

CONTRIBUCIÓN A LA EXPLORACIÓN DE ASFALTITA MEDIANTE EL MÉTODO
DE IMAGEN RESISTIVA ELÉCTRICA Y SU CLASIFICACIÓN GEOQUÍMICA EN
LA VEREDA LA TIGRA, MUNICIPIO DE RIONEGRO (SANTANDER).

MARÍA CATHERINE TORRADO CARVAJAL

KELLY DANIELA TORRES SEPÚLVEDA



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-QUÍMICA
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2016

CONTRIBUCIÓN A LA EXPLORACIÓN DE ASFALTITA MEDIANTE EL MÉTODO
DE IMAGEN RESISTIVA ELÉCTRICA Y SU CLASIFICACIÓN GEOQUÍMICA EN
LA VEREDA LA TIGRA, MUNICIPIO DE RIONEGRO (SANTANDER).

MARÍA CATHERINE TORRADO CARVAJAL

CÓD.: 2092363

KELLY DANIELA TORRES SEPÚLVEDA

CÓD.: 2082406

Trabajo de grado para optar al título de Geólogas
Modalidad tesis de investigación

Director:

RICARDO MIER UMAÑA

Geólogo, Docente UIS

Co-Director:

YESID PAUL GOYES PEÑAFIEL

Geólogo

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-QUÍMICA
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

A Dios y la Virgen María Auxiliadora porque he puesto todos mis sueños en sus manos y jamás me han fallado, la fe que tengo en ellos es eterna y me ha permitido recibir lo imposible.

A mis padres Gladys Carvajal y Orlando Torrado quienes me han apoyado desde el principio hasta el final, aliviando mis cargas con sus consejos, su comprensión y su eterno cariño. Los amo incansablemente.

A mis hermanos Carito, Normis y Nando quienes me regalaron una vida llena de felicidad y apoyo mutuo, porque de momentos difíciles logramos salir adelante siempre juntos. Y por supuesto a mis adorados sobrinos Tomy, Luchis y Mafiolos con quienes descubrí que el amor sincero existe y a quienes amo con todo mi corazón. Gracias por hacerme la tía más feliz.

A mi amor eterno Yinner Rodríguez por ser mi soporte, mi refugio y mi tranquilidad. Mi mejor amigo, mi compañero de alegrías y tristezas, eres el ser más maravilloso que Dios pudo escoger para mí, eres quien me ha regalado los días más dichosos en este mundo. Mi *gati* mil gracias por enamorarme y por convertirte en el amor de mi vida. Te amaré hasta el final mi Simono♥.

Te volvería a elegir una y mil veces sin pensarlo.

A la familia Rodríguez Aparicio por regalarme un lugar en sus corazones, con personas tan lindas como ustedes siempre se podrá contar.

A toda mi familia por estar presente en los momentos más importantes de este camino.

A cada uno de mis amigos del colegio y de la universidad por acompañarme en este recorrido, haciendo de cada etapa un recuerdo absoluto.

Catherine Torrado Carvajal

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres que me han apoyado en todo momento, a mi familia la cual me llena de amor, a mis amigos y profesores quienes me han acompañado en parte del proceso.

Daniela Torres Sepúlveda

AGRADECIMIENTOS

Al excelente grupo de trabajo que se formó para la realización de este proyecto
Daniela Torres y Catherine Torrado.

Los mayores agradecimientos a nuestro director de proyecto Ricardo Mier Umaña
por su total disposición para trabajar con nosotras, brindándonos ayuda y
acompañamiento durante todo el desarrollo de este trabajo.

A nuestro codirector Yesid Paul Goyes por su colaboración, sus sugerencias y
cada uno de sus aportes.

Agradecemos al Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de
Santander, Sede Guatiguará.

Agradecemos al Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido de la
Universidad Industrial de Santander, Sede Guatiguará.

Agradecemos al Laboratorio de Geología del Petróleo de la Universidad Industrial
de Santander, Sede Guatiguará.

A la Universidad Industrial de Santander por permitir el crecimiento tanto
profesional como personal.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. OBJETIVOS	22
1.1 OBJETIVO GENERAL	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2. ANTECEDENTES	23
3. LOCALIZACIÓN	25
3.1 GEOGRÁFICA	25
3.1.1 Acceso	25
3.2 FISIOGRÁFICA	26
4. MARCO GEOLÓGICO	27
5. MARCO TEÓRICO	33
5.1 GEOFÍSICA	34
5.1.1 Dispositivo simétrico de wenner	35
5.1.2 Dispositivo simétrico de schlumberguer	36
5.1.3 Tomografías eléctricas (TE).	37
5.2 GEOQUÍMICA	38
5.2.1 Bitúmenes Sólidos	38
5.2.2 Génesis	40
5.2.3 Clasificación	41
5.2.4 Modelo de Asfaltita y Ambito Nacional	42
5.2.5 Contenido de TOC (Carbono Orgánico Total)	43
5.2.6 Difracción de Rayos X (DRX).	45
5.2.7 Método del Polvo	45
5.2.8 Microscopía electrónica de Barrido (SEM).	46
5.2.9 Contenido de Azufre	46
5.2.10 Densidad por medio de un picnómetro	47
5.2.11 Punto de ablandamiento	48

6. METODOLOGÍA	49
6.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	49
6.2 RECONOCIMIENTO DE CAMPO	49
6.2.1 Recolección de las muestras.	53
6.2.2 Adquisición de los sondeos	56
6.3 ANÁLISIS DE LABORATORIO	58
6.3.1 Contenido de TOC (Carbono Orgánico Total).	58
6.3.2 Difracción rayos X.	59
6.3.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM).	60
6.3.4 Densidad.	62
6.3.5. Punto de ablandamiento	64
6.4 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN GEOELÉCTRICA	65
6.4.1 Procesamiento de Sondeos	65
6.4.2 Procesamiento de Tomografías.	66
7. RESULTADOS	71
7.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA	71
7.1.1 Punto de ablandamiento	71
7.1.2 Densidad	73
7.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA	76
7.2.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	76
7.2.2 Difracción de rayos X	95
7.3 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA	102
7.3.1 Carbono orgánico total (TOC)	102
7.3.2 Azufre Total	102
7.4 CLASIFICACIÓN DE LAS ASFALTITAS (M-ME01, M-ME02, M-ME03, M-ME05 Y M-ME06)	103
7.5 INFORMACIÓN E INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA A PARTIR DE LEVANTAMIENTOS CON RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	105
7.5.1 Sondeos eléctricos verticales (SEV)	105
7.5.2 Sondeos Tipo Schlumberger	112

7.5.3 Tomografías de resistividad eléctrica (TRE)	115
8. CONCLUSIONES	119
BIBLIOGRAFIA	120

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de migrabitúmenes.	39
Tabla 2. Propiedades típicas de las asfaltitas (gilsonita, grahamita y glance pitch).....	41
Tabla 3. Parámetros geoquímicos de interpretación de TOC.	44
Tabla 4. Punto de ablandamiento de las muestras analizadas.....	71
Tabla 5. Datos y resultado de densidades por medio del método del picnómetro.	74
Tabla 6. Datos y resultados de la densidad por medio del método de la probeta.	75
Tabla 7. Porcentaje de los elementos que componen la muestra M-ME01.	78
Tabla 8. Porcentaje de los elementos que componen la muestra M-ME01.	79
Tabla 9. Porcentaje de los elementos que componen la muestra M-ME02.	81
Tabla 10. Porcentaje de los elementos que componen la muestra M-ME02.	83
Tabla 11. Porcentajes de elementos que componen la partícula 1 de la muestra M-ME02.	84
Tabla 12. Porcentajes de elementos que componen la partícula 2 de la muestra M-ME02.	86
Tabla 13. Porcentajes de elementos que componen la partícula 3 de la muestra M-ME02.	87
Tabla 14. Porcentaje de los elementos que componen la muestra M-ME03.	89
Tabla 15. Porcentajes de elementos que componen la partícula 1 de la muestra M-ME02.	91
Tabla 16. Porcentajes de elementos que componen la partícula 2 de la muestra M-ME03.	92
Tabla 17. Porcentajes de elementos que componen la partícula 3 de la muestra M-ME02.	94
Tabla 18. Resultados DRX para la muestra M-ME02.	95
Tabla 19. Resultados DRX para la muestra M-ME03.	97
Tabla 20. Resultados DRX para la muestra M-ME04.	98
Tabla 21. Resultados DRX para la muestra M-ME07.	99

Tabla 22. Contenido de Carbono Orgánico Total (TOC).....	102
Tabla 23. Contenido de Azufre Total (TS).	103
Tabla 24. Punto de ablandamiento de asphaltitas.	104
Tabla 25. Datos Sondeo WME-1.	106
Tabla 26. Datos Sondeo WME-2.	108
Tabla 27. Datos sondeo WME-4.	109

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación corregimiento la Tigra donde se encuentra la zona de estudio.	25
Figura 2. Regiones Fisiográficas del Departamento de Santander.....	26
Figura 3. Mapa de localización modificado de INGEOMINAS	28
Figura 4. Columna estratigráfica generalizada del Valle Medio Del Magdalena donde se resalta la Fm. La Luna (Ksl) y la Fm. Bocas (Jib).....	32
Figura 5. Panorama Mundial sobre la demanda de Gilsonita (unos de los tipos de Asfaltita con mayor precio en el mercado) según sus usos. En Gris: Gas y Petróleo; en azul: Industria; rojo: ambos usos.	33
Figura 6. Mapa conceptual métodos geoeléctricos.....	34
Figura 7. Esquema simplificado del dispositivo de Wenner.	35
Figura 8. Esquema dispositivo Wenner para una profundidad mayor.....	36
Figura 9. Esquema simplificado del dispositivo Schlumberguer.	36
Figura 10. Esquema dispositivo Schlumberguer, aumentando la distancia entre electrodos de emisión.	37
Figura 11. Disposición básica del sistema para el desarrollo de la Tomografía Eléctrica.	37
Figura 12. Ejemplo de un modelo 2D en resistividad y profundidad verdadera.	38
Figura 13. Clasificación general de bitúmenes sólidos.	39
Figura 14. Esquema de la génesis de diferentes grupos de migrabitúmenes.....	41
Figura 15. Mina Villa Rica sin licencia para ser explotado el material, donde se observa un dique de asfaltita.	50
Figura 16. Instalaciones de la mina el Edén. A. Material extraído directo para empacar. B. Zona de carga de la asfaltita. C. Excavación donde se realiza la extracción del material asfáltico, se observa una veta de gran tamaño. D. Diques de material asfáltico.	51

Figura 17. Potrero con presencia de rezumaderos, a 50 metros de la mina El Edén..	52
Figura 18. Rezumadero de petróleo en el potrero aledaño a la mina El Edén.....	52
Figura 19. Muestra de asfaltita	53
Figura 20. Muestra de asfaltita.	53
Figura 21. Muestra de asfaltita.....	53
Figura 22. Muestra roca Fm La Luna (Ksl).	53
Figura 23. Muestra de asfaltita	53
Figura 24. Muestra de asfaltita.	54
Figura 25. Muestra de roca con presencia de bitumen.....	54
Figura 26. Mina El Edén. Presencia de dique de gran tamaño.....	55
Figura 27. Mina Villa Rica. Presencia de estratificación en esta área.....	56
Figura 28. Terrameter ABEM SAS 1000/4000.....	58
Figura 29. Equipo Leco SC-144R y software SC144R utilizado en la determinación de contenido de TOC y azufre.	59
Figura 30. Parámetros de medida de DRX en polvo.....	60
Figura 31. Microscopio Electrónico de Barrido marca QUANTA FEG 650.	61
Figura 32. Muestras analizadas en la prueba SEM.	62
Figura 33. Procedimiento densidad con picnómetro: A. Peso picnómetro vacío B. Peso picnómetro con muestra C. Peso picnómetro con muestra y agua.....	63
Figura 34. Procedimiento densidad con probeta.....	64
Figura 35. Procedimiento punto de ablandamiento.....	64
Figura 36. Procedimiento punto de fusión. A. Las muestras de asfaltita se introdujeron en los capilares B. Equipo Mel-Temp donde se fijan los capilares para calentarlos C. Capilares dentro del equipo.	65
Figura 37. Perfil de resistividad aparente.....	67
Figura 38. Configuración de los parámetros de inversión.....	67
Figura 39. Perfil de resistividades reales con error de 41,28%.....	68
Figura 40. Gráfica de dispersión de datos generados en la primera inversión.	68
Figura 41. Histograma del perfil correspondiente a la primera inversión.	69

