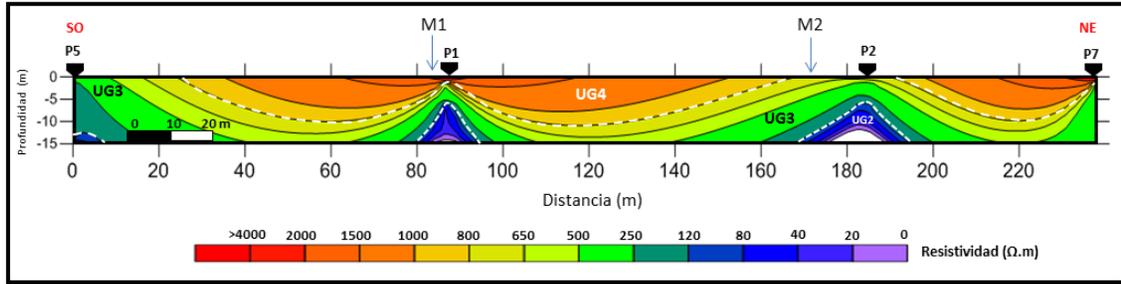
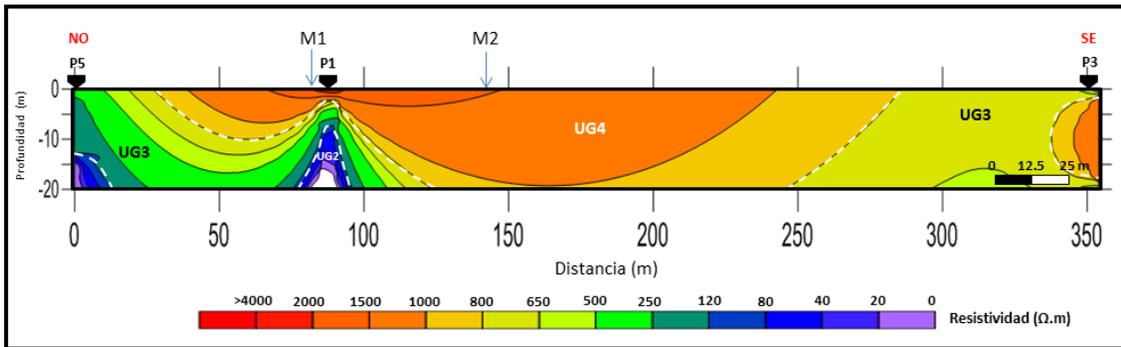


Figura 59. Modelo geoelectrico interpretado para el perfil P3 en la mina La Emilia, donde se identifican 3 unidades. M1 y M2 corresponden a dos bocaminas proyectadas sobre el perfil y se encuentran a 35 y 22 metros de distancia respectivamente.



Las **Figura 58** y **Figura 59** presentan la proyección sobre los perfiles de las bocaminas M1 y M2 permitiendo visualizar que la anomalía observada en los perfiles P2 y P3 correspondiente al SEV P1, representa una zona de arenas bituminosas con alta impregnación y por lo tanto está asociada a la unidad UG3. Adicionalmente, en la bocamina (M2) se presenta una capa gruesa (10m aprox.)

de arenisca blanco-amarillenta, friable que permite correlacionarla con la unidad UG4. En esta bocamina se encontró una capa de arcilla masiva color verde infrayaciendo la unidad UG4; esta capa presenta similitud con la capa de arcillas verdes encontrada en la mina la Emilia, la cual actúa como roca sello; además, en el momento de la extracción de este material de la bocamina, la roca emanaba un fuerte olor a hidrocarburo, por lo que se presume que debajo de esta capa se podrían encontrar las arenas bituminosas.

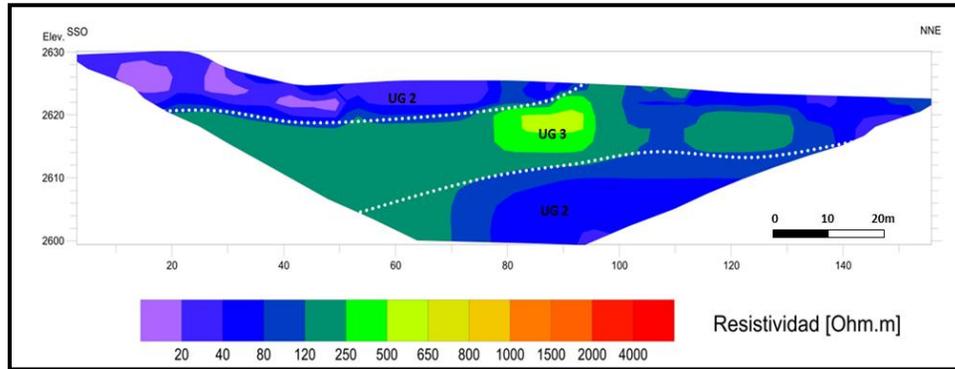
4.5.2.2 Interpretación geoelectrica de las tomografías: A continuación se presentan los perfiles geoelectricos obtenidos donde la elevación está dada en metros y la resistividad en Ohm.m.

- **Mina Santa Teresa**

En la TRE ST-1 (

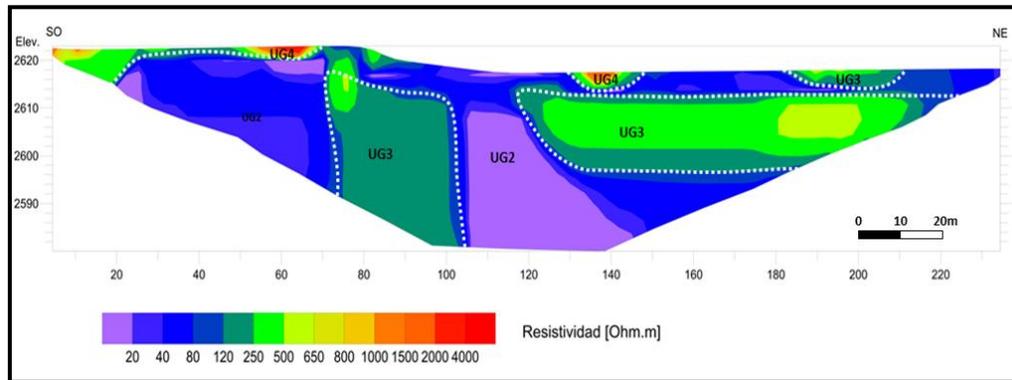
Figura) se observa principalmente una capa con valores de resistividad entre 120 y 500 Ohm.m correspondiente a la UG 3, la cual exhibe una leve inclinación hacia el SO, suprayacida e infrayacida por dos capas correspondientes a la unidad UG2 con valores entre 20 y 80 Ohm.m.

Figura 60. Distribución de las unidades geoelectricas en la TRE Mina Santa Teresa -1.



La TRE ST-2 (**Figura 61**) exhibe dos anomalías verticales, la primera se ubica entre $X=70$ m y $X=105$ m, la cual posee valores de resistividad alrededor de los 140 Ohm.m, correspondiente a la UG 3; y la segunda se ubica entre $X=105$ m y $X=150$ m con valores de resistividad muy bajos (alrededor de los 5 Ohm.m), representativos de la UG 1. Adicionalmente se observa una capa horizontal de 18 metros de espesor en el costado nororiental, ubicada a 5 metros de profundidad, con valores de resistividad entre 120 y 500 Ohm.m, representativos de la UG 3. Adicionalmente, existe un rango de resistividad, característico de la UG 2, con valores entre 40 y 80 Ohm.m, el cual se encuentra distribuido a lo largo de toda la imagen. Por último, algunas anomalías en forma de capas horizontales se logran observar en superficie, las cuales poseen un rango muy amplio de resistividad (120 – 2000 Ohm.m).

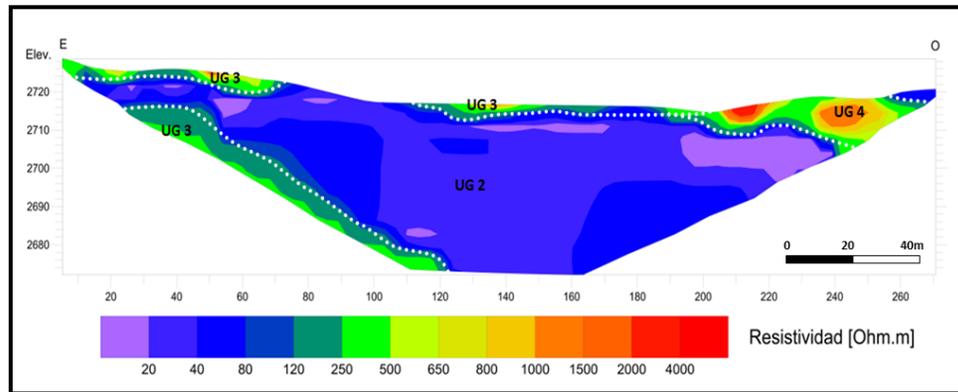
Figura 61. Distribución de las unidades geoelectricas en la TRE Mina Santa Teresa -2.



- **Mina La Emilia**

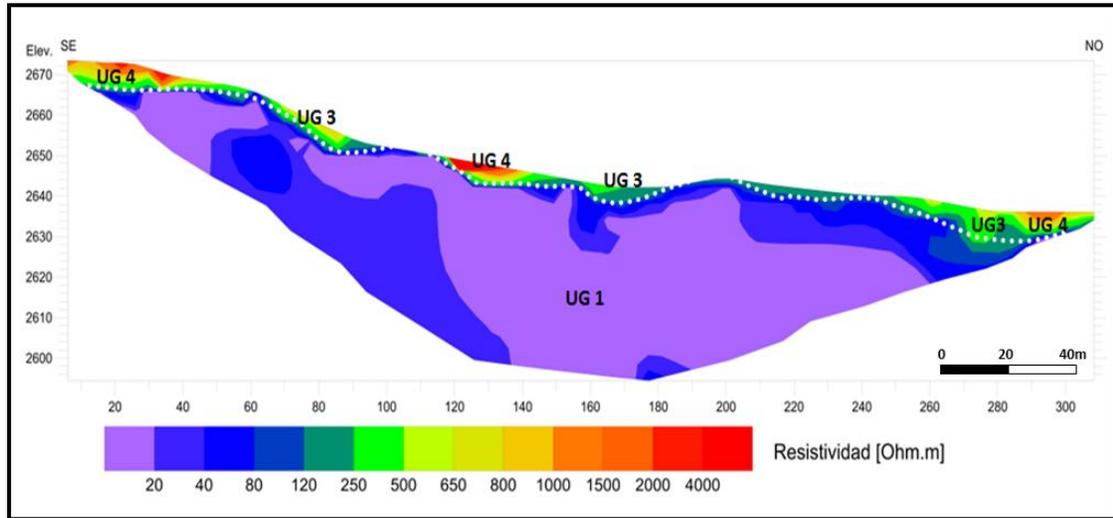
En la TRE LE-1 (**Figura 62**) predomina la unidad geoelectrica UG 2 con valores de resistividad entre 20 y 40 Ohm.m, la cual está distribuida a lo largo de toda la imagen. Adicionalmente, hacia el extremo oriental se observa una capa con valores de resistividad entre 120 y 500 Ohm.m, correspondiente a la UG 3 con una inclinación hacia el oeste; en la superficie se observa una capa discontinua con valores de resistividad similares y un espesor máximo de 5 metros. Hacia el costado occidental se observa una capa con valores de resistividad entre 800 y 1500 Ohm.m correspondiente a la UG 4 con una inclinación hacia el oeste.

Figura 1262. Distribución de las unidades geoelectricas en la TRE Mina La Emilia -1.



La TRE LE-2, como se muestra en la **Figura 63** representa la imagen con mayor homogeneidad. En ésta se observa como la unidad geoelectrica UG 1 predomina a lo largo de toda la imagen, con los valores de resistividad más bajos reportados en el presente estudio (5 – 20 Ohm.m). Adicionalmente, en superficie se observa una capa discontinua con un amplio rangos de los valores de resistividad los cuales varían entre 120 y 2000 Ohm.m (UG 3 – UG 4), con un espesor máximo de 7 metros.

Figura 63. Distribución de las unidades geoelectricas en la TRE Mina La Emilia -2.

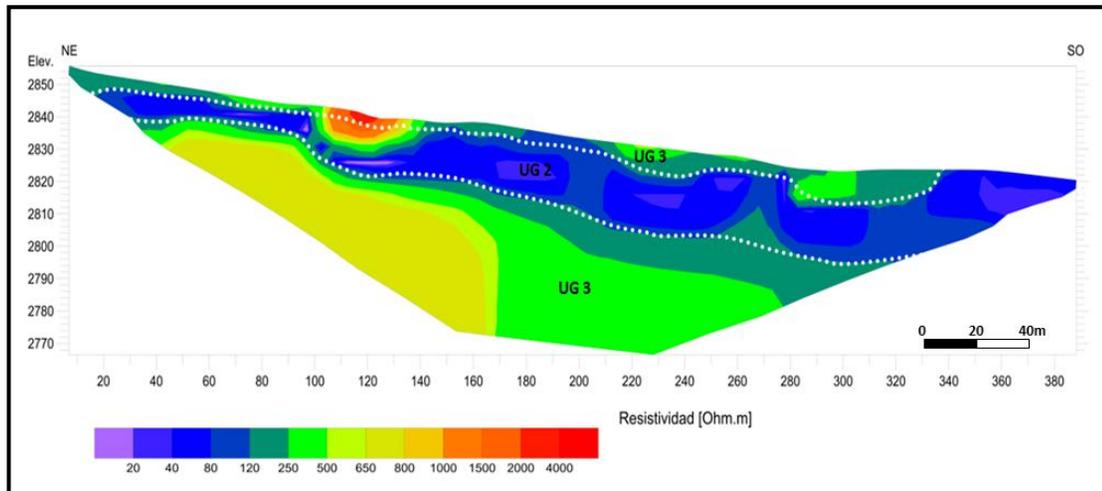


- **Mina Don Marcos**

En la TRE realizada en la mina Don Marcos el efecto del post-procesamiento de los datos de resistividad fue perceptible, reflejado en la anomalía de resistividad muy alta ubicada en la posición X=110 m, la cual fue originada por el contraste de resistividad existente en superficie. Este dato es evidentemente anómalo y fue omitido en la etapa de interpretación.

En la TRE DM-1 se identifican dos unidades geoelectricas, como se observa en la **Figura 64**. En la superficie se aprecia una capa de valores de resistividad entre 120 y 500 Ohm.m correspondientes a la UG 3, con un espesor máximo de 10 metros. Adicionalmente, se pueden observar dos capas, de espesor variable con una inclinación hacia el SO. La capa suprayacente posee valores de resistividad entre 40 y 80 Ohm.m propios de la UG 2 y la capa infrayacente posee valores de resistividad entre 250 y 800 Ohm.m característicos de la UG 3.

Figura 64. Distribución de las unidades geoelectricas en la TRE Mina Don Marcos-1.



4.5.3 Interpretación geológica. Una vez generados los modelos geoelectricos del subsuelo se continúa con esta etapa que debe apoyarse con la información geológica disponible. Además, se debe considerar que las anomalías geofísicas se interpretaron en términos de modelos geoelectricos simplificados, suponiendo que las propiedades físicas son homogéneas dentro de cada uno de los cuerpos (Barker, 1992 en Nely, 2010). 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.

A partir del análisis de la información geológica disponible del área de estudio y de la geología local predominante en cada una de las minas, se pudo establecer que las condiciones geológicas en el área corresponden a una sucesión sedimentaria compuesta básicamente por la intercalación de estratos de areniscas, arcillolitas y lodolitas, correspondientes a las formaciones geológicas Picacho y Concentración. Estas formaciones son distinguidas por su ambiente de depositación, de tipo fluvial y lagunar continental a marino cenagoso respectivamente, lo cual controla las

características litológicas y estructuras sedimentarias de las rocas, así como su expresión geomorfológica.

Según la descripción geológica señalada en el capítulo geología y las observaciones en campo, las formaciones Picacho y Concentración están compuestas por una intercalación de areniscas, arcillolitas y lodolitas, las cuales pueden diferenciarse entre sí por la relación que conservan los espesores de los estratos que las conforman. En la Formación Concentración los estratos de arcillolitas y lodolitas poseen un espesor mayor a las capas de areniscas. Mientras en la Formación Picacho predominan las areniscas, sin embargo se pueden diferenciar cuatro tipos de secuencias, la primera se presenta en las capas de arcillolitas con intercalaciones de areniscas donde predominan las arcillas, la segunda secuencia está representada por capas de areniscas con intercalaciones de arcillas, donde prevalecen las areniscas y localmente pueden encontrarse niveles conglomeráticos; la tercera unidad se diferencia por presentar areniscas blancas a amarillentas de grano medio a grueso friables y la cuarta unidad está representada por areniscas de grano medio a grueso, conglomerática, mal seleccionadas y friable.

Teniendo en cuenta la descripción litológica de la geología en las minas y en general del área de estudio, se pueden correlacionar los valores de resistividad representados por las unidades geoelectricas descritas anteriormente con la geología. De esta manera, se establece la correlación geológica – geoelectrica como se indica en la **Tabla 13**, *para lo cual se empleó la nomenclatura expuesta en la plancha geológica 191 del SGC (Renzoni et. el., 1998) para las formaciones geológicas, en este caso la Formación Picacho (Tp) y Formación Concentración (Tc) seguida por la litología que predomina y caracteriza cada una de las capas identificadas.*

Tabla 13. Correlación geoelectrica - geología

Unidad Geoelectrica	Interpretación geológica	Nomenclatura
UG1 (5 a 20 Ω m)	Fm. Concentración: Lodolitas y arcillolitas con intercalaciones de areniscas. $E_{sp_{arc-lod}} > E_{sp_{are}}$	Tc
UG2 (0 a 120 Ω m)	Fm. Picacho: Arcillolitas y/o limolitas con intercalaciones de areniscas. $E_{sp_{arc-lim}} > E_{sp_{are}}$	Tp_arc
UG3 (120 a 800 Ω m)	Fm. Picacho: Areniscas grano fino a medio con intercalaciones de arcillolitas. Localmente pueden encontrarse niveles conglomeráticos. $E_{sp_{are}} > E_{sp_{arc}}$. Secuencia con probabilidad de hallar arenas bituminosas.	Tp_are
UG4 (800 a 2000 Ω m)	Fm. Picacho: Areniscas blancas a amarillentas de grano medio	Tp
UG5 (> 2000 Ω m)	Fm. Picacho: Areniscas de grano grueso conglomerática, mal seleccionada.	Tp_cong

Finalmente, a partir de la correlación planteada en la **Tabla 13** y la definición del rango de resistividad asociado a los yacimientos de arenas bituminosas, se realizó la interpretación geológica para cada uno de los perfiles.