Figura 42. Gráfica de dispersión corregida, resultado de la segunda inversión.....	69
Figura 43. Perfil de resistividades reales corregido con error de 9,99%.....	70
Figura 44. Primer enfoque muestra M-ME01.....	77
Figura 45. Espectrograma del primer enfoque muestra M-ME01.....	77
Figura 46. Segundo enfoque muestra M-ME01.....	78
Figura 47. Espectrograma del segundo enfoque muestra M-ME01.....	79
Figura 48. Primer enfoque muestra M-ME02.....	80
Figura 49. Espectrograma del primer enfoque muestra M-ME02.....	80
Figura 50. Segundo enfoque muestra M-ME02.....	82
Figura 51. Espectrograma del segundo enfoque muestra M-ME02.....	82
Figura 52. Enfoque partícula 1, muestra M-ME02.....	83
Figura 53. Espectrograma de la partícula 1, muestra M-ME02.....	84
Figura 54. Enfoque partícula 2, muestra M-ME02.....	85
Figura 55. Espectrograma de la partícula 2, muestra M-ME02.....	85
Figura 56. Enfoque partícula 3, muestra M-ME02.....	86
Figura 57. Espectrograma de la partícula 3, muestra M-ME02.....	87
Figura 58. Primer enfoque muestra M-ME03.....	88
Figura 59. Espectrograma del primer enfoque muestra M-ME03.....	89
Figura 60. Enfoque partícula 1, muestra M-ME03.....	90
Figura 61. Espectrograma de la partícula 1, muestra M-ME03.....	90
Figura 62. Enfoque partícula 2, muestra M-ME03.....	91
Figura 63. Espectrograma de la partícula 2, muestra M-ME03.....	92
Figura 64. Enfoque partícula 3, muestra M-ME03.....	93
Figura 65. Espectrograma de la partícula 3, muestra M-ME03.....	93
Figura 66. Difractograma de la muestra M-ME02. Fuente: Laboratorio DRX, UIS.	96
Figura 67. Difractograma de la muestra M-ME03.....	97
Figura 68. Difractograma de la muestra M-ME04.....	99
Figura 69. Difractograma de la muestra M-ME07.....	100
Figura 70. Difractograma de las muestras M-ME01, M-ME05 y M-ME06.....	101
Figura 71. Ubicación Sondeo WME-1.....	106

Figura 72. Ubicación sondeo WMF-2, vista superior.	107
Figura 73. Ubicación sondeo WME-2.	108
Figura 74. Ubicación Sondeos WME-5, WME-6, WME-7, WME-8 y WME-9.....	110
Figura 75. Variación de la resistividad en los sondeos tipo Wenner donde línea 1: WME-5, línea 2: WME-6, línea 3: WME-7, línea 4: WME-8 y línea 5: WME-9.....	111
Figura 76. Proyección 3D de la variación en la resistividad de los sondeos tipo Wenner, WME-5, WME-6, WME-7, WME-8 y WME-9.	112
Figura 77. Ubicación Sondeo SME-1.....	113
Figura 78. Visualización de los datos obtenidos en el sondeo SME-1.....	114
Figura 79. Corte geológico de la Zona de adquisición del sondeo SME-1.....	114
Figura 80. Modelo 2D de la resistividad y profundidad real de la tomografía 1. ...	115
Figura 81. Modelo 2D de la resistividad y profundidad real de la tomografía 2. ..	116
Figura 82. Modelo 2D de la resistividad y profundidad real de la tomografía 3. ...	117
Figura 83. Modelo 2D de la resistividad y profundidad real de la tomografía 4. ...	118

RESUMEN

TÍTULO: CONTRIBUCIÓN A LA EXPLORACIÓN DE ASFALTITA MEDIANTE EL MÉTODO DE IMAGEN RESISTIVA ELÉCTRICA Y SU CLASIFICACIÓN GEOQUÍMICA EN LA VEREDA LA TIGRA, MUNICIPIO DE RIONEGRO (SANTANDER).**

AUTORES: MARÍA CATHERINE TORRADO CARVAJAL
KELLY DANIELA TORRES SEPÚLVEDA**

PALABRAS CLAVE: Asfaltita, Geofísica, Sondeos Eléctricos Verticales, Geoquímica, Clasificación Geoquímica

La empresa minera LVGR S.A.S ha extraído material bituminoso en la mina El Edén de la vereda La Tigra, municipio de Rionegro (Santander), de manera no técnica sin tener la seguridad de hallar un cuerpo asfáltico en todas sus excavaciones, trayendo consigo pérdida de tiempo y dinero. Para la solución de este inconveniente y contribución a la exploración de asfaltitas en la zona, apoyados en un análisis y recopilación de datos para estudios de exploración de la asfaltita, se planteó emplear el método de resistividad eléctrica el cual dio como resultado valores de anomalías diferenciando los sedimentos. Estas anomalías se complementan con una caracterización geoquímica que permite clasificar detalladamente el tipo y la calidad de asfaltitas en la zona. Los resultados permiten una mejor comprensión y proyección del avance de los actuales frentes mineros y la calidad de los materiales que se encuentran en extracción.

Para la solución de este inconveniente y contribución a la exploración del material bituminoso, se planteó emplear las técnicas de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) 2D, con el fin de obtener como resultado valores de anomalías diferenciando los tipos de material presentes en el subsuelo. Los valores de resistividad obtenidos se correlacionaron con las formaciones geológicas presentes y las anomalías registradas se establecieron como los cuerpos de asfaltita de la mina.

Este método de resistividad eléctrica se complementó con una caracterización geoquímica que permitió clasificar detalladamente el tipo y la calidad de asfaltitas por medio de análisis y pruebas físico-químicas de laboratorio, dando como resultado cinco muestras tipo Gilsonita, tres de las cuales presentaron muy buena calidad.

Con los resultados obtenidos se proyectó una dirección en sentido NNW como dirección preferencial para continuar con la explotación de asfaltita en el desarrollo de nuevos frentes mineros.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físico-Química. Escuela de Geología. Director: Ricardo Mier Umaña
Geólogo, Docente UIS. Co-Director: Yesid Paul Goyes Peñafiel
Geólogo

ABSTRACT

TITLE: CONTRIBUTION TO THE ASPHALTITE EXPLORATION THROUGH THE ELECTRIC RESISTIVE IMAGE METHOD AND ITS GEOCHEMICAL CLASSIFICATION IN VEREDA? LA TIGRA RIONEGRO (SANTANDER)**

AUTHORS: MARÍA CATHERINE TORRADO CARVAJAL
KELLY DANIELA TORRES SEPÚLVEDA**

KEYWORDS: Asphaltite, Geophysics, Vertical Electrical Soundings (VES), Geochemistry, Geochemistry Classification

The mining company LVGR SAS has extracted bitumen in El Edén mine, village of La Tigra, Rionegro (Santander), under a non-technical way without being sure of finding an asphalt body in all its excavations. Thus, bringing waste of time and money to the company. In order to solve this problem and contributing to asphaltite exploration in the area, supported by analysis and data collection for asphaltite exploration studies, it was proposed to employ the method of electrical resistivity which lead to anomalies in values differentiating sediments. These anomalies are complemented by geochemical characterization which classifies in detail the type and quality of asphaltites in the area. The results allow a better understanding and projection of the current progress of mining fronts and quality of the materials found in extraction.

To solve this problem and contributing to the exploration of bituminous materials, a set of techniques were employed including, Vertical Electrical Soundings (VES) and Electrical Resistivity Tomography (ERT) 2D, in order to obtain anomaly rates and values comparing the types material in the subsurface. The resistivity values acquired were correlated with geological formations present in the zone and registered anomalies were established as the asphaltite bodies of the mine.

This previously mentioned method of electrical resistivity was complemented by a geochemical characterization, allowing to classify in detail the type and quality of asphaltites through analysis and physicochemical laboratory tests, resulting in five Gilsonite type samples, in which, three of them had a very good quality.

According to the obtained results, a special direction towards NNW was projected in the light of carrying on with the asphaltite exploitation in the developing of new mining fronts.

* Work Degree

** Faculty of Physical and Chemical Engineering. School of Geology. Director: Ricardo Mier Umaña
Geólogo, Docente UIS. Co-Director: Yesid Paul Goyes Peñafiel
Geólogo

INTRODUCCIÓN

En Colombia se tienen depósitos de asfaltitas ubicados en los Departamentos de Santander, Norte de Boyacá, Antioquia, Cundinamarca, Caldas, Cesar, Chocó, Tolima, Meta, Cauca, Putumayo y Caquetá, en su mayoría se presentan como rocas impregnadas y sólo en pocos casos en vetas (como en el área de trabajo) y flujos superficiales.

Inicialmente la comercialización de asfaltita produjo resultados poco exitosos debido a que los procesos eran realizados de forma empírica, evitando inversiones en investigación, pero últimamente se ha impulsado la exploración y explotación, promoviéndolo como un material no convencional con gran importancia en el desarrollo ya que es eficiente y reduce los costos en sectores como la construcción y vías.

El interés del proyecto creció debido a la investigación inicial que se hizo en base a criterios litológicos, modelos geológicos de referencia para el tipo de mineral de interés, y reportes de manifestaciones del mineral clasificado.

Para una buena caracterización de la zona es recomendable complementar las técnicas geoeléctricas con estudios geoquímicos de las muestras recolectadas durante el trabajo de campo, con el fin de generar un aporte significativo en la exploración de asfaltita en la Mina el Edén y de esta manera optimizar el procedimiento de explotación del material.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir a la exploración de asphaltita usando el método de imagen resistiva (SEV, tomografías) usando como principal criterio la anomalía entre los materiales de interés y la roca fresca según lo descrito por Hays *et al.* (1967), y establecer una clasificación geoquímica de los tipos de asfaltos sobre la Formación La Luna (Ksl) presente en la zona de estudio.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Clasificar las muestras obtenidas en el desarrollo del proyecto por medio de análisis geoquímicos con los cuales se diferenciarán los tipos de asphaltita presentes en la zona de estudio.
- Generar perfiles del subsuelo utilizando la resistividad eléctrica a partir de sondeos eléctricos verticales y tomografías.
- Realizar una correlación entre los resultados de los sondeos eléctricos verticales SEV (respuesta eléctrica) y las litologías que se encuentran en contacto con las asphaltitas.
- Presentar los resultados de todo el estudio por medio de un mapa que permita tomar decisiones sobre la ampliación de nuevos frentes mineros de acuerdo a criterios geofísicos, geoquímicos y geológicos.

2. ANTECEDENTES

Hace ya más de 40 años se descubre que en la zona aflora un material extraño que fue llamado “carbón” de mala calidad o residuo de carbón, el cual fue explotado durante años y vendido bajo dicho nombre, sin embargo los vivientes de la zona dicen que hubo aprovechamiento del material por parte de las comunidades precolombinas. Aun en la actualidad algunas minas lo siguen denominando como carbón de esta manera se ha subvalorado el recurso a lo largo de los años.

Con la llegada del SEÑOR Danilo Gonzalez Ortega, quien “identificó” el material como asfaltita, se abrieron nuevas expectativas acerca del valor y el uso del material, pasando de ser una extracción completamente artesanal al punto que la compañía minera *Pacific Coal* tiene un escenario de exploración el que califican como (Carbón de vapor / Asfaltita) cuyo interés principal era sacar un combustible a base de asfaltita, pero el inconveniente que ha tenido esta compañía y las demás mineras que han explotado o “estudiado” el material de la zona es que no se ha dado con la principal fuente de suministro, que serían las vetas de asfaltita. Debido a la desinformación que se tiene en la zona sobre el material que allí se encuentra, en este trabajo de grado se busca aportar un método para la exploración y clasificación de la asfaltita presente, teniendo en cuenta que no se han realizado proyectos de esta magnitud anteriormente; la mina que se escogió para realizar el estudio cuenta con los requisitos que solicita la licencia de explotación expuestos en capítulo VIII (Los trabajos de exploración) de la ley 685 de 2001 por la cual se expide el código de minas, el cual sería el único estudio previo hecho en la zona.

En el momento esta área cuenta con tres minas en etapa de explotación y otras tres en exploración, además existen entre tres y cinco minas que trabajan esporádicamente, las cuales no cuentan con la licencia minera.

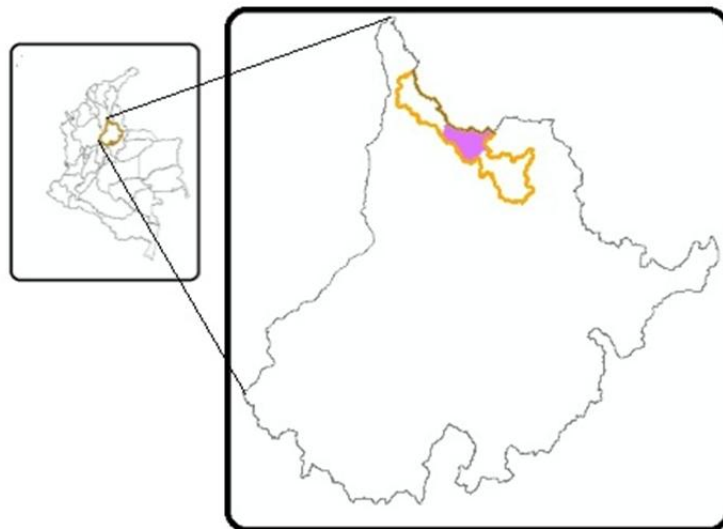
En el trabajo de grado “Interpretación de la madurez termal y discusión sobre la génesis a partir de la caracterización fisicoquímica de los hidrocarburos solidos (bitumen solido) hospedados en rocas sedimentarias cretácicas y cenozoicas en el límite de las cuencas del valle medio del magdalena y cordillera oriental, Colombia” (Garcia & Vargas, 2015), se realizaron estudios dentro de la vereda la tigre, en regiones aledañas a la mina El Edén, en la cual los autores clasificaron las asphaltitas como Gilsonita y Grahamita.

3. LOCALIZACIÓN

3.1 GEOGRÁFICA

La zona en la cual se realiza el proyecto está situada en el corregimiento La Tigra, en el Municipio de Río Negro, (ver figura 1). La tigre está ubicada sobre la provincia de Sotomayor, limita por el norte con el municipio la Esperanza y Cáchira correspondientes al departamento de Norte de Santander, al sur con el casco urbano de Rionegro y Bucaramanga, al oriente con el corregimiento Cuesta Rica y al occidente con San Rafael de Lebrija.

Figura 1. Ubicación corregimiento la Tigra donde se encuentra la zona de estudio.



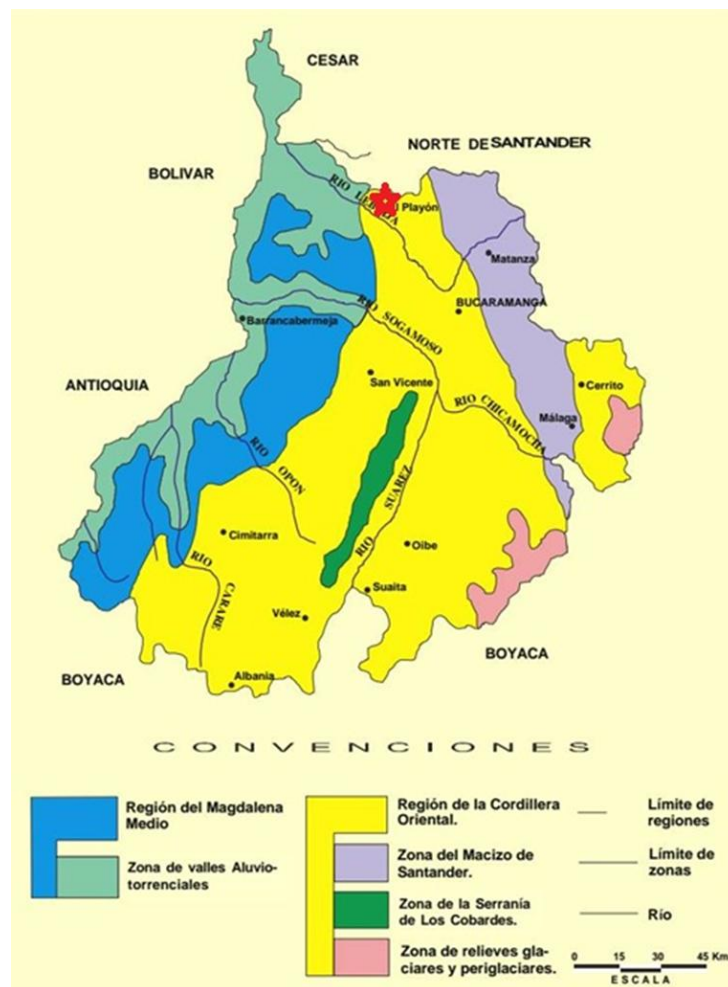
3.1.1 Acceso. La principal vía de acceso es vía a la Costa Atlántica, desde Bucaramanga a Rionegro, continua hacia San Alberto, hasta el sitio denominado tienda contadero, desde allí se toma la vía Contadero - Sabana de Torres, sobre el Km 11 se toma una desviación a mano izquierda por un trayecto de 800 m.

3.2 FISIAGRÁFICA

El relieve del departamento de Santander se distingue por tener dos grandes unidades fisiográficas denominadas Valle Medio del Magdalena al occidente del departamento y la cordillera Oriental al occidente del departamento.

El corregimiento La Tigra comprende parte del borde Occidental de la Cordillera Oriental perteneciente al sistema orogénico de los Andes, y a su costado occidental se encuentra el límite de la zona del Valle medio del Magdalena. (Ver figura 2).

Figura 2. Regiones Fisiográficas del Departamento de Santander.



(Adaptado del IGAC, 1992 NO SE ENCUENTRA EN LAS REFERENCIAS) como se muestra en la Memoria del dto de Santander (Royero & Clavijo (2001).

4. MARCO GEOLÓGICO

La Cordillera Oriental se caracteriza por ser de origen sedimentario y ambiente marino. Es el resultado de la inversión tectónica de una cuenca Meso-cenozoica, iniciando a finales del cretáceo y con una fase máxima de deformación en la Orogenia Andina durante el Mioceno medio-tardío. Al norte de la cordillera oriental se encuentra la Formación La Luna, la cual se caracteriza porque sus sedimentos fueron depositados en ambientes marinos y debido a aumentos de presión y temperatura a los que los sedimentos fueron sometidos se dio la generación del hidrocarburo a partir del Mioceno Temprano, la cual se extendió hasta la deformación andina, ya que en esta se generó una geometría estructural definida con rasgos característicos para la acumulación de hidrocarburos. (Ver figura 3).

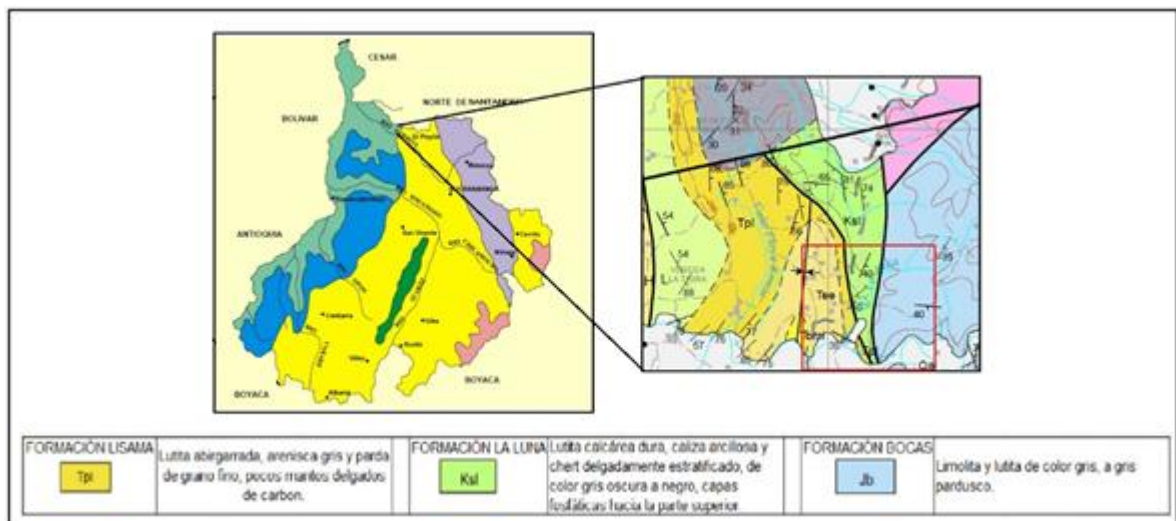
Con respecto a la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, esta se encuentra limitando por el occidente con la Cordillera Oriental, es una de las cuencas más prolíficas del país, se trata de una cuenca intracordillerana, basculada al oriente con tendencia homoclinal, perturbada por algunos pliegues y fallas (Pérez y Valencia, 1977). Al occidente la cuenca se caracteriza por tener un borde pasivo y una geometría monoclinal, con notables truncaciones de las formaciones cretácicas. Por el contrario hacia el oriente donde limita con la Cordillera Oriental la deformación se incrementa de manera continua y pasa a un complicado margen compresional (Martínez et al., 1989).

El Valle Medio del Magdalena cuenta con cuatro importantes grupos de estructuras:

1. Una serie de pares anticlinal-sinclinal, asimétricos y en echelon justo en el límite con la Cordillera Oriental, al sur de Bucaramanga. (ESRI, 1986).
2. Una mega falla de rumbo sinistral (Falla de Bucaramanga), a la que se le asocian pliegues cabalgantes marginales. (ESRI, 1986).

3. Un juego de fallas normales poco espaciadas, con sus bloques orientales hundidos, a lo largo del límite con la cordillera central. (ESRI, 1986).
4. Un conjunto de fallas transcurrentes menores, las cuales pueden ser consecuencia del rejuvenecimiento de antiguas fallas de basamento con dirección preferencial NW-SE. (Govea y Aguilera, 1986)

Figura 3. Mapa de localización modificado de INGEOMINAS



(Vargas y Arias, 2009). Plancha 97 Cáchira versión digital.

Estratigrafía

En este sector del departamento de Santander afloran rocas desde el Jurásico hasta el cuaternario. Las Formaciones presentes son las siguientes desde la más antigua a la más reciente: al oriente de la falla Lebrija la Formación Bocas (Jb), al occidente la Formación la Luna (Ksl) en la cual tenemos presencia de asfaltitas, y en la parte occidental de la zona la Formación Lisama (Tpl). Estas formaciones se observan en la Figura 3 y sus respectivas características se logran ver en la columna estratigráfica generalizada (Ver Figura 4).

Royero & Clavijo (2001), en la Memoria explicativa del departamento de Santander describieron las Formaciones Bocas, Luna y Lisama, que afloran en la zona, de la siguiente manera:

Formación Bocas (Jb).

Inicialmente fue denominada «Series Bocas» por Dickey (1941) y posteriormente fue redefinida como Formación Bocas por Ward, et al. (1973). La sección tipo se encuentra en cercanías de la localidad de Bocas al norte de Bucaramanga.

Esta unidad está constituida por una alternancia de limolitas, areniscas y arcillolitas calcáreas, gris verdosas y gris oscuras, limolitas gris verdosas, con nódulos calcáreos, conglomerados gris verdosos y arcillolitas gris oscuras, fosilíferas, limolitas gris verdosas a rojo grisáceas, levemente calcáreas. Hacia la parte superior se encuentran capas delgadas de rocas volcánicas. La Formación Bocas se depositó en un ambiente continental (REMY, et al., 1975). Su espesor aproximado es de 590 m.

Formación la Luna (Ksl).

Fue descrita por Garner (en JULIVERT, et al., 1968) y el nombre procede de la Quebrada La Luna al NW de Perijá, Zulia (Venezuela). En Colombia fue introducido el término por geólogos de la Caribbean Petroleum Company. La unidad está constituida por calizas gris oscuras, arcillosas, lutitas grises a negras, calcáreas, en capas delgadas, lutitas gris oscuras con delgadas intercalaciones de calizas arcillosas, concreciones de calizas con fósiles, que alcanzan más de dos metros de diámetro y capas delgadas de chert negro y también capas fosfáticas hacia la parte superior. En el Valle Medio del Magdalena la Formación La Luna se subdivide en tres miembros: el inferior Salada, el intermedio Pujamana y el superior Galembo. El ambiente de deposición es marino de aguas relativamente poco profundas, con poca ventilación en el fondo. El espesor varía entre 275 y 575 m.

Formación Lisama (Tpl).

Fue descrita originalmente por Link (en MORALES, et al., 1958) y publicada por primera vez por Wheeler (en DE PORTA, et al., 1974). Esta unidad aflora al occidente de Santander y su sección de referencia está en la Quebrada Lisama, afluente del Río Sogamoso.

La unidad se encuentra constituida por una secuencia de lutitas abigarradas, alternadas con areniscas grises, verdosas y pardas, de grano fino a medio y algunas capas delgadas de carbón. El depósito de estos sedimentos ocurrió en un ambiente bajo condiciones lagunares deltáicas. El espesor alcanza hasta 1.225 m.