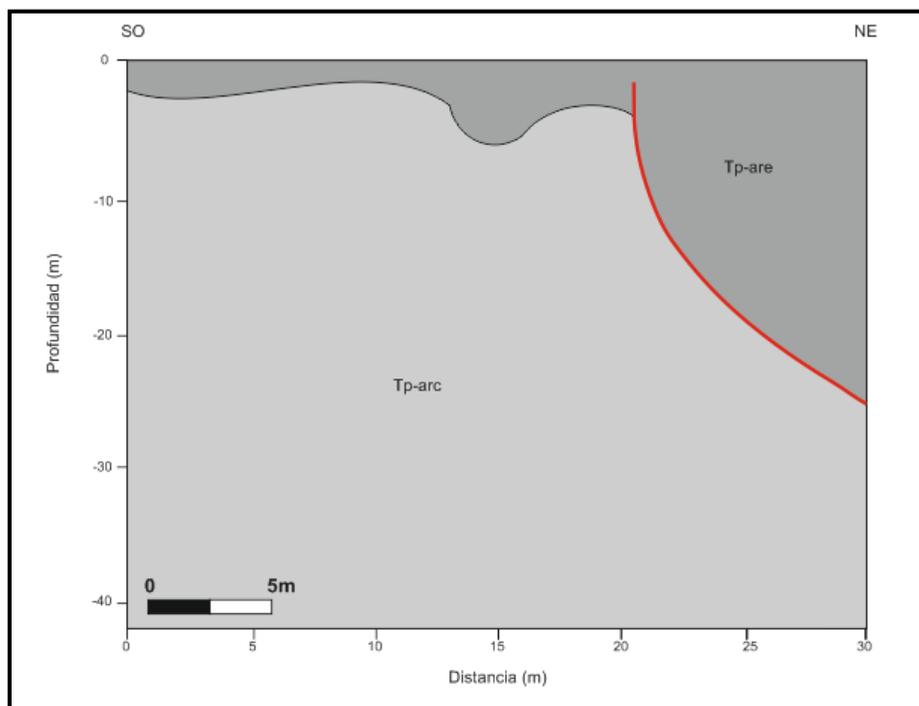
4.5.3.1 Interpretación geológica de los perfiles realizados con los sondeos

- **Mina Santa Teresa**

En La **Figura 65** se presenta la distribución de las unidades geológicas interpretadas para el perfil de la mina Santa Teresa ubicada sobre rocas de la Formación Picacho. La unidad Tp-arc representa la secuencia de intercalaciones de areniscas y arcillolitas donde predominan las arcillolitas de mayor espesor suprayacida por la unidad Tp-are que representa la intercalación de areniscas y arcillas donde predominan las areniscas en estratos de mayor espesor, la cual se asocia con los yacimientos de arenas bituminosas. Así mismo se observa una falla

en el sector NE del perfil que podría ser una falla satélite de la falla principal del sector (Falla de Soapaga).

Figura 65. Modelo geológico interpretado para el perfil de la Mina Santa Teresa. La línea roja indica la presencia de una falla y se evidencia como consecuencia, el aumento de espesor de la capa Tp-are hacia el sector NE del perfil.

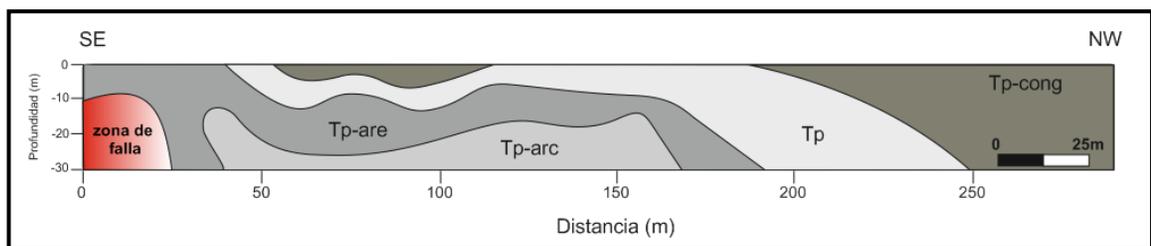


- **Mina La Emilia**

En la **Figura 66** se presenta el perfil geológico interpretado para la mina la Emilia. Las unidades predominantes corresponden a la unidad Tp caracterizada por areniscas blancas a amarillentas de grano medio y la unidad Tp-are, la cual se caracteriza por la intercalación de areniscas y arcillolitas donde los estratos de areniscas son de mayor espesor y por estar asociada con la posible presencia de

arenas bituminosa. Hacia el tope y el costado NW se presenta una capa designada como Tp-cong correlacionable con areniscas conglomeráticas. En cuanto a la unidad denominada Tp-arc, esta se observa en la parte inferior del corte y representa una capa donde predominan las arcillolitas en estratos de mayor espesor. En el sector SE del perfil se observó una anomalía en las resistividades y fue interpretada como una zona de falla, por lo tanto el tramo de la unidad Tp-are que queda expuesto en superficie y representa la capa de interés económico debe corroborarse en campo para determinar si efectivamente representa las arenas bituminosas o esta alteración es producto de la zona de falla.

Figura 66. Modelo geológico interpretado para el perfil de la Mina La Emilia. Obsérvese la zona de falla identificada al SE del corte así como los plegamientos de las capas que estarían relacionados a los esfuerzos tectónicos reportados en el área y la evidencia observada en campo.

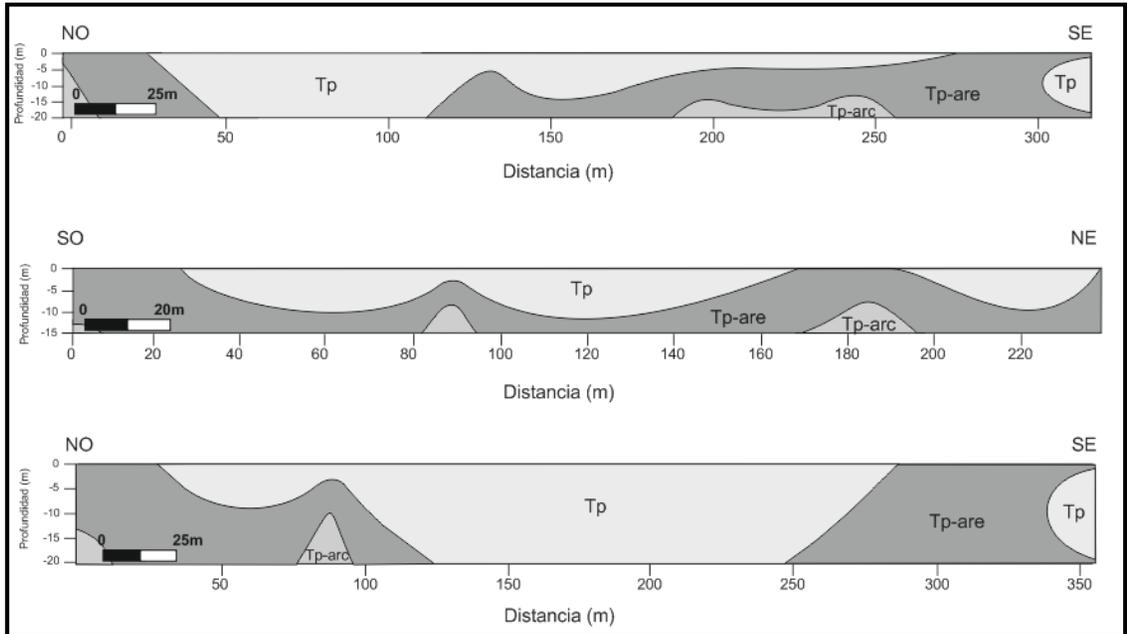


- **Mina Don Marcos**

La **Figura 67** presenta los perfiles realizados en la mina Don Marcos, donde se evidencia prevalencia de la unidad Tp que corresponde a areniscas de grano medio friables y Tp-are que representa intercalación de areniscas y arcillas donde las areniscas presentan mayor espesor y se asocia con la presencia de arenas bituminosas. Estas unidades son infrayacidas por la unidad Tp-arc, la cual se

caracteriza por la intercalación de areniscas y arcillas donde predominan las capas de arcilla.

Figura 67. Modelos geológicos interpretados para los perfiles P1, P2 y P3 de la Mina Don Marcos numerados de arriba a abajo.



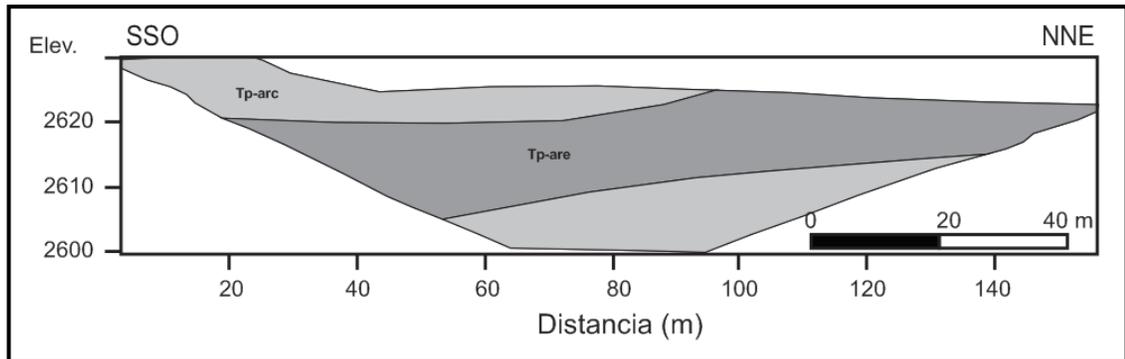
4.5.3.2 Interpretación geológica de las tomografías

- **Mina Santa Teresa**

La **Figura 68** muestra la distribución de las unidades geológicas en la TRE ST-1, ubicada sobre rocas de la Formación Picacho. La unidad Tp-are representa la intercalación de areniscas y arcillolitas, donde predominan las areniscas en estratos de mayor espesor, a la cual podrían asociarse los yacimientos de arenas bituminosas; infrayacida y suprayacida por la unidad Tp-arc, la cual representa la

secuencia de intercalaciones de areniscas y arcillolitas, donde predominan las arcillolitas en estratos de mayor espesor.