Cuaternario (TQ, Qtf, Qal)

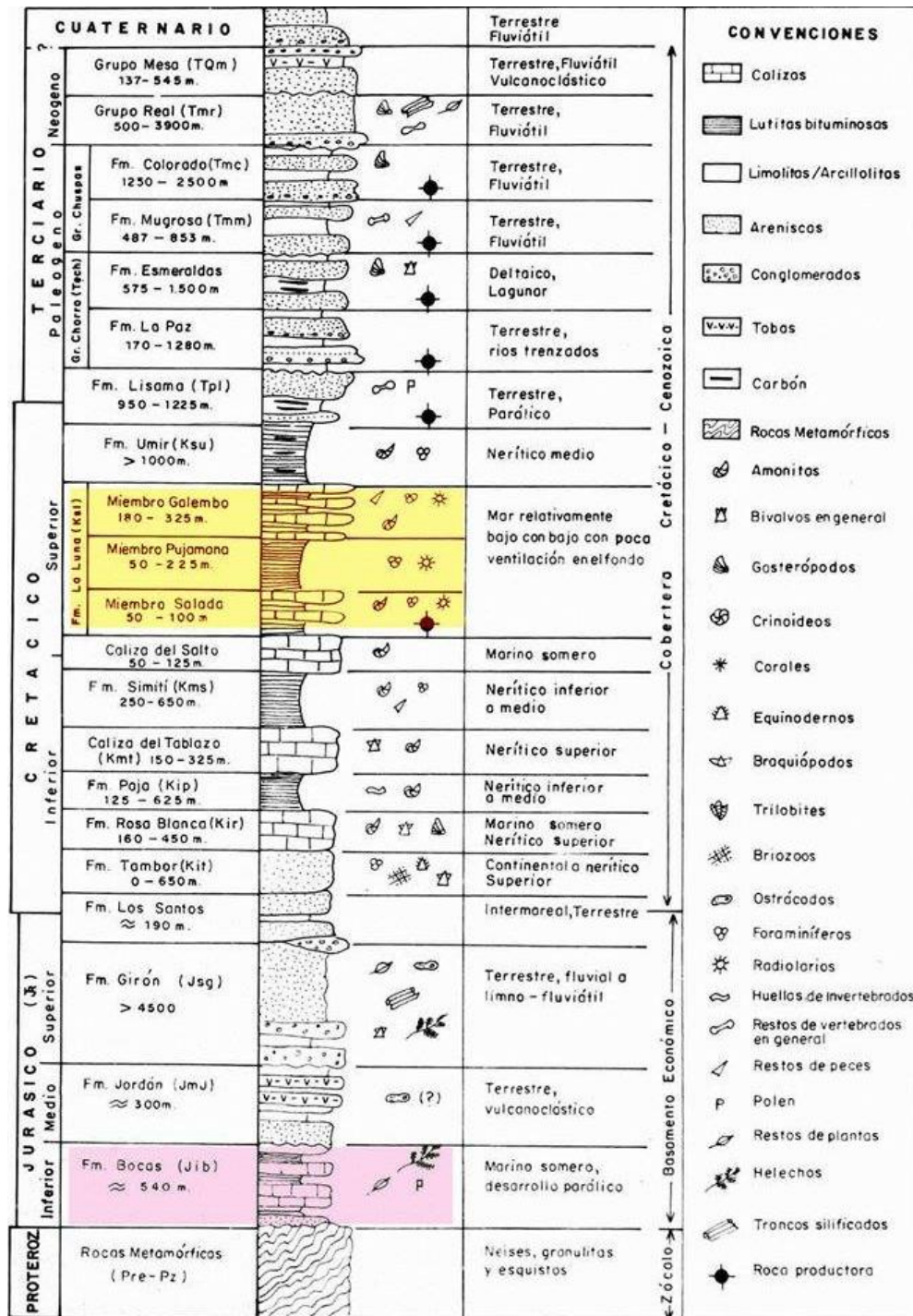
En el Departamento de Santander, los depósitos cuaternarios son muy variados en su origen y se encuentran ampliamente distribuidos a lo largo de los valles de los principales ríos y quebradas. Entre los depósitos de mayor extensión se diferencian y representan a la escala del mapa geológico, tres unidades predominantes.

La Unidad TQ está constituida por areniscas, limolitas y conglomerados débilmente consolidados y considerados como depósitos de origen fluvial, los cuales están representados por el Grupo Mesa y la Unidad Meseta de Bucaramanga, de edad pliocena-pleistocena; la Unidad Qtf se encuentra compuesta por depósitos no consolidados aluviales en abanicos y terrazas, es considerada de edad Pleistoceno, y la Unidad Qal está conformada por depósitos no consolidados de aluvión, coluvión, derrubios, glaciares, fluvioglaciares, que son considerados del Holoceno.

En la región se encuentra evidencia de hidrocarburo líquido, como en el pozo Bonanza ubicado aproximadamente a un kilómetro de la zona, rezumaderos dentro y fuera del área delimitada por la licencia e hidrocarburo sólido que está

siendo explotado en la Mina el Edén en la cual no se ha desarrollado exploración para aumentar la explotación y expandir sus frentes mineros, es por esto que se propuso realizar los métodos geofísicos utilizados en la Cuenca Uinta, destacando a Nettleton (1940) el cual planteó emplear el método de resistividad eléctrica para mapear la asphaltita, es por esto que se trabaja con tomografías eléctricas y sondeos eléctricos verticales (SEV) los cuales consisten en una serie de determinaciones de resistividades aparentes, efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y de separación creciente entre los electrodos de emisión y de recepción Alonso (2001), la interpretación de dichas mediciones con base en los contrastes entre ellas y las anomalías observadas, permite preparar modelos de las características del subsuelo y de su distribución espacial (Arias, 2011).

Figura 4. Columna estratigráfica generalizada del Valle Medio Del Magdalena donde se resalta la Fm. La Luna (Ksl) y la Fm. Bocas (Jib)

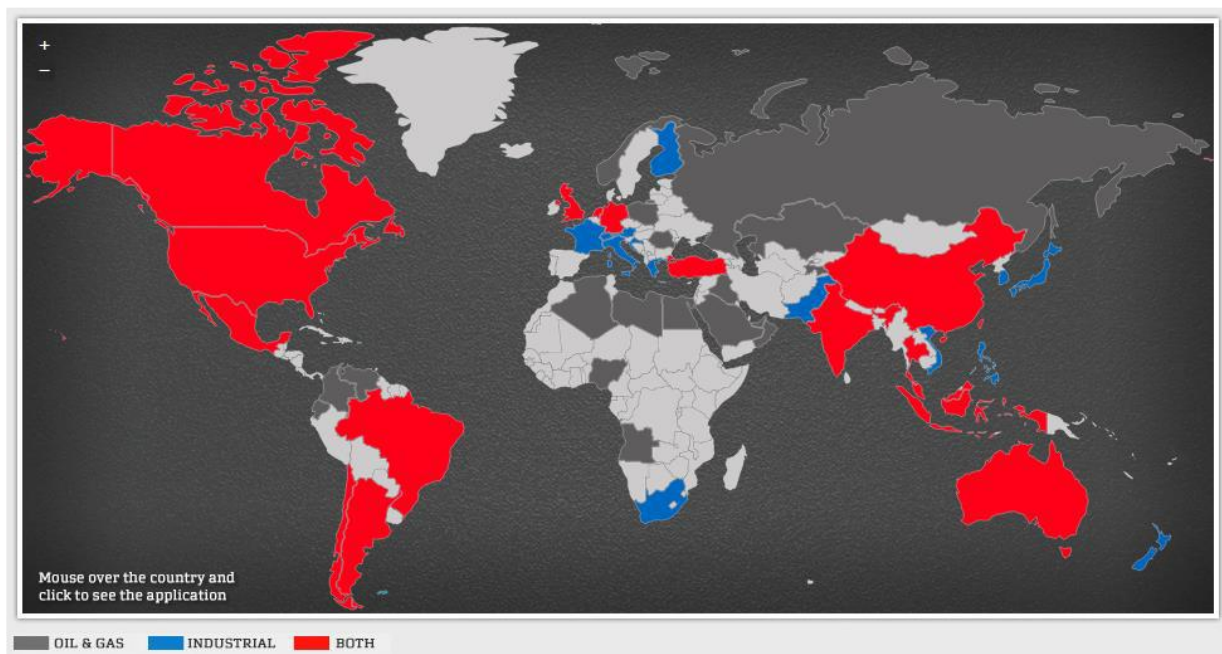


(Modificada de Morales 1958.) Como lo muestran Mojica & Franco (1990)

5. MARCO TEÓRICO

La asphaltita es una sustancia bituminosa natural no volátil, compuesta principalmente por hidrocarburo sólido sustancialmente libre de cuerpos de oxígeno, algunas veces asociado con materia mineral. El mayor productor y exportador de asphaltita (gilsonita) es Estados Unidos por medio de la empresa “*American Gilsonite*”, seguido de Sur América y Asia. La gilsonita presenta gran demanda mundial, siendo importada en más de 40 países (ver Figura 5). En el panorama nacional algunos proveedores de gilsonita son: Anhídridos y derivados de Colombia, Gilsonita de Colombia, Dorotech, Asphalip de Colombia.

Figura 5. Panorama Mundial sobre la demanda de Gilsonita (unos de los tipos de Asphaltita con mayor precio en el mercado) según sus usos. En Gris: Gas y Petróleo; en azul: Industria; rojo: ambos usos.



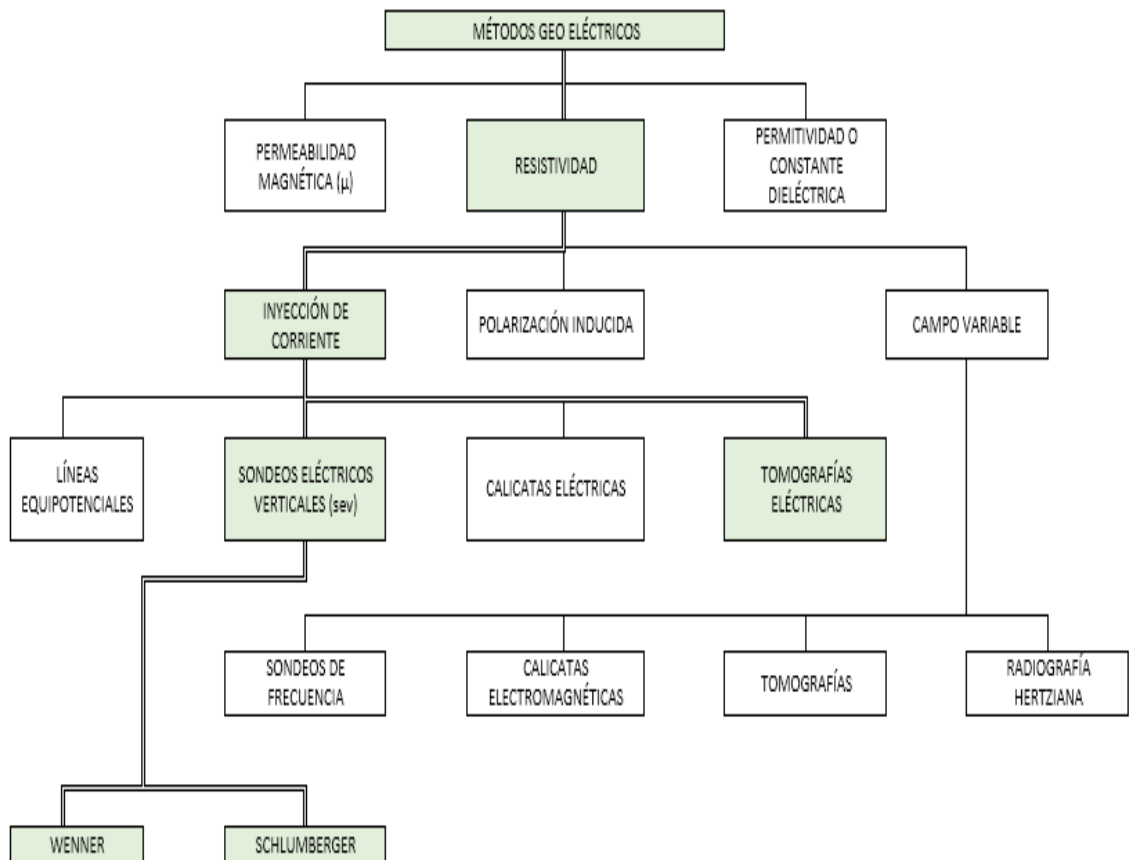
Tomado de: <http://www.americangilsonite.com/>

En los siguientes apartes se explicaran los fundamentos de los métodos geofísicos empleados en este trabajo y los conceptos geoquímicos básicos para su clasificación.

5.1 GEOFÍSICA

La geofísica es una ciencia que utiliza las propiedades físicas fundamentales ya sean mecánicas, eléctricas, térmicas, magnéticas, entre otras; para complementar los estudios geológicos evidenciando el comportamiento y características del subsuelo. Ver Figura 6.

Figura 6. Mapa conceptual métodos geoelectricos.



La geoelectrica es una rama de la geofisica con la cual es posible determinar estructuras en el subsuelo debido a las variaciones de las propiedades electricas del mismo, como la conductividad especifica o resistividad especifica.

Se utilizo el método de (SEV) sondeos electricos verticales para obtener la distribución de las resistividades en el subsuelo, lo cuales recogen la información en la vertical de un punto. Así como también el método de (TE) Tomografía eléctrica las cuales obtienen medidas de resistividad aparente.

Existen varios métodos para la medición de resistividades del subsuelo; uno de estos es el metodo de cuatro electrodos; el cual consta de dos electrodos de emisión (A y B) los cuales crean campo electrico y dos electrodos de Medición (M y N) los cuales dan la diferencia de potencial ΔV . (con este metodo se obtiene la resistividad aparente ρ_a).

5.1.1 Dispositivo simétrico de wenner. En este dispositivo los cuatro electrodos (A, B, M y N) deben estar dispuestos en línea recta, y deben estar separados un electrodo del siguiente una distancia (a), el punto de máxima exploración se denomina (0). Figuras 7 Y 8.

Figura 7. Esquema simplificado del dispositivo de Wenner.

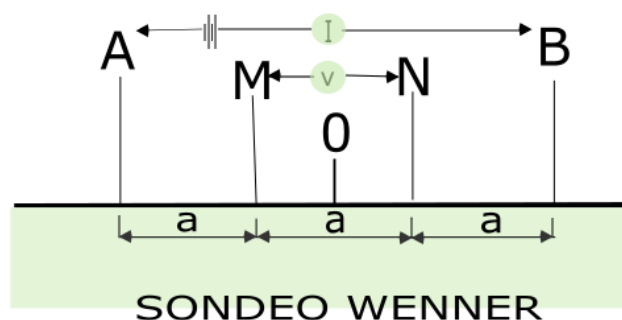
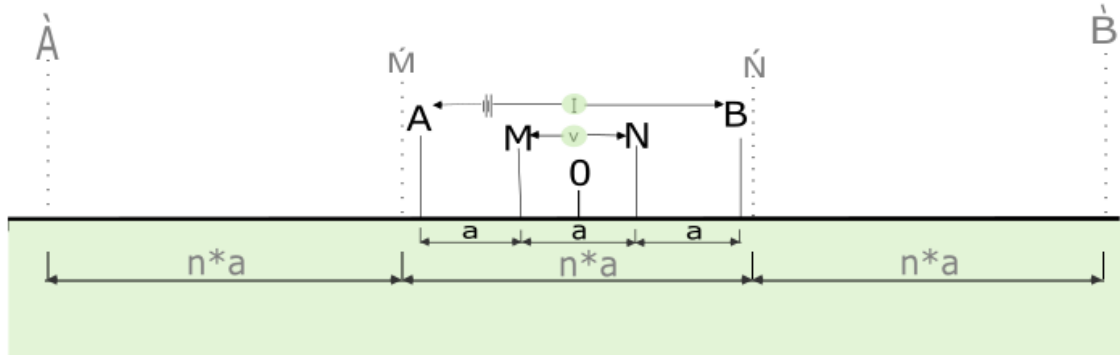


Figura 8. Esquema dispositivo Wenner para una profundidad mayor.



5.1.2 Dispositivo simétrico de schlumberguer. Al igual que en el dispositivo de Wenner los cuatro electrodos deben estar ordenados en línea recta, la diferencia se basa en que los electrodos de medición (M y N) deben estar separados a una distancia menos a un tercio ($\frac{1}{3}$) de la distancia entre los electrodos de emisión (A y B). Figuras 9 Y 10

Figura 9. Esquema simplificado del dispositivo Schlumberguer.

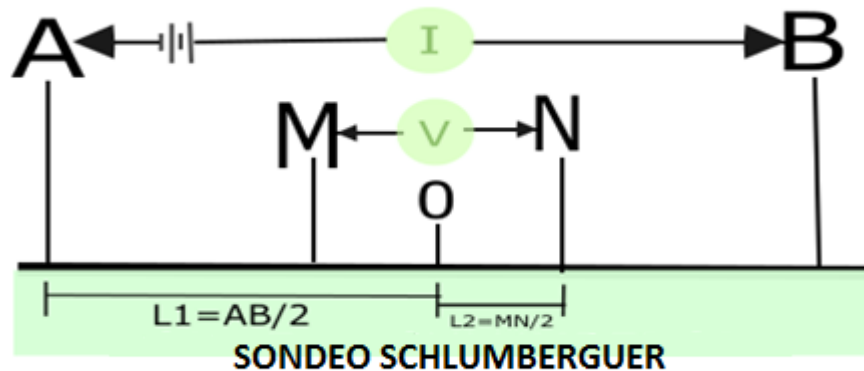
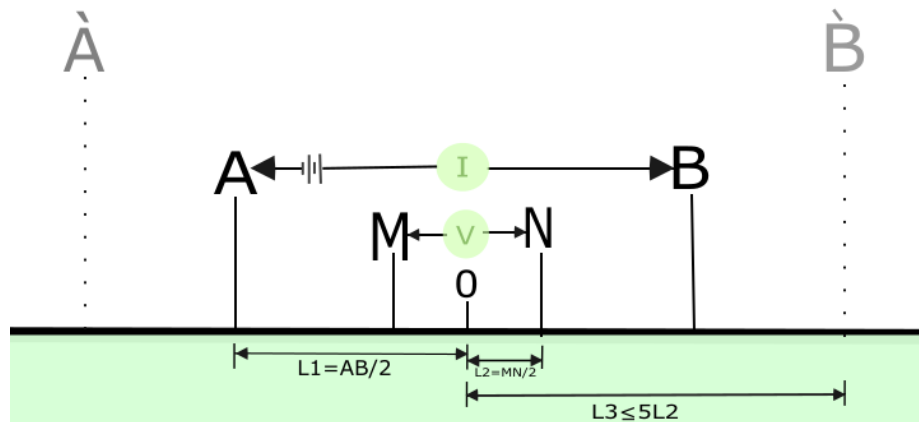


Figura 10. Esquema dispositivo Schlumberguer, aumentando la distancia entre electrodos de emisión.



5.1.3 Tomografías eléctricas (TE). Las Tomografías eléctricas se basa principalmente en recoger datos de resistividades aparentes a partir de un número elevado de medidas realizadas desde la superficie con una serie de electrodos ubicados en línea recta separados a una distancia (a) alternativamente, su resultado final es una sección 2D que muestra la distribución real de las resistividades del subsuelo las cuales se pueden asociar a estructuras o anomalías de interés geológico, ambiental o geotécnico. Es necesario el uso de programas de inversión 2D para procesar los datos arrojados en campo. Figuras 11 y 12.

Figura 11. Disposición básica del sistema para el desarrollo de la Tomografía Eléctrica.

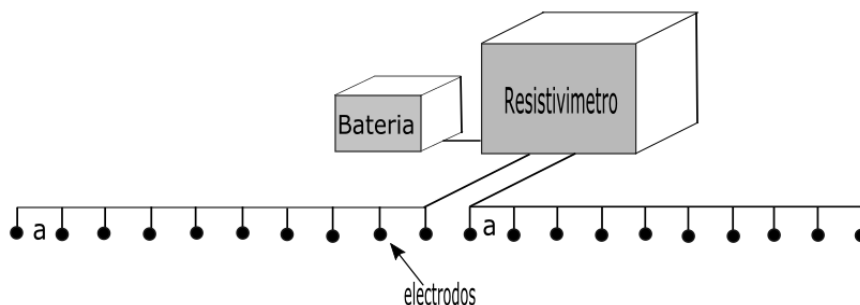
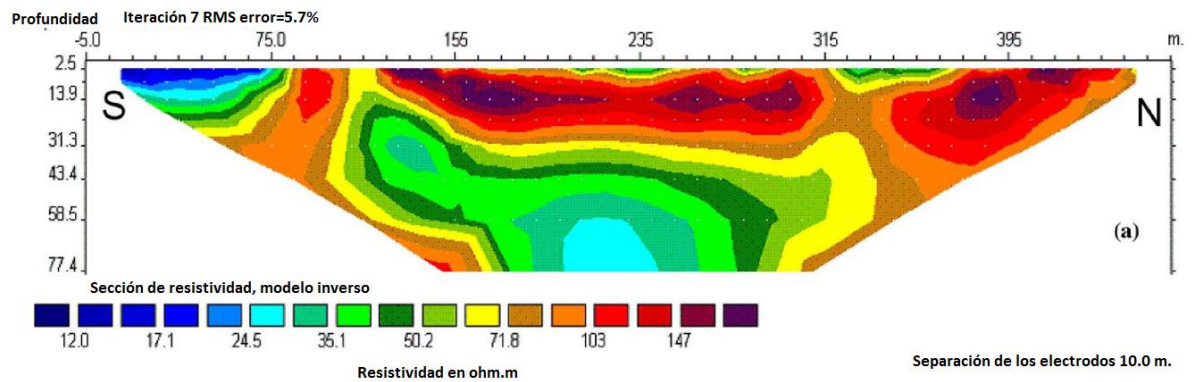


Figura 12. Ejemplo de un modelo 2D en resistividad y profundidad verdadera.



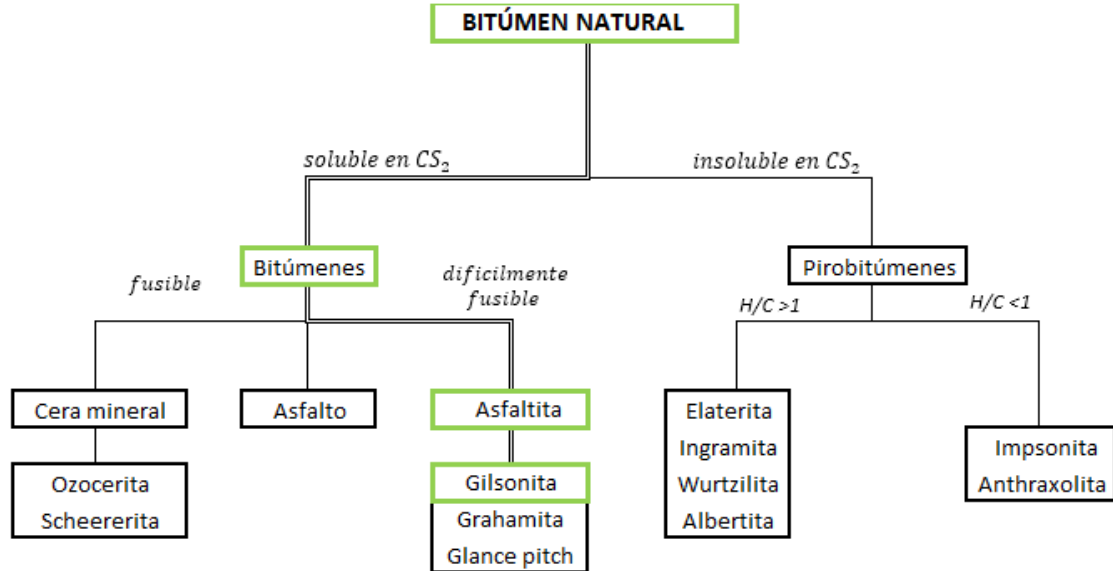
Tomado de Kumar et al. (2011)

5.2 GEOQUÍMICA

En este marco teórico se exponen los conceptos necesarios para entender todo lo relacionado con las asphaltitas; como la clasificación general de bitúmenes sólidos, los diferentes tipos de asphaltita: gilsonita, grahamita y glance pitch y sus propiedades típicas, el origen de las asphaltitas, el modelo base y la situación actual de este material en nuestro país. Por último se tienen las pruebas realizadas a las asphaltitas en este proyecto con su correspondiente concepto. Cada una de las definiciones está dada con base en los diferentes recursos bibliográficos adquiridos.

5.2.1 Bitúmenes Sólidos. Existe confusión al momento de emplear los términos bitúmenes, bitúmenes asfálticos, asfaltos, asphaltitas, etc. Para esto autores como Abraham (1945, 1960), Jacob (1967, 1989), (Hunt, 1979), entre otros; desarrollaron una clasificación genérica para los diferentes tipos de bitúmenes, como se observa a continuación (Figura 13):

Figura 13. Clasificación general de bitúmenes sólidos.



Tomado y modificado de la clasificación de Hunt (1979) con respecto a la clasificación de Abraham (1960).

Jacob (1989) empleó el término “migrabitúmenes” para hacer referencia a los bitúmenes sólidos que aparecen frecuentemente dispersos en las rocas. Estos hidrocarburos sólidos son bitúmenes secundarios o macerales secundarios generados a partir de materia orgánica fósil durante la diagénesis y catagénesis. Son amorfos y se adaptan a la forma de las cavidades que ocupan como intersticios, fracturas, cavidades en microfósiles, entre otros. (Ver Tabla 1). La clasificación propuesta por Jacob (1989) en la que dividió los migrabitúmenes en asfaltitas e impsonitas.

Tabla 1. Clasificación de migrabitúmenes.

Clasificación de los bitúmenes sólidos naturales ("migrabitúmenes")		
Grupo maceral	Subgrupo maceral	Maceral
		Ozocerita

Clasificación de los bitúmenes sólidos naturales ("migrabitúmenes")	
	Asfalto
	Gilsonita
Asfaltita	Glance pitch
	Grahamita
Migrabitúmen	Wurtzilita
	Albertita
	Epi-impsonita
Impsonita	Meso-impsonita*
	Cata-impsonita*

*Antraxolita como un sinónimo (e.g. Tomkeieff, 1954).