Figura 68. Perfil geológico interpretado para la TRE Mina Santa Teresa (ST-1).

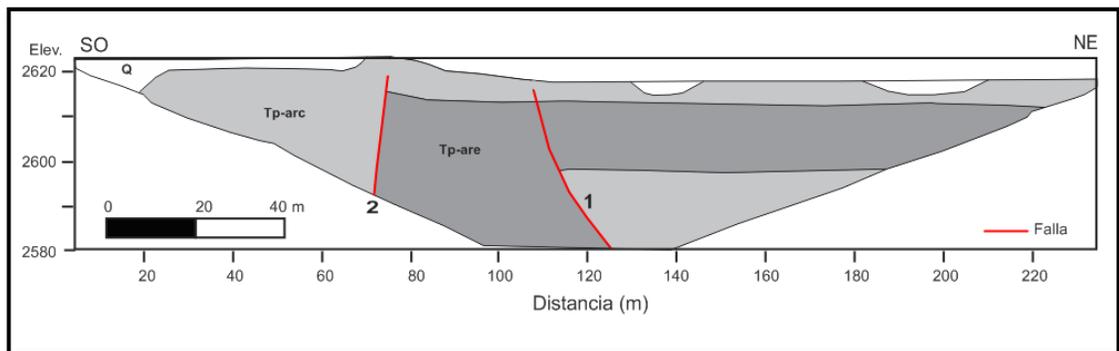


La **Figura 69** muestra la distribución de las unidades geológicas en la TRE ST-2, ubicada sobre rocas de la Formación Picacho. La unidad Tp-are representa la intercalación de areniscas y arcillolitas, donde predominan las areniscas en estratos de mayor espesor, a la cual podrían asociarse los yacimientos de arenas bituminosas; infrayacida y suprayacida por la unidad Tp-arc, la cual representa la secuencia de intercalaciones de areniscas y arcillolitas, donde predominan las arcillolitas en estratos de mayor espesor.

Adicionalmente, se pueden identificar dos anomalías verticales las cuales pueden correlacionarse con la existencia de dos fallas geológicas, como se observa en la **Figura 69**. Debido a la cercanía de esta tomografía a la Falla de Soapaga, es posible que estas fallas correspondan a fallas satélites o menores relacionadas con el tectonismo producido por esta falla de tipo regional. Así mismo, es posible observar que la falla (1) se encuentra relacionada a valores muy bajos de

resistividad, lo que puede ser explicado por la presencia de un flujo vertical de agua subterránea que mantiene lleno de agua el tajo adyacente a la zona de operación minera, el cual se observa en la **Figura 70**. Por último, se distingue una capa discontinua en superficie denominada Q, la cual representa los depósitos antrópicos producto de la operación minera en la zona.

Figura 69. Perfil geológico interpretado para la TRE Mina Santa Teresa (ST-2).



Por medio de la TRE ST-2 y el perfil obtenido con los SEV en la mina Santa Teresa se corroboró la existencia de la falla (1) como fue denominada, demostrando la buena correlación entre las dos técnicas empleadas. La falla 2 no pudo ser identificada con los SEV debido a que este perfil solo cubría un tramo de la TRE (de los 120 a 150 metros) con una longitud total de 30 metros.

Figura 70. Tajo lleno de agua adyacente a la zona de operación minera. Se observa el tajo adyacente a la zona de operación minera que se mantiene lleno de agua probablemente por el flujo vertical de agua subterránea relacionado a la falla descrita en la TRE ST-2.

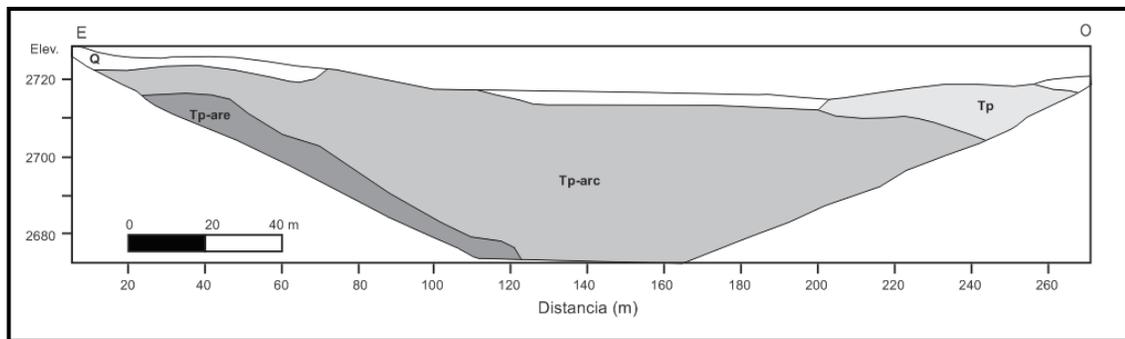


- **Mina La Emilia**

La **Figura 71** muestra la distribución de las unidades geológicas en la TRE LE-1, ubicada sobre las rocas de la Formación Picacho. La unidad que predomina en la TRE es la Tp-arc, la cual se caracteriza por la intercalación de areniscas y arcillolitas, donde predominan las arcillolitas en estratos de mayor espesor. La unidad Tp-are representa la secuencia de intercalación de areniscas y arcillolitas, con estratos de areniscas de mayor espesor, a la cual podrían asociarse los yacimientos de arenas bituminosas. Por su distribución en la TRE, esta unidad refleja su continuidad hacia profundidades mayores a las alcanzadas por el estudio. Además, se identifica la unidad Tp, la cual correspondería a las areniscas blancas amarillentas, de grano medio. Por último, se distingue una capa

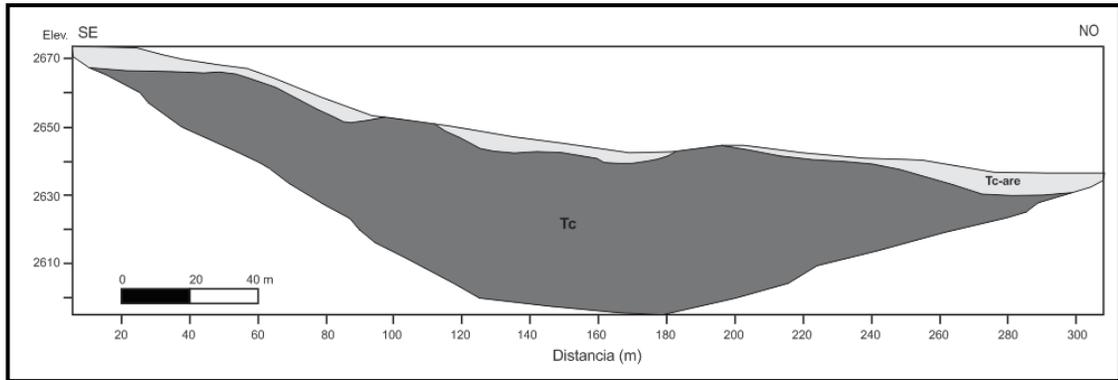
discontinua en superficie denominada Q, que representa los depósitos antrópicos producto de la operación minera en la zona.

Figura 71. Perfil geológico interpretado para la TRE Mina La Emilia (LE-1).



La **Figura 72** muestra la distribución de las unidades geológicas en la TRE LE-2, ubicada sobre rocas de la Formación Concentración. La unidad Tc representa las lodolitas y arcillolitas con intercalaciones de niveles de areniscas de esta formación, pero donde predomina el espesor de las arcillolitas. Además, se identifica una capa discontinua en superficie denominada Tc-are que corresponde a areniscas de la Formación Concentración y por los valores de resistividad reportados podría confundirse con las areniscas de la Formación Picacho.

Figura 72. Perfil geológico interpretado para la TRE Mina La Emilia (LE-2).