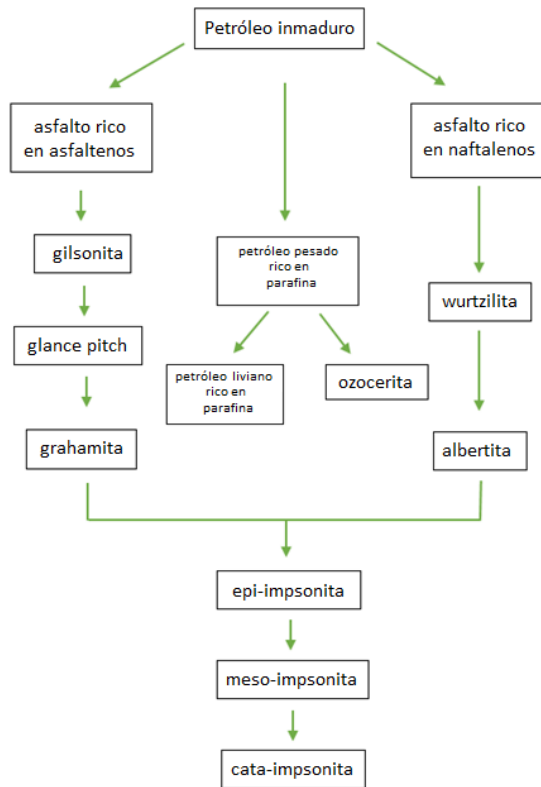
Tomado y modificado de Jacob (1989)

Las asphaltitas han sido consideradas durante mucho tiempo productos de alteración del petróleo crudo (Eldridge, 1901; Richardson, 1910; Abraham, 1920, 1960). El petróleo una vez formado se puede convertir gradualmente en otros tipos de bitúmenes dependiendo de la temperatura, la presión y el tiempo. Como define Abraham (1929): las asphaltitas como los otros bitúmenes son sustancias nativas de color, dureza y volatilidad variable, compuestas principalmente por hidrocarburos, libres sustancialmente de cuerpos oxigenados; algunas veces asociadas con materia mineral, los constituyentes no minerales son fusibles y en gran parte solubles en disulfuro de carbono, formando productos de sulfonación insolubles en agua.

5.2.2 Génesis. Jacob (1989) mencionó que el desarrollo de los migrabitúmenes se da al inicio de la ventana de generación de crudo con una reflectancia de la vitrinita alrededor de 0.35-0.60%. Algunos microorganismos como las algas son la posible fuente de material para que ocurra este proceso. No se conocen detalles acerca de las condiciones especiales del desarrollo del primer miembro de cada

uno de los tres grupos de migrabitúmenes (asfalto, wurtzilita y ozocerita). Como se muestra en el siguiente esquema. (Ver Figura 14).

Figura 14. Esquema de la génesis de diferentes grupos de migrabitúmenes.



Tomado y modificado de Jacob (1989).

5.2.3 Clasificación. Las asphaltitas están clasificadas en tres grupos: Gilsonita, Glance pitch (lignito bituminoso) y Grahamita. Se diferencian primordialmente por su gravedad específica y su punto de ablandamiento que está por encima de 270° F (Breger and Miles, 1971). (Ver Tabla 2). Estas sustancias son prácticamente solubles en disulfuro de carbono y a continuación se presenta una Tabla con sus propiedades características:

Tabla 2. Propiedades típicas de las asphaltitas (gilsonita, grahamita y glance pitch).

Propiedad	Gilsonita	Grahamita	Glance pitch
-----------	-----------	-----------	--------------

Gravedad específica (77°F)	1.01-1.10	1.15-1.20	1.10-1.15
Punto de Fusión (°F)			
(método del anillo y la bola)	270-375	375-625	270-375
Raya	Marrón	Negro	Negro
Carbono fijo (wt%)	10-20	35-55	20-35
Materia mineral (wt%)	<1	>50	0.3
Bitumen (soluble en CS ₂)	98	45-100	99
Valor calorífico (Btu/lb)	18.000	-	-
Calor específico (300°F)	0.52	-	-
Dureza (Escala de Mohs)	2	2	1
Penetración (77°F)	0-3	0	0
<i>Análisis principal (wt%)</i>			
Carbono	85.5	86.6	-
Hidrógeno	10.0	8.7	-
Azufre	0.3	1.8	-
Nitrógeno	2.5	2.2	-
Oxígeno	1.5	0.7 (por diferencia)	-

Tomado y modificado de Yen (1973).

5.2.4 Modelo de Asfaltita y Ambito Nacional. El modelo principal de gilsonita se da en los depósitos de la Cuenca Uinta en Utah, Norte América. Como menciona Monson y Parnell (1992), existe una serie de fracturas que están rellenas con venas de gilsonita en el Este de la Cuenca Uinta. Ellos proponen un modelo que involucra dos etapas: en la primera la hidrofracturación fue causada por elevadas presiones de poro, y en la segunda fase, las fracturas fueron inyectadas con hidrocarburo líquido, el cual posteriormente se solidificó en forma de venas.

En el ámbito nacional se tiene el Valle Medio del Magdalena (VMM) que es una cuenca de carácter intramontañoso localizada en la parte central de Colombia. Comprende parte de los departamentos de Santander, Boyacá, Cundinamarca y Antioquia. Esta cuenca es la segunda provincia petrolífera más prolifera del país después de la cuenca de los Llanos.

El lugar donde se llevó a cabo el desarrollo de este proyecto está ubicado en la cuenca del Valle Medio del Magdalena. Según Jaramillo et al. (2014) en las estribaciones circundantes a la cuenca del VMM, los diques de gilsonita aparecieron desde hace largo tiempo pero solo durante la última década ha existido cierta producción comercial de gilsonita. Los bitúmenes aparecen como venas en las rocas del Mesozoico y Cenozoico y las venas están relacionadas con fracturas de tensión originadas por los movimientos laterales izquierdos de la Falla de Santa Marta.

Las asphaltitas de esta región poseen propiedades altamente variables como el punto de ablandamiento que puede estar entre 35°C hasta 450°C. Los diques de gilsonita poseen geometría predominantemente lenticular, con magnitudes de hasta 30 metros de ancho, 500 metros de largo y hasta 150 metros de profundidad que se determinaron por técnicas de perforación.

TÉCNICAS EMPLEADAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LAS ASFALTITAS

Para la clasificación geoquímica y estructural de las muestras analizadas se emplearon diferentes análisis con los cuales se lograron observar propiedades microscópicas de gran ayuda al momento de conocer la composición de las rocas. El contenido de materia orgánica se logra obtener en porcentajes por medio del análisis de Carbono Orgánico Total, la composición química se registró en las pruebas de Difracción de Rayos X y Microscopía Electrónica y se llevaron a cabo las pruebas de densidad y punto de ablandamiento para obtener propiedades otras químicas de las muestras.

5.2.5 Contenido de TOC (Carbono Orgánico Total). Esta técnica tiene como objetivo determinar la riqueza orgánica de las muestras de asphaltita analizadas, arrojar el porcentaje de materia orgánica de las rocas y junto con los demás análisis determinar el tipo de asphaltita.

Los valores de TOC se indican en porcentaje en peso de carbono. Por ejemplo, el valor TOC de 1 en peso. % Significa que en 100 g de muestra, hay 1 g de carbono orgánico. Hay tres componentes de un valor de TOC, es decir, la materia orgánica extraíble (carbono MOE), carbono convertible y la fracción de carbono residual. MOE es la fracción de carbono en el petróleo y el gas ya generado pero no expulsado. El carbono convertible representa el potencial restante de una muestra para generar petróleo y gas. Bajo las condiciones de presión y temperatura adecuadas, esta parte del TOC se transformaría en bitumen, a continuación en aceite y finalmente en gas. La fracción de carbono residual representa el carbono orgánico que no tiene potencial para producir petróleo o gas debido a su composición química y estructural (Sondhi, 2011).

Los dos principales métodos analíticos para la medición de TOC son método de combustión Leco y el método de pirolisis-oxidación combinada de Rock-Eval (Jarvie, 1991).

En las muestras de asfaltita no es posible realizar pirolisis Rock-Eval ya que al ser sometidas a elevadas temperaturas se ablandan fácilmente ocasionando daños en el dispositivo que realiza el análisis.

La muestra puede ser clasificada según su %TOC y para la interpretación de los resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros geoquímicos de interpretación de TOC.

(%) TOC	INTERPRETACION
0.0 – 0.5	Pobre
0.5 – 1.0	Regular
1.0 – 2.0	Bueno
2.0 – 4.0	Muy Bueno
> 4.0	Excelente

Tomado de Peters y Cassa (1994).

5.2.6 Difracción de Rayos X (DRX). El uso de esta técnica nos permite determinar la estructura detallada de un material: sus átomos y moléculas y la forma como están dispuestos.

Este procedimiento está regido por la ley de Bragg ($n \lambda = 2d \cdot \sin \theta$), cuando un haz de rayos X incide sobre un material sólido, una porción de este rayo se dispersa en todas las direcciones debido a los electrones asociados a cada átomo que está dentro del camino del haz.

La difracción de rayos X identifica y cuantifica las fases de las muestras policristalinas, de acuerdo con los métodos Hanawalt, Boolean-search y Rietveld (Hernández et al., 2014)

Con estas técnicas se puede conocer la posición de los átomos, iones y moléculas que forman el material analizado, en donde también se puede obtener un análisis cualitativo y cuantitativo de las fases cristalinas de las muestras trabajadas. En el análisis cualitativo se realiza una comparación gráfica directa del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos del International Centre for Diffraction Data (ICDD) empleando el método Boolean-search y el análisis cuantitativo se realiza mediante el método de Rietveld del perfil observado sobre un perfil calculado, por medio de mínimos cuadrados.

5.2.7 Método del Polvo. Esta fue la técnica analítica que se empleó en las muestras, la cual es la más utilizada en el estudio de materiales cristalinos y consiste en hacer pasar un haz de rayos X a la muestra, el cual contiene información sobre la posición y tipo de átomos encontrados en su paso. Los microcristales de la muestra se colocan en todas las posibles orientaciones de la red, de esta manera dispersan elásticamente los haces de rayos X en diferentes

direcciones y los amplifican por interferencia constructiva, originando un patrón de difracción.

La técnica de polvo constituye una herramienta de gran utilidad ya que presenta características que permiten estudiar cristalográficamente las sustancias que no son posibles de obtener en forma de monocristales.

Como cada fase cristalina produce un patrón característico de difracción debido a que no existen dos materiales con el mismo diagrama de difracción, se puede tener plena confiabilidad en este examen ya que se logra distinguir una sustancia de otra.

5.2.8 Microscopía electrónica de Barrido (SEM). El laboratorio de microscopía ubicado en el Parque Tecnológico de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander cuenta con un microscopio electrónico de barrido QUANTA 650 FEG ambiental (ESEM), el cual hace incidir un barrido de haz de electrones sobre la muestra para formar una imagen de alta resolución a alto vacío, bajo vacío y vacío extendido para la caracterización de muestras conductoras y no conductoras. Este haz tiene una baja dispersión angular, lo que produce imágenes de mayor resolución que otros microscopios con emisores convencionales. Además este microscopio emplea la sonda EDAX para identificar cuantitativamente los elementos que componen cada muestra.

El microscopio electrónico de barrido proporciona información morfológica, estructural y topográfica sobre la superficie de los sólidos. Proporcionando una imagen donde se revelan las características principales de cada muestra.

5.2.9 Contenido de Azufre. Con el estudio geoquímico se logra determinar la abundancia de los elementos químicos que constituyen una muestra y mediante el análisis de TOC se logra obtener no solo el contenido de carbono orgánico total

sino también el contenido de azufre en materiales sólidos que son sometidos a procesos de combustión.

Como en el caso de las asphaltitas, el análisis completo arrojó información acerca del contenido de azufre presente en cada muestra.

5.2.10 Densidad por medio de un picnómetro. Esta técnica es simple y útil donde se puede medir la densidad de sólidos y líquidos, en este procedimiento se usa un picnómetro con un tapón esmerilado y hueco. El picnómetro es un recipiente calibrado que permite mantener un volumen de líquido constante dentro del picnómetro.

Para obtener la densidad del sólido, este debe introducirse dentro del picnómetro sin que se disuelva o reaccione con el agua. Se adquiere la densidad de dicho material por medio de la utilización de diferentes fórmulas, siguiendo este procedimiento:

- ✓ Se pesa el sólido dentro del picnómetro y se obtiene el valor

$$m_1 = m_{\text{cuerpo}} \quad (1)$$

- ✓ Se pesa el sólido junto al picnómetro lleno de agua destilada y se obtiene el valor

$$m_2 = m_{\text{cuerpo}} + m_{\text{agua}} + m_{\text{picnómetro y agua}} \quad (2)$$

- ✓ Se pesa el cuerpo en el interior del picnómetro lleno de agua hasta el enrase y se obtiene la siguiente fórmula:

$$m_3 = m_{\text{cuerpo}} + m_{\text{picnómetro y agua}} \quad (3)$$

Luego, tenemos que:

$$\rho_{\text{cuerpo}} = \rho_{\text{agua}} \cdot \frac{m_{\text{cuerpo}}}{m_{\text{agua}}} = \rho_{\text{agua}} \cdot \frac{m_{\text{cuerpo}}}{m_2 - m_3} \quad (4)$$

Se siguen todos los pasos y se aplica cada fórmula correspondiente para obtener la densidad ρ del sólido analizado por medio del método con picnómetro.

5.2.11 Punto de ablandamiento. Los bitúmenes sólidos como las asfaltitas son productos que no cambian del estado sólido al estado líquido a una temperatura definida, sino que se vuelven más blandos y menos viscosos cuando se eleva la temperatura. El punto de ablandamiento se determina por medio de un método que produce resultados comparables con otras técnicas, como por ejemplo, el punto de fusión.

El punto de ablandamiento se utiliza para clasificar productos bituminosos. En este proceso el material se somete a elevadas temperaturas y justo cuando tiende a fluir es cuando se debe tomar la temperatura, siendo esta el punto de ablandamiento de la muestra analizada.

Esta técnica es primordial para conocer la calidad del material estudiado, en este caso la calidad de asfaltita, se debe tener en cuenta que este material se utiliza en sectores como la construcción y vías ya que es de gran eficacia y reduce costos. Por esto mismo se deben realizar las técnicas necesarias para conocer las propiedades de este material.

El punto de ablandamiento suministra la información de la resistencia de este bitumen, es de vital importancia conocer esta propiedad debido a que el material se utiliza en ambientes donde es sometido a grandes esfuerzos de carga y a altas temperaturas, con el fin de determinar la calidad y los atributos de la asfaltita para comercializarla en estos mercados.

6. METODOLOGÍA

La metodología aplicada en este proyecto se enfoca en dos análisis principales: el análisis geoquímico de las asfaltitas y el análisis geoeléctrico del subsuelo de la mina El Edén donde se desarrolló el proyecto. La metodología se dividió en 5 etapas:

6.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta primera etapa se realizó la búsqueda bibliográfica necesaria para entender todo lo relacionado con las asfaltitas, tanto su origen, como su formación, características típicas y explotación de este material en nuestro país. También se realizó una búsqueda avanzada acerca de los métodos geoeléctricos ejecutados. Esta información se consultó en la base de datos de la Universidad Industrial de Santander, además se adquirieron otros recursos electrónicos como artículos, libros, tesis de grado, entre otros. Toda esta etapa generó mayor entendimiento de dichos temas y despejó las dudas que surgieron a medida que se desarrolló el proyecto.

6.2 RECONOCIMIENTO DE CAMPO

Esta etapa consistió en reconocer la zona de estudio, la cual cuenta con dos zonas importantes: la mina El Edén y la mina Villa Rica que están localizadas en la vereda La Tigra, Rionegro, las cuales son propiedad de la empresa LAVGR.

El estudio principal de este proyecto se realizó en la mina El Edén, mientras que en la mina Villa Rica (ver Figura 15). Solamente se sacaron tres muestras (M-ME05, M-ME06 y M-ME07) para ser comparadas con las muestras de la mina El Edén (M-ME01, M-ME02, M-ME03 y M-ME04).

Se hizo el reconocimiento de las instalaciones de la mina El Edén (ver Figura 16). Después se realizó un recorrido por las zonas aledañas a este punto y se encontraron rezumaderos en algunos de los potreros visitados (ver Figuras 17 y 18). De esta manera culminó el reconocimiento de la zona estudiada.

Figura 15. Mina Villa Rica sin licencia para ser explotado el material, donde se observa un dique de asfaltita.



Figura 16. Instalaciones de la mina el Edén. **A.** Material extraído directo para empacar. **B.** Zona de carga de la asfaltita. **C.** Excavación donde se realiza la extracción del material asfáltico, se observa una veta de gran tamaño. **D.** Diques de material asfáltico.



Figura 17. Potrero con presencia de rezumaderos, a 50 metros de la mina El Edén.



Figura 18. Rezumadero de petróleo en el potrero aldaño a la mina El Edén.



6.2.1 Recolección de las muestras. Se reunieron 7 muestras en total, de las cuales 5 son asfaltitas, 1 es roca con presencia de bitumen y 1 roca sedimentaria. Ver Figuras 19 a 25

Figura 19. Muestra de asfaltita..



Figura 20. Muestra de asfaltita.



Figura 21. Muestra de asfaltita.

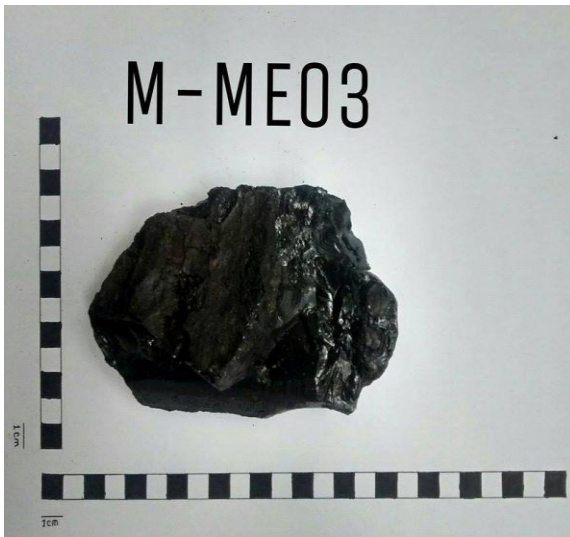


Figura 22. Muestra roca Fm La Luna (Ksl).



Figura 23. Muestra de asfaltita.

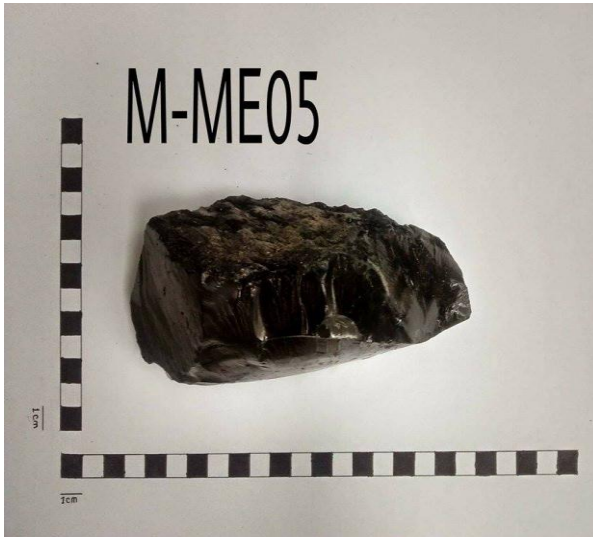
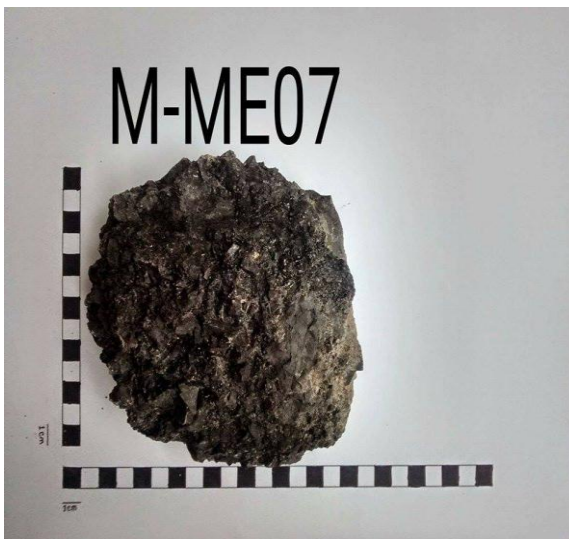


Figura 24. Muestra de asfaltita.



Figura 25. Muestra de roca con presencia de bitumen.



Las muestras M-ME01, M-ME02, M-ME03 y M-ME04 se obtuvieron de la mina El Edén (ver Figura 26) y las muestras M-ME05, M-ME06 y M-ME07 de la mina Villa Rica (ver Figura 27). Para visualizar el lugar de donde se tomaron las muestras se elaboró un mapa donde se referenció cada muestra con su respectiva localización geográfica. (Anexo 1)

Figura 26. Mina El Edén. Presencia de dique de gran tamaño.



Figura 27. Mina Villa Rica. Presencia de estratificación en esta área.



6.2.2 Adquisición de los sondeos. En esta etapa se llevaron a cabo los sondeos eléctricos verticales mediante un Terrameter SAS 1000/4000 de la marca Sueca ABEM (ver Figura 28). Suministrado por la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander.

El equipo cuenta con 3 modos de funcionamiento: Resistividad, polarización inducida (IP) y potencial espontáneo (SP).

Como menciona Ávila et al. (2014) en su artículo, la resistividad es un método activo que emplea las mediciones de potencial eléctrico asociado con el subsuelo y el flujo de corriente eléctrica generada. En el caso de la polarización inducida IP los autores nos hablan de un método que se emplea para mediciones de las variaciones transitorias del potencial y este tipo de funcionamiento se utiliza comúnmente para detectar concentraciones de barro o granos metálicos que conducen la electricidad. Por último los autores destacan el potencial espontáneo SP como un método más pasivo que emplea la medición de potenciales eléctricos naturales.

Es importante resaltar que para el desarrollo de este proyecto se utilizó el modo de funcionamiento de resistividad, con el cual se adquirieron los sondeos eléctricos verticales.

Para realizar correctamente la toma de datos se empleó el Terrameter SAS 1000/4000 junto con cada uno de sus instrumentos:

- Batería de NiCd incorporada con un sistema de enganche
- 4 electrodos de acero inoxidable o no polarizables
- Adaptador SAS-EBA para batería externa de 12 V
- Juegos de clave:
 - 2x2m de cable de conexión de color negro
 - 2x2m de cable de conexión de color rojo
 - 2x750m de cable de corriente, 0.75 mm², en carrete
 - 2x750m de cable de potencial, 0.75 mm², en carrete
- 4 pinzas de cocodrilo

Se realizaron en total 10 sondeos eléctricos verticales de los cuales 8 se obtuvieron mediante el arreglo Wenner y los otros 2 sondeos se adquirieron con el arreglo Schlumberger. El tipo de arreglo se escogió dependiendo del terreno estudiado y sus condiciones ya que para realizar Schlumberger se necesita un área relativamente extensa y plana, características que no se presentaban en todos los lugares de la mina. La localización de los sondeos se presenta en un mapa anexo. Ver anexo 1.

Figura 28. Terrameter ABEM SAS 1000/4000.



Tomado de <http://www.abem.se/resistivity/sas1000.htm>

6.3 ANÁLISIS DE LABORATORIO

6.3.1 Contenido de TOC (Carbono Orgánico Total). Este análisis se realizó con el fin de obtener el porcentaje de carbono orgánico total en cada una de las muestras. Para esto las muestras fueron maceradas, llevadas al laboratorio de Geología del Petróleo en Guatiguará, sede de la Universidad Industrial de Santander, allí las muestra se colocaron en un crisol cada una y se secaron en el horno, posteriormente se tomó 1 gramo aproximadamente de cada muestra y se colocó cada gramo en un crisol de wollastonita diferente que resisten temperaturas superiores a los 1000°C, para introducir en el analizador y obtener los resultados de las 7 muestras analizadas.

Este procedimiento se llevó a cabo en un analizador de carbono y azufre marca Leco SC-144DR (ver Figura 29). En el cual las muestras sufren combustión a 1350°C. Todo el carbono de la muestra se convierte en dióxido de carbono y se mide empleando el software del equipo SC144R que arroja el % de TOC usando el detector infrarrojo que posee el dispositivo.

Figura 29. Equipo Leco SC-144R y software SC144R utilizado en la determinación de contenido de TOC y azufre.



Es importante resaltar que con este análisis también se obtiene el contenido de azufre presente en cada una de las muestras analizadas.

6.3.2 Difracción rayos X. En esta prueba fue realizada en el laboratorio de Difracción de Rayos X ubicado en Guatiguará, Sede de la Universidad Industrial de Santander. Se analizaron 6 muestras mediante el método del polvo DRX-P. Los resultados se obtuvieron por medio de un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con los siguientes parámetros. (Ver Figura 30)

Figura 30. Parámetros de medida de DRX en polvo.

Condiciones DRX-P, equipo BRUKER D8 ADVANCE	
Voltaje	40 (kV)
Corriente	30 (mA)
Rendija de Divergencia	0.6 mm
Rendija Soller Primario	2.5°
Muestreo	0.01526° 2θ
Rango de Medición	3.5-70° 2θ
Radiación	CuKα1
Filtro	Níquel
Detector	Lineal LynxEye
Tipo de Barrido	A pasos
Tiempo de Muestreo	0.4 segundos

6.3.3 Microscopia electrónica de barrido (SEM). Se analizaron 3 muestras de asfaltita mediante el microscopio electrónico de barrido de marca QUANTA FEG 650 (ver Figura 31). El cual proporciona imágenes de alta resolución y permite identificar los elementos presentes y su porcentaje en peso. Está ubicado en el Laboratorio de Microscopía Electrónica, en la sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 31. Microscopio Electrónico de Barrido marca QUANTA FEG 650.



El microscopio de barrido trabajó en bajo vacío ya que este modo de operación hace posible el análisis de muestras no conductoras sin necesidad de recubrimiento, evitando un procedimiento más extenso.

Se empleó la técnica de electrones retrodispersados, en donde la detección de electrones retrodispersados BSE proporciona diferentes tipos de imágenes: contraste en número atómico (Z), topografía y segmento a y b .

Para la realización de esta técnica, las 3 muestras de asfaltita se cortaron con dimensiones de 1 cm de anchura, 2 cm de longitud y 0.5 cm de espesor, posteriormente se colocaron sobre un porta objetos con base de aluminio para que se quedaran en posición fija (ver Figura 32). Después se llevaron al microscopio donde se logró obtener diferentes imágenes con las características superficiales y componentes principales de las rocas.

Figura 32. Muestras analizadas en la prueba SEM.