- **Mina Don Marcos**

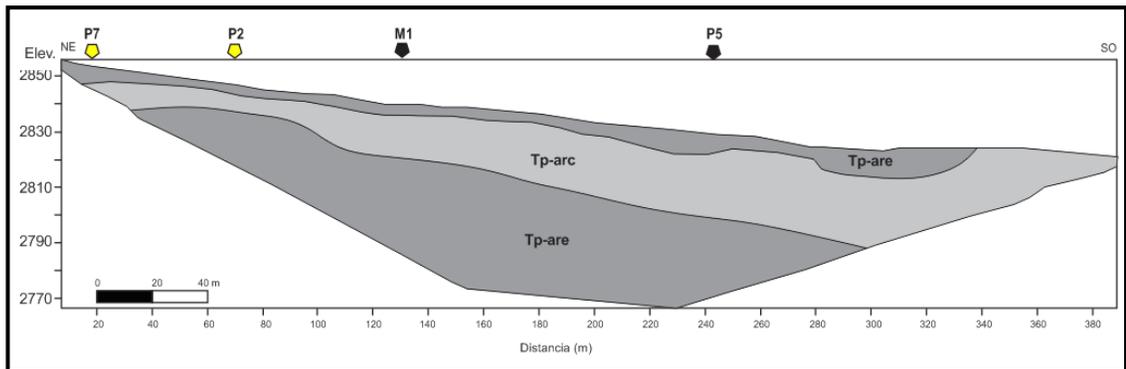
La **Figura 73** muestra la distribución de las unidades geológicas en la TRE DM-1, ubicada sobre las rocas de la Formación Picacho. La unidad Tp-are representa la intercalación de areniscas y arcillolitas, donde predominan las areniscas en estratos de mayor espesor. El incremento de los valores de resistividad (hasta 800 Ohm.m) podría estar relacionado a la presencia de niveles conglomeráticos, los cuales afloran en la zona norte – noreste de la mina. Se puede inferir que en esta secuencia se hallan los estratos más potentes de arenas bituminosas. Suprayaciendo esta secuencia se observa la unidad Tp-arc, la cual representa la intercalación de areniscas, lodolitas y arcillolitas, donde predominan las arcillolitas y lodolitas en estratos de mayor espesor.

Por último, se puede observar en superficie una capa con un rango de resistividad similar al designado para los yacimientos de arenas bituminosas asociados a la Formación Picacho y por lo tanto corresponde a la unidad Tp_are, su posición en superficie causa incertidumbre si en realidad representaba esta unidad, sin embargo al correlacionar la respuesta obtenida por los sondeos P7 y P2 proyectos sobre la tomografía y el SEV P5 localizado sobre el perfil, se tiene que:

- El SEV P7 reporta a partir de los 2 primeros metros una capa con resistividad de 474 ohm.m y espesor de 11 metros aprox.
- En el SEV P2, los 5 primeros metros presenta valores de resistividad entre 282 y 878 ohm.m correspondiente a las arenas con impregnación de bitumen, seguido por una capa de arcillolitas de 8 metros de espesor.
- El SEV P5 reporta 14m aprox. de una capa con resistividades entre 127 y 462 ohm.m representativas de la unidad Tp-are.

Con estos datos, la ubicación de la bocamina M1 sobre el perfil y la existencia de un rezumadero reportado hacia el SO del perfil (ver **Figura 43**), se pudo determinar que la capa detectada en superficie si correspondería a la unidad de interés económico.

Figura 73 Perfil geológico interpretado para la TRE Mina Don Marcos (DM-1). Se observan los sondeos P7 y P2 proyectados sobre la tomografía (puntos amarillos) y el SEV P5 y la bocamina M1 localizado sobre el perfil (puntos negros).



Finalmente, después de analizar la respuesta eléctrica obtenida con los SEV, las TRE y analizar las condiciones geológicas de las arenas bituminosas en el área, no pudo ser identificada con claridad la zona de saturación de agua; aunque se puede inferir que esta zona estaría representada por las unidades geoelectricas UG1 y UG2 debido a que estas unidades presentan valores inferiores a los 100 ohm.m, mientras las arenas bituminosas están representadas por valores entre 120 y 800 ohm.m característicos de la unidad UG3. Sin embargo, esta observación debe ser considerada con precaución debido a que el reservorio se encuentra en la zona de transición asociada con el contacto agua-aceite como se pudo apreciar en las minas y por lo tanto, la resistividad del reservorio puede disminuir^{115, 116}.

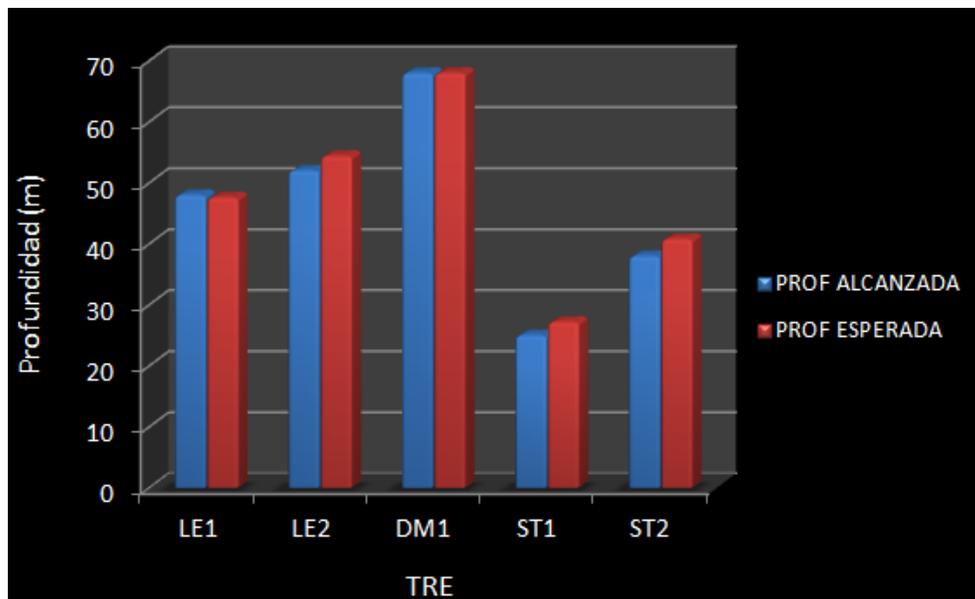
¹¹⁵ VOLD, I.E., ROTEVATN, A., HESTHAMMER, J. (2012). The effect of hydrocarbon saturation on resistivity distribution and CSEM response. *Marine and Petroleum geology* 38 (2012) 117-127.

¹¹⁶ ADEYEMI, AKINMOSIN ALADESANMI BADMUS Op. Cit

5. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS TÉCNICAS EMPLEADAS

A continuación se muestra una comparación de la calidad de los datos obtenidos con los SEV y las TRE. En la **Figura 74** se observa la profundidad esperada vs la profundidad alcanzada por cada una de las TRE; aquí se observa que la profundidad de investigación alcanzada aplicando esta técnica siempre estuvo muy cercana a la profundidad que se planeaba alcanzar, obteniendo diferencias que no superaron los 2.8 metros e incluso se obtuvo igual o mayor profundidad de investigación en las TRE DM1 y LE1 respectivamente. Los datos pueden ser consultados en la **Tabla 11** donde se presentan las características de cada una de las tomografías. Así mismo el porcentaje de error siempre estuvo por debajo del 10% garantizando la calidad de los datos.

Figura 74. Análisis de la profundidad de investigación obtenida con las TRE.



En cuanto a los resultados obtenidos por los SEV de detalle, en la **Figura 75** se presentan las profundidades de investigación esperada vs la profundidad alcanzada por cada uno de los SEV basado en los datos presentados en la **Tabla 8**. En la **Figura 76** se observa que en el 46% de los datos se obtuvo una diferencia entre la profundidad planeada versus la alcanzada entre 5 y 10 metros, seguida por sondeos donde la diferencia fue menor a los 5 metros y por último, el 23% de los sondeos tuvieron diferencias mayores a los 10 metros. Esto refleja la vulnerabilidad de los datos adquiridos con esta técnica ya que es más susceptible a cambios en la topografía y al continuo desplazamiento de los electrodos que por la manipulación del usuario puede influir en errores. En cuanto al ajuste entre los datos experimentales (datos de campo) y las curvas teóricas se obtuvo un porcentaje de error que oscilo entre 2.45 y 13.9%. Lo que demuestra que se tuvo un ajuste muy bueno y que a pesar de no alcanzar las profundidades deseadas en todos los casos, los datos indican una buena adquisición.

Figura 75. Análisis de la profundidad de investigación obtenida con los SEV de detalle.

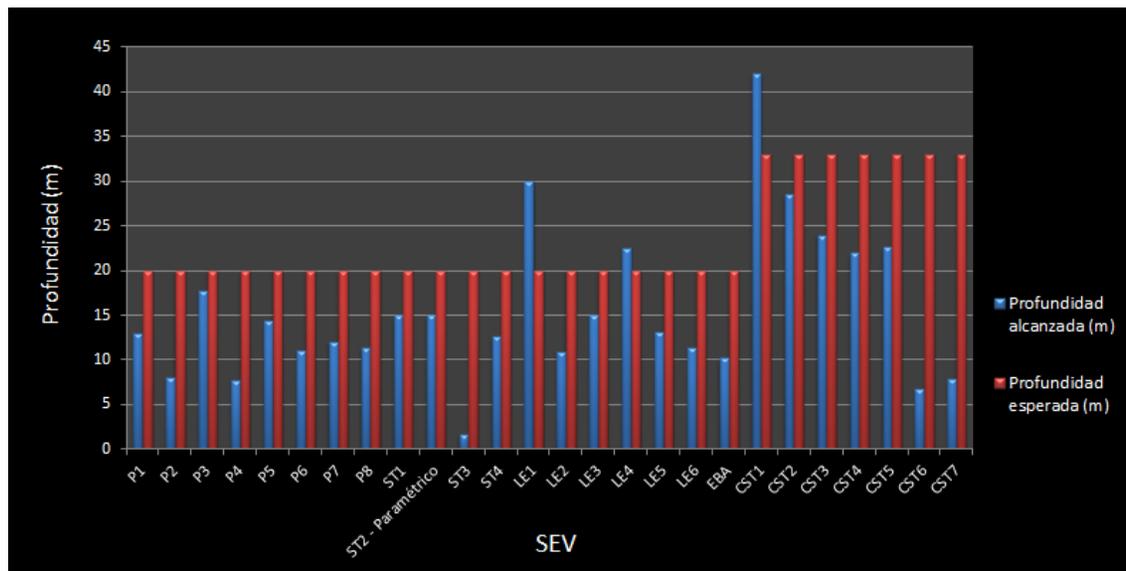
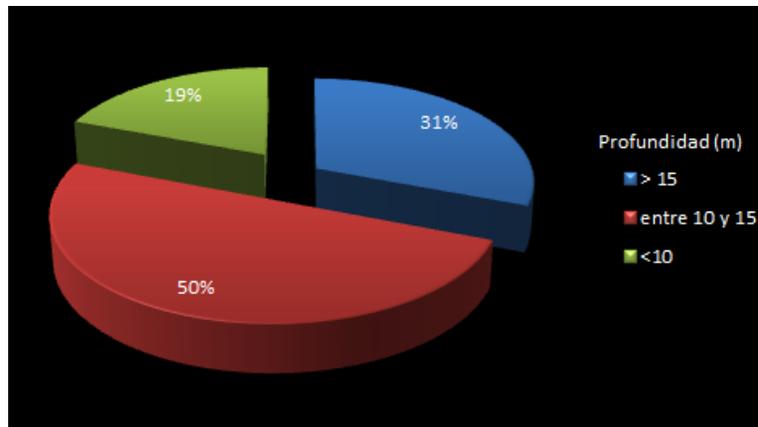


Figura 76. Distribución en porcentaje de los rangos de profundidad obtenida con los SEV.



Por lo tanto los datos obtenidos con las dos técnicas reflejan una tendencia más favorable a usar TRE, sin embargo los SEV son una herramienta válida y de menor costo para adquirir información.

6. CONCLUSIONES

- A partir de la resistividad eléctrica medida con los SEV y las TRE fue posible identificar estratos con presencia de arenas bituminosas, validando así, el uso de esta propiedad física para predecir la presencia de hidrocarburo en el subsuelo por medio de métodos geoelectricos, sin embargo debe aclararse que con el uso de estas técnicas se presentan limitaciones para abarcar grandes áreas como se pretendía inicialmente con los SEV generales.
- De acuerdo a la geología de la zona y propiedades petrofísicas de las arenas bituminosas presentes en Pesca, se tienen similitudes con los depósitos analizados en otros países. Estas características corresponden a tipo de cuencas *foreland*, régimen tectónico compresivo, profundidades someras, porosidades entre 16 y 35%, mientras la permeabilidad alcanza valores particularmente máximos entre los 5000 y 15000 mD en Canadá y Venezuela respectivamente, y el valor máximo presentado por este estudio para los depósitos del municipio de Pesca es de 10751 mD. Estableciendo que los yacimientos estudiados son análogos con Venezuela principalmente y Canadá.
- El rango de resistividad asociado a los yacimientos de arenas bituminosas de la Formación Picacho en la zona de estudio varía entre 120 y 800 Ohm.m, correspondiendo a estratos de arenas friables impregnados e intercalados con algunos niveles de arcillolitas y lodolitas que actúan como roca sello, así como niveles de arenas conglomeráticas con alta impregnación visual. Estos valores son correlacionables con los datos reportados para las arenas bituminosas de Canadá y Nigeria, las cuales presentan rangos entre 70 y 1800 Ωm^{117} ; 200 y

¹¹⁷ McCONNELL, GLENN, Op. Cit.

809 Ωm ¹¹⁸, 165 y 750 Ωm ¹¹⁹, 100 y 1000 Ωm ¹²⁰, 122 y 530 Ωm ¹²¹, entre 0 y 250 Ωm ¹²² y 900-1084 Ωm ¹²³.

- Los depósitos de arenas bituminosas tienen una orientación preferencial en sentido NE buzando al NW y pueden encontrarse desde superficie hasta una profundidad de 68 metros de acuerdo a la máxima profundidad alcanzada con las técnicas empleadas. Las capas establecidas como arenas bituminosas (Tp-are) presentan espesores aproximados de 7 a 10 metros en la mina La Emilia. En la mina Santa Teresa los espesores varían entre de 2.5 y 15 metros y en la zona de falla alcanza valores de hasta 30 metros, mientras en la mina Don Marcos presenta valores de 5 a 20 metros.
- Los yacimientos de arenas bituminosas se encuentran asociados predominantemente a la unidad Tp-are correspondiente a la unidad geoelectrónica UG3, sin embargo existe la posibilidad de encontrar estratos de arenas impregnados con hidrocarburos dentro de la unidad UG2, pero debido al reducido espesor de las arenas en comparación con las arcillolitas y lodolitas no representan un contraste de resistividad suficiente para ser detectados mediante las técnicas empleadas y/o espaciamiento de electrodos seleccionado.
- La profundidad de investigación en los SEV de detalle varió entre 7 metros con un error del 13,85% y 42 metros con un error del 12,7% para los SEV CST6 y CST1 respectivamente, los cuales representan el valor mínimo y máximo de esta adquisición. En general, el error oscilo entre 2,45 y 12,7% con un error promedio general del 7,35%. En el caso de las TRE, la profundidad oscilo entre

¹¹⁸ ODUNAIKE, IJEOMA, EDIGBE, BABATOPE Op. Cit.

¹¹⁹ Ibid

¹²⁰ COX, WILSON, AND ZHDANOV, RUDD WILSON, Op. Cit.

¹²¹ AMIGUN, ADELUSI, AKO Op. Cit

¹²² ADEYEMI, AKINMOSIN, ALADESANMI, BADMUS Op. Cit

¹²³ .Ibid

25 y 68 metros con un error entre 3.1% y 3.6% para las TRE ST1 y DM1 respectivamente, con un error promedio general de 4.72%.

- Finalmente con los datos obtenidos a partir de las TRE, SEV y la correlación geológica se generó un estudio base para futuras investigaciones en el sector, que será de gran importancia teniendo en cuenta que en la zona de trabajo la información preliminar es escasa. Además permitió entender el comportamiento de las resistividades en los yacimientos de arenas bituminosas y podría aplicarse el estudio de esta propiedad física en las otras regiones donde se ha identificado la necesidad de prospectar este tipo de yacimiento en el país, contribuyendo con el proceso exploratorio que adelanta la compañía patrocinadora de esta investigación (ICP-ECOPETROL) para enfocar los esfuerzos en la búsqueda de hidrocarburos no convencionales.

7. RECOMENDACIONES

- La ubicación y las limitaciones del área de estudio representado por un relieve escarpado, tectónica, permisos y la intervención antrópica, condicionaron la ubicación, extensión y separación de los electrodos de las TRE y los SEV. Por lo tanto y teniendo en cuenta la importancia económica que representa este tipo de yacimientos, se recomienda llevar a cabo estudios con mayor detalle que involucren simultáneamente estudios geofísicos (sísmica y sondeos transitorios electromagnéticos) con estudios sedimentológicos y petrofísicos que permitan analizar como varía la resistividad de acuerdo a la porosidad, permeabilidad, tamaño de grano, cementación, etc. Todo esto con el fin de estimar los recursos de hidrocarburo asociado a estos depósitos, teniendo en cuenta que podría ser económicamente viable su explotación y así contribuir con las reservas del país.
- Implementar la aplicación de técnicas geofísicas con geoquímica de superficie y análisis de imágenes satelitales para determinar patrones adicionales y características específicas de este tipo de yacimientos, con el objetivo de determinar la mejor combinación de herramientas que permitan tener mayor éxito en la búsqueda de este tipo de recursos disminuyendo el factor de riesgo en la etapa de exploración.
- Considerando la falta de información geológica específica en el área de estudio, se recomienda la perforación de por lo menos un pozo estratigráfico donde se corra un set de registros que permita amarrar la información generada con las características observadas en el núcleo de perforación y la respuesta de los registros.

- Adicionalmente, se propone realizar estudios en el sector oriental de la cuenca Llanos Orientales, considerando que es una cuenca tipo *foreland* y las rocas reservorio se acuñan contra el basamento como ocurre en Canadá (*Western Canadian Sedimentary Basin*), Venezuela (Cuenca Oriental), Estados Unidos (Cuenca Uinta) y China (cuenca Junggar) donde el hidrocarburo se encuentra como bitumen; por lo tanto es probable hallar arenas bituminosas en la Formación Carbonera en ese sector de la cuenca.

BIBLIOGRAFÍA

ADEYEMI, G., AKINMOSIN A. A., ALADESANMI A.O., BADMUS G. O. (2013). Geophysycal and sedimentological characterization of tar sand rich area in South-western Nigeria. Journal of environment and earth science. ISSN 2225-0948 (online). Vol. 3, No.14.

AKINMOSIN, A. A., OMOSANYA, K. O., IKHANE P. R., MOSURO G. O. (2012). Characterization of a bitumen seepage in Eastern Dahomey Basin, SW, Nigeria. Pelagia Research Library. ISSN: 0976-8616. Availabe online at www.pelagiaresearchlibrary.com.

AKINMOSIN, A. A., OMOSANYA, K. O., IGE, T. (2013). The occurrence of tar sands at Ijebu-Itele, Eastern Dahomey basin, SW, Nigeria. ARPN Journal of science and technology. Vol. 3. No. 1. ISSN 2225-7217.

AKO B. D, ALABI A.O, ADEKOE O.S., ENU E.I. (1983). Application of Resistivity Soundind in the exploration for Nigeria tar sand, Energy and Explotation. Graham and Trotman Limited, 2 (2). Pages 155-164.

AMIGUN J.O., ADELUSI A.O., AKO B. D. (2012). The application of integrated geophysical methods in oil sand exploration in Agbabu área of southwestern. International research journal of geology and mining (IRJGM). 2276-6618 Vol. 2 (9), pp. 243-253.

ALVARADO, B. y SARMIENTO, R. (1944). Informe geológico general sobre los yacimientos de hierro y caliza de la región de Paz del Río (Departamento de Boyacá). Informe No 468. Servicio Geológico Nacional.

ARGUELLO, G. R. (2012). Caracterización geofísica y petrográfica de la manifestación mineral de hierro en la Vereda San Antonio Municipio de Fivaravitoba, Boyacá. GEOLOGÍA COLOMBIANA. Edición X Semana Técnica de Geología e Ingeniería Geológica. 37 (1),41-43. Bogotá, Colombia.

ARIAS, D.E. (2011) Exploración geotécnica – relaciones geoeléctricas. Medellín, 104 págs. Trabajo de Grado (Maestría en Ingeniería – Geotecnia). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil.

ATEKWANA, E.A., SAUCK, W.A., WERKEMA JR, D.D. (2000). Investigations of geoelectrical signatures at hydrocarbon contaminated site, Journal of Applied Geophysics, 44, 167-180

ATTANASI E.D, MEYER R.F (2007). Natural bitumen and extra-heavy oil, in 2007. Survey of Energy Resources, eds., J. Trinnaman and A. Clarke: World Energy Council, p119-143.

BADER J. W. (2009). Structural and tectonic evolution of the Douglas Creek arch, the Douglas Creek fault zone, and environs, northwestern Colorado and northeastern Utah: Implications for petroleum accumulation in the Piceance and Uinta basins. Rocky Mountain Geology, v. 44, no. 2, p. 121–145.

BARRERO D., PARDO A., VARGAS C., MARTÍNEZ J. (2007). Colombian sedimentary basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a new Proposal. AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS – A.N.H. P. 39 y 67.

BAUMAN, P. (2005). 2-D Resistivity Surveying for Hydrocarbon-A Primer. CSEG Recorder, April , pp.25-33.

BAUMAN, P. y HANSEN, B., (2010). Routine Geoelectric Exploration for Shallow Gas and Oil Sands Using Electrical Resistivity Tomography (ERT). AAPG International Convention and Exhibition, September 12-15, 2010 Calgary, Alberta, Canada.

BAYONA, G.; CARDONA, A.; JARAMILLO, C.; MORA, A.; MONTES, C.; CABALLERO, V.; MAHECHA, H.; LAMUS, F.; MONTENEGRO, O.; JIMENEZ, G.; MESA, A.; VALENCIA, V., (2013). Onset of fault reactivation in the Eastern Cordillera of Colombia and proximal Llanos basin; response to Caribbean – South American convergence in early Paleogene time, Geological Society, London, Special Publications Online First, 42p.

BEWLEY L.V. (1934) theory and tests of the counterpise. American institute of electrical Engineers, transactions of the (volume:53 , issue: 8)

BLACKETT R. E. (1996) Tar-Sand Resources of the Uinta Basin, Utah. A Catalog of Deposits. Utah Geological Survey.

BOBACHEV A; I MODIN; V. SHEVNIN. (2003) Software IPI2WIN. Versión 3.0.1e. 14.03.03 (1990-2003). Moscow State University, Russia. Disponible en: <http://geophys.geol.msu.ru/ipi2win.htm>

BURKE, K.C.B., DESSAUVAGIE, T.F.C., WHITEMAN, A.J. (1971). The opening of the Gulf of Guinea and the geological history of the Benue depression and Niger Delta. Nature physical science 233 (38), pp 51-55.

CARSON HELICOPTERS, INC. (2009). Levantamiento aerogravimétrico y aeromagnético en la Cordillera Oriental Sector de Soapaga y el Piedemonte de La Cordillera Oriental - Llanos Orientales, Colombia. Informe Final de interpretación para la ANH, Contrato N° 035.

CHOPRA, S., LINES, L. (2008). Introduction to this special section: Heavy oil: The Leading Edge 27 (9), 1104-1106.

COX, L.H., WILSON, G.A., AND ZHDANOV, M.S., RUDD J., WILSON, J. (2012). Large-scale 3D inversion of helicopter electromagnetic surveys for oil sands exploration near Fort McMurray, Alberta. Geoconvention 2012 (Vision). Calgary TELUS Convention Centre & ERCB Core Research Centre, Calgary, AB, Canada, 14-18 May 2012

CRERAR E. AND ARNOTT R. W. C. (2007). Facies distribution and stratigraphic architecture of the Lower Cretaceous McMurray Formation, Lewis Property, northeastern Alberta. Bulletin of Canadian Petroleum Geology. Vol. 55, No. 2, P. 99–124.

CRISTALL, J., FARQUHARSON C., OLDENBURG D., 2004, Airborne electromagnetic inversion applied to oil sands: expanded abstract, Can. Soc. Expl. Geophys. Annual Meeting.

D’LITTLE, A. INC. (2008). Presentación en el Foro Tecnológico de Energías Alternativas e Hidrocarburos No convencionales. Bucaramanga.

DE PORTA, J. (1974): Léxico Estratigráfico Internacional Vol 5. Amérique Latine fascicule 4b Colombia. Décima parte. Centre National de la Recherche Scientifique, Paris.

DE FREITAS, M., FRANÇOLIN, J. COBBOLD. P. 1997. The Structure of the Axial Zone of the Cordillera Oriental, Colombia . VI Simposio Bolivariano “Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas”. Asociación Colombiana Geólogos y Geofísicos del Petróleo. Memorias, Cartagena, Tomo II, pp. 38-41.

DE-HUA, J. L. (2008). Seismic properties of heavy oils measured data. The Leading Edge, Sept. 27 (9): 1108-1114.

DUSSEAULT M. B. (2001). Comparing Venezuelan and Canadian Heavy Oil and Tar Sands. Canadian International Petroleum Conference. PAPER 061.

FAJARDO, G. (1998). Estructural analysis and basin inversion evolutionary model of Arcabuco, Tunja and Sogamoso región Eastern Cordillera.

FALGÁS, E. (2007) Hydrogeophysics as a Multidisciplinary Tool on Aquifer Appraisal: Focus on AMT Capabilities. Universitat de Barcelona, p. 233.

FONSECA-BENÍTEZ, F. (2012): Modelación geológico-geofísica y análisis geoestadístico de datos en sectores de Boyacá, Colombia. GEOLOGÍA COLOMBIANA. Edición X Semana Técnica de Geología e Ingeniería Geológica. 37 (1), 27. Bogotá, Colombia.

GIRALDO H. F. (2013). Subsuelos 3D S.A.S. Manual de operación del equipo GEOAMP 202. V-1. Bogotá, Colombia.

GODDARD D. (2006). Venezuela Sedimentary Basins, Principal Reservoirs and Completion Practices.

GROSSE, E. (1928). Informe sobre los asfaltos en la parte central del departamento de Boyacá, 21 h. Compilación de estudios geológicos oficiales Colombia. A. 1935. Tomo III. p.7-29.

GUEVARA F., CASTILLO J., FAIR JR. W., PORJESZ R. (2005). Impacting the bottom line of field performance: Joint reservoir studies in three Venezuelan oil fields. The Leading Edge, Pg. 1174 – 1179.

HAO F., ZHANG Z., ZOU H., ZHANG Y. AND YANG Y. (2011). Origin and Mechanism of the Formation of the Low-oil-saturation Moxizhuang Field, Junggar Basin, China: Implication for Petroleum Exploration in Basins Having Complex Histories. AAPG Bulletin, v. 95, no. 6, pp. 983–1008.

IAKUBOVSKII, IU. V. y LIAJOV, L. L. (1980). Exploración eléctrica. Versión española de la tercera edición rusa. Editorial Reverté S.A. ISBN-84-291-4614-8.

JIANG, Q. Review of Thermal Recovery Technologies for the Clearwater and Lower Grand Rapids Formations in Cold Lake, Alberta. JCPT, Vol. 49 No. 9. 2010.

JIN Z., CAO J., HU W., ZHANG Y., YAO S., WANG X., ZHANG Y., TANG Y. AND SHI X. (2008). Episodic Petroleum Fluid Migration in Fault Zones of the Northwestern Junggar Basin (Northwest China): Evidence from hydrocarbon-bearing zoned calcite cement. AAPG Bulletin, v. 92, no. 9, pp. 1225–1243.

KAMMER, A. y SÁNCHEZ, J. (2006). Early Jurassic rift structures associated with the Soapaga and Boyacá faults of the Eastern Cordillera, Colombia: Sedimentological inferences and regional implications. Journal of South American Earth Sciences. Vol. 21. P. 412-422, Santa Fe de Bogota.

KEAREY P., BROOKS M., HILL I., (2002). An Introduction to Geophysical Exploration. Third Edition. Blackwell Science.

KEIGHLEY D., FLINT S., HOWELL J. AND MOSCARIELLO A. (2003) Sequence Stratigraphy in Lacustrine Basins: A Model for Part of the Green River Formation (Eocene), Southwest Uinta Basin, Utah, U.S.A. Journal of Sedimentary Research, Vol. 73, N. 6, P. 987–1006.

KIMBERLEY, M. (1980). The Paz de Rio oolitic inland-sea Iron Formation. *Economic Geology* 75: 97-106.

KINGSTON, D.R., DISHROON, C.P., WILLIAMS, P. A. (1983). Global Basin classification system. *AAPG. Bull.*, Vol 67, pp. 2175-2193.

KORB, M., HUIZAR, R., CAMPOS, J. O. (2005). Evaluación hidrogeológica de pozos a través de registros geofísicos. Primera edición. Universidad Nacional Autónoma de México.

LIZARAZO, N. G. y REYES, O. V (1998), Evaluación Geológica de las areniscas asfálticas terciarias en los municipios de Pesca, Beteitiva, Tasco y Topaga en el departamento de Boyacá. Escuela de Geología. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander.

LITCKE R., CRAMER B., GERLING P., LOPATIN N. V., POELCHAU H. S., SCHAEFER R. G. AND WELTE D. H. (1999). Gas Generation and Accumulation in the West Siberian Basin. *AAPG Bulletin*, V. 83, No. 10, P. 1642–1665.

LOKE, M. H. (2001). Tutorial 2D y 3D electrical imaging survey. Geotomo software, Malasia.

LUO X., WANG Z., ZHANG L., YANG W. AND LIU L. (2007). Overpressure Generation and Evolution in a Compressional Tectonic Setting, the Southern Margin of Junggar Basin, Northwestern China. *AAPG Bulletin*, v. 91, no. 8, pp. 1123–1139.

McCONNELL, D. y GLENN, T. (2008). Athabasca Oil Sands Exploration and Development Investigation Using the Helicopter-Borne Transient Electromagnetic Technique. *CSPG CSED CWLS conventional*. P 701-705.

MEJU, M.A. (2002). Geoelectromagnetic exploration for natural resource: Models, case studies and challenges: *Surveys in Geophysics*, 23, 133-205

MÉNDEZ O. (2011) Heavy Oil International Technology Forum. VETRA. Bucaramanga.

MEYER R. F., ATTANASI E. D., FREEMAN P. A. (2007) Heavy Oil and Natural Bitumen Resources in Geological Basins of the World. U.S. Geological Survey. Report 2007-1084. Available online at: <http://pubs.usgs.gov/of/2007/1084/>.

MILKOV A. V. (2010). Methanogenic Biodegradation of Petroleum in the West Siberian Basin (Russia): Significance for formation of giant Cenomanian gas pools. *AAPG Bulletin*, v. 94, no. 10, pp. 1485–1541.

MOLINA, P. (2006). Aplicación de diferentes técnicas no destructivas de prospección geofísica a problemas relacionados con contaminación ambiental producida por diferentes actividades antrópicas en la región de Murcia. Tesis Doctoral. Universidad politécnica de Cartagena.

MONTAÑO, M. F. y VEGA, V. P. (2007). Aplicación de métodos eléctricos de prospección geofísica; III congreso CIER de la energía. *Revista CIER* No. 53 – 2009.

MORGAN C. D., MCCLURE P., BERESKIN S. R., DEO M. D., WELLER K. (2001). Reservoir Characterization of the Lower Green River Formation, Southwest Uinta Basin, Utah. Virginia Weyland, Contract Manager, U.S. Department of Energy.

NATIONAL ENERGY BOARD (2000). Canada's Oil Sands. A Supply and Market Outlook to 2015.

ODUNAIKE, R.K., Ijeoma G.C., Edigbe R. O., Babatope A. H. (2009). Oil sands exploration in Ijebu-Imushin using magnetic and electrical resistivity methods. 11th SAGA Biennial Technical Meeting and Exhibition Swaziland, 16-18 September. Pages 247-252.

ODUNAIKE, R.K, J. A. LAOYE, O. O. FASUNWON, G. C. IJEOMA, AND AKINYEMI, L. P. (2010). Geophysical mapping of the occurrence of shallow oil sands in Idiopopo at Okitipupa area, South-western Nigeria African Journal of Environmental Science and Technology Vol. 4 (1) pp. 034-044.

ORELLANA, E. (1982). Prospección eléctrica por corriente continua. Editorial paraninfo, madrid. Segunda Edición.

PARDO, A. y ROCHE, E. (2009). Paleocene-Eocene palynology and palynofacies from northeastern Colombia and western Venezuela. Cuaderno de Investigación 41. Universidad de Caldas, Manizales.

PARDO, A. y ROCHE, E. (2011). Stratigraphy, palinology and paleofacies of the lower Tertiary rocks from the Paz de Rio región (Chicamocha river valley, Eastern cordillera, Colombia).

PLINT A. G., MCCARTHY P. J. AND FACCINI U. F. (2001). Nonmarine sequence stratigraphy: Updip expression of sequence boundaries and systems tracts in a highresolution framework, Cenomanian Dunvegan Formation, Alberta foreland basin, Canada. AAPG Bulletin, v. 85, no. 11.

RENZONI, G., ROSAS, H., ETAYO, F. (1998). Geología de La Plancha 191-Tunja, Escala 1:100.000. Ingeominas, Bogotá.

RETAMOSO, LL. C., VILLABONA, R. H. (1997). Estudio para el mejoramiento de capas de pavimento con asfalto natural de Pesca (Boyacá). Trabajo de grado, escuela de Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

RODRIGUEZ, D.M. (2009). Modelo de la falla de Soapaga a partir de correlación espectral de campos potenciales. Tesis de maestría en Ciencias - Geofísica. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

RUIQI Y., YUWEN C., XINGE S., JIANQUI W. AND SHUYUAN L. (1998). Resource Evaluation and Development Prospect of Heavy Oil and Tar Sands in Northwestern Margin of Junggar Basin. 7th UNITAR Conference on Heavy Crude and Tar Sands. Oklahoma.

SARMIENTO A, A., (1951). Comisión a la mina de asfalto “La Emilia” en Pesca Boyacá. Informe No. 760 Ministerios de Fomento – Sección Quinta Servicio Geológico.

SAYLOR, J.; HORTON, B., CORREDOR, J., MORA, A. (2010). Evaluating foreland basin partitioning in the northern Andes using Cenozoic fill of the Floresta basin, Eastern Cordillera, Colombia.

SMITH, R., (2010). Airborne electromagnetic methods: applications to minerals, water and hydrocarbon Eexploration - CSEG Distinguished lecture tour.

SUMMA L. L., GOODMANB E. D., RICHARDSONA M., NORTONB I.O. AND GREENB A.R. (2003). Hydrocarbon systems of Northeastern Venezuela: plate through molecular scale-analysis of the genesis and evolution of the Eastern Venezuela Basin. Marine and Petroleum Geology, Vol. 20, pg. 323–349,

TANG Z., PARNELU J. AND LONGSTAFFE F. J. (1997). Diagenesis of Analcime-Bearing Reservoir Sandstones: The Upper Permian Pingdiquan Formation, Junggar Basin, Northwest China. *Journal of Sedimentary Research*, Vol. 67, No. 3, P. 486-498.

TESÓN, E., MORA, A., SILVA, A., NAMSON, J., TEIXELL, A., CASTELLANOS, J., CASALLAS, W., JULIVERT, M., TAYLOR, M., IBÁÑEZ-MEJÍA, M., VALENCIA, A. (2013). Relationship of Mesozoic graben development, stress, shortening magnitude, and structural style in the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. *GSA London, Special Publications Online First*.

ULLOA, C. y RODRÍGUEZ, E. (1979) Geología del cuadrángulo K-12, Guateque. *Bol. Geol. Ingeominas Vol. 22, N° 1* .Bogotá.

ULLOA, C., RODRÍGUEZ, E., FUQUEN, J., ACOSTA, J., (2001). Memoria Explicativa Geología de La Plancha 192 Laguna de Tota, Ingeominas, Bogotá.

ULLOA, D. J., GOMÉZ, G. R. (1987). Evaluación técnico-económica de los yacimientos de asfalto en Pesca, Boyacá. Trabajo de grado, escuela de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

ULMISHEK G. F. (2003). Petroleum Geology and Resources of the West Siberian Basin, Russia. *U.S. Geological Survey Bulletin 2201-G*.

VOLD, I.E., ROTEVATN, A., HESTHAMMER, J. (2012). The effect of hydrocarbon saturation on resistivity distribution and CSEM response. *Marine and Petroleum geology* 38 (2012) 117-127.

XIAO Q., HE S., YANG Z., HE Z, FURONG W., LI S. AND TANG D. (2010). Petroleum Secondary Migration and Accumulation in the Central Junggar Basin, Northwest China: Insights from basin modeling. AAPG Bulletin, v. 94, no. 7, pp. 937–955.

ZHDANOV, M. S., COX, L., RUDD, J. (2013) Paradigm change in 3D inversion of airborne EM surveys: case study for oil sands exploration near Form. McMurray, Alberta. First break, Vol. 31

ANEXOS

ANEXO A. DATOS MEDIDOS EN CAMPO – SEV GENERALES (Medio magnético)

ANEXO B. DATOS MEDIDOS EN CAMPO – SEV DE DETALLE (Medio magnético)

**ANEXO C. MODELOS GEOELECTRICOS DE TODOS LOS SEV (Medio
magnético**

ANEXO D. DATOS TRE ADQUIRIDOS EN CAMPO (Medio magnético)

**ANEXO E. DATOS TOPOGRAFICOS DE LOS PERFILES DE LAS TRE (Medio
magnético**

ANEXO F. DATOS DE LAS TRE PROCESADOS (Medio magnético)