6.3.4 Densidad. Para determinar esta propiedad se emplearon dos técnicas, las cuales se compararon para corroborar los resultados obtenidos.

- **Con picnómetro**

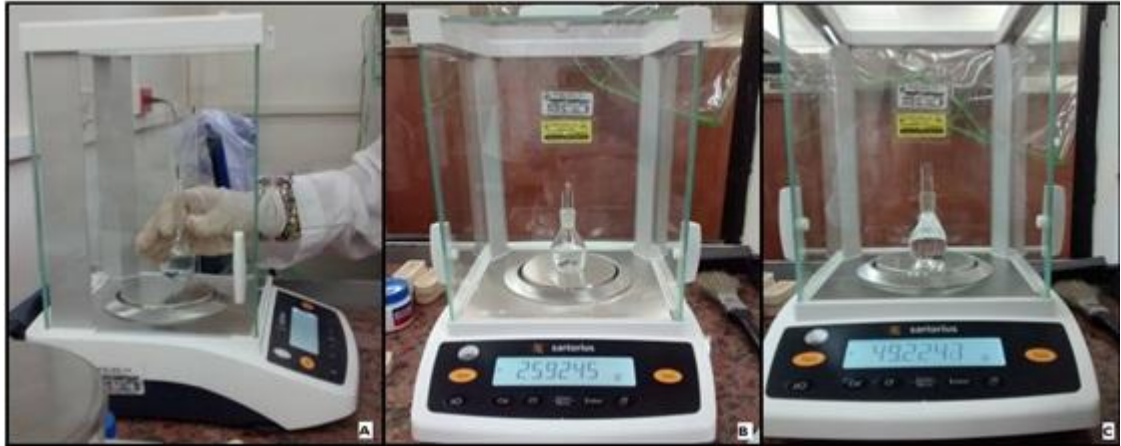
Se pesó un picnómetro previamente secado con aire a presión, después se le agregó una cantidad de muestra para ser pesada de nuevo. Como paso final se suministró agua desionizada al picnómetro hasta quedar totalmente lleno para ser pesado. Todos los pesos fueron registrados para cada muestra. El proceso se realizó 3 veces para disminuir el porcentaje de error en las medidas. (Ver Figura 33).

Para hallar el valor de la densidad de la muestra se realizan los siguientes pasos:

1. Hallar densidad del agua desionizada
2. Hallar masa del agua desionizada
3. Hallar volumen del agua desionizada

4. Hallar volumen de la muestra
5. Hallar densidad de la muestra

Figura 33. Procedimiento densidad con picnómetro: **A.** Peso picnómetro vacío **B.** Peso picnómetro con muestra **C.** Peso picnómetro con muestra y agua.



- **Con probeta**

Se le agregó un volumen determinado de agua desionizada a la probeta el cual se registró, posteriormente se le agregó una pequeña cantidad de muestra previamente pesada y se registró la variación del volumen. Este proceso se ejecutó 3 veces para disminuir el porcentaje de error de las medidas. (Ver Figura 34)

Para hallar el valor de densidad de la muestra se usó la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (5)$$

Figura 34. Procedimiento densidad con probeta.



6.3.5. Punto de ablandamiento. Se tomaron aproximadamente 2 g de muestra compacta, la cual se colocó en un crisol para ser calentada en una plancha. Con un termómetro se determinó la temperatura en que esta empezaba a perder su estado sólido y se registró esta información. Se realizó este procedimiento para 6 muestras de asphaltita (ver Figura 35).

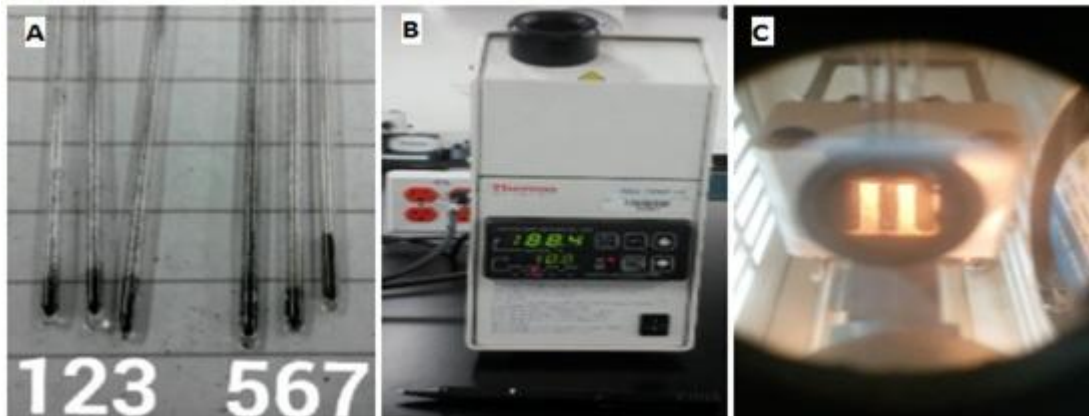
Figura 35. Procedimiento punto de ablandamiento.



Esta técnica se comparó con una prueba de punto de fusión para las mismas muestras, donde se colocó una cantidad < 0.1 g de cada muestra en un 6 capilares diferentes, los cuales se introdujeron en un horno marca TERMO

SCIENTIFIC MEL-TEMP 3.0 cuya capacidad máxima de calentamiento es 250° C. Como se observa a continuación. (Figura 36).

Figura 36. Procedimiento punto de fusión. **A.** Las muestras de asfaltita se introdujeron en los capilares **B.** Equipo Mel-Temp donde se fijan los capilares para calentarlos **C.** Capilares dentro del equipo.



6.4 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN GEOELÉCTRICA

6.4.1 Procesamiento de Sondeos. Los dos sondeos tipo Schlumberger se procesaron por medio del software Matlab, con base en el trabajo de Goyes et al., (2015) donde mediante el desarrollo de una inversión usando mínimos cuadrados se estima la resistividad real y profundidades que mejor se ajusten a un modelamiento de la curva teórica.

Cada uno de los sondeos tipo Wenner se interpretó mediante una gráfica de *resistividad vs distancia recorrida*, donde se logró evidenciar el comportamiento de las rocas del subsuelo en el área estudiada y de esta manera generar los resultados.

6.4.2 Procesamiento de Tomografías. Se procesaron 4 tomografías de la zona mediante el software EARTHIMAGER 2D el cual transforma las resistividades aparentes en resistividades reales mediante un método de inversión y genera un perfil 2D de la zona estudiada con resistividad y profundidad real. La localización de las tomografías está referenciada en el mapa del anexo 1.

En este software se introdujeron los archivos de extensión de cada tomografía generando un modelo inicial o perfil de resistividad aparente (ver Figura 37). Después se configuraron los parámetros de inversión para iniciar con el procesamiento (ver Figura 38). Posteriormente se realizó la inversión para obtener el perfil de resistividades reales.

El perfil generado presentó un porcentaje de error de 41,28% (ver Figura 39). Cabe resaltar que tener un porcentaje de error tan alto no es un problema ya que se debe a que algunos datos están alejados de los valores que se tendrán en cuenta en la inversión, esto se observa en la gráfica de dispersión del perfil inicial (ver Figura 40). Para corregir este inconveniente se eliminaron los datos erróneos del histograma (ver Figura 41). Para alcanzar un porcentaje de error más bajo. Finalmente se realizó una segunda inversión con los valores más precisos donde se obtiene el diagrama de dispersión corregido (ver Figura 42). Y se generó un perfil de resistividades reales más ajustado a los requerimientos (ver Figura 43).

Con este ajuste se logró obtener información de mayor calidad de cada una de las tomografías y de esta manera interpretar los resultados de una manera más precisa.

Figura 37. Perfil de resistividad aparente.

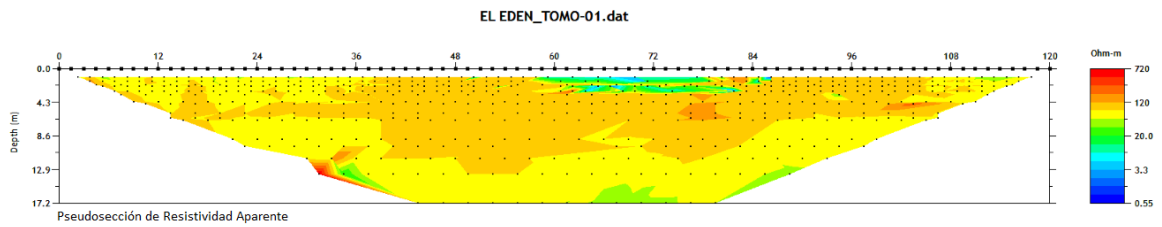


Figura 38. Configuración de los parámetros de inversión.

Initial Settings | Forward Modeling | Resistivity Inversion | IP Inversion | Terrain | CRP

Criteria for Data Removal

Minimum Voltage in mV: 0.2

Minimum $\text{abs}(V/I)$ (Ohm): 0.0005

Max Repeat Error (%): 3

Min App Res (Ohm-m): 1

Max App Res (Ohm-m): 10000

Max Reciprocal Error (%): 5

Remove Neg Res

Remove Spikes

Keep All

Skip Data: 0

Inversion Method

Forward Modeling Only

Damped Least Squares

Smooth Model Inversion

Robust Inversion

Y Axis

Definition of Y Axis: Y = Depth

Orientation of Vertical Axis: Positive Upward

Snap Electrode to Node (m): X: 0.003, Z: 0.003

Distance Scale Factor: 1.0

Save Inversion Output

Default: Surface

OK Cancel Apply

Figura 39. Perfil de resistividades reales con error de 41,28%.

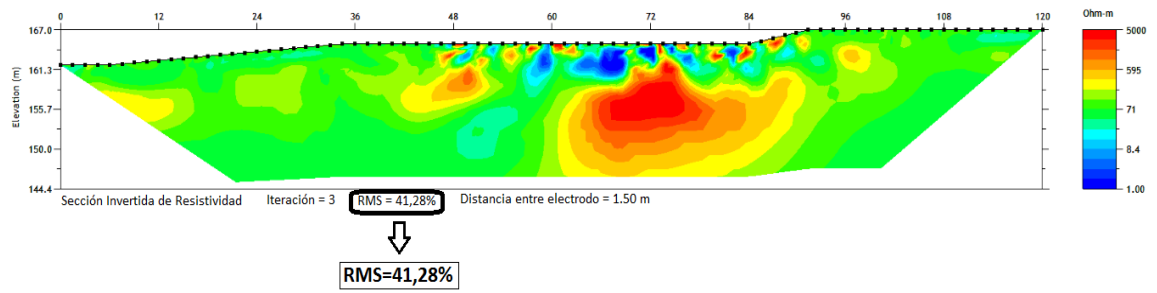


Figura 40. Gráfica de dispersión de datos generados en la primera inversión.

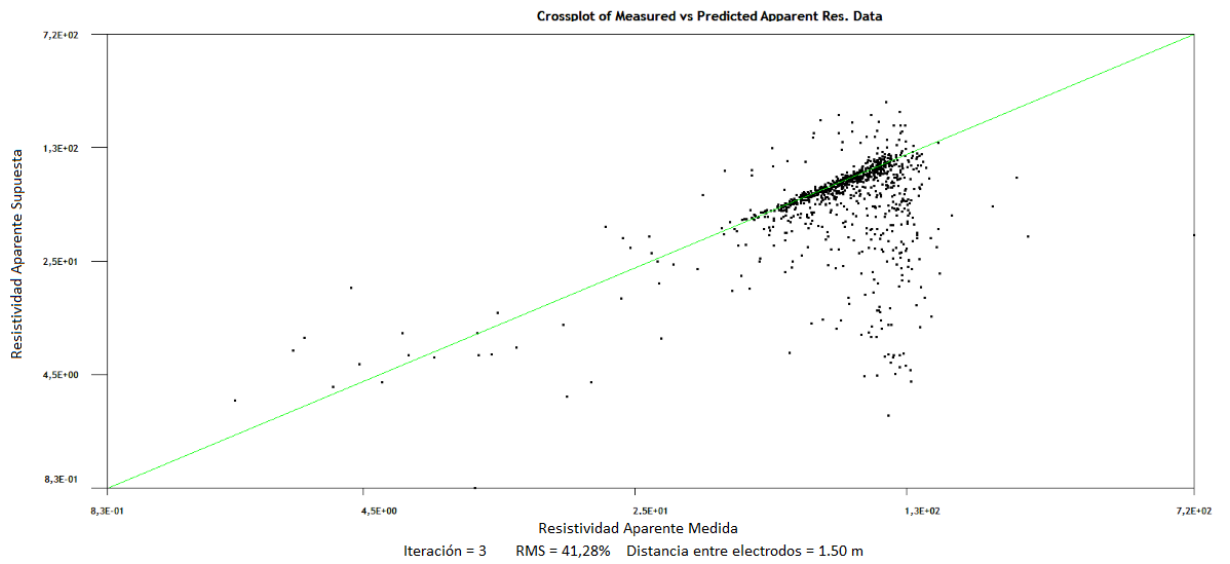


Figura 41. Histograma del perfil correspondiente a la primera inversión.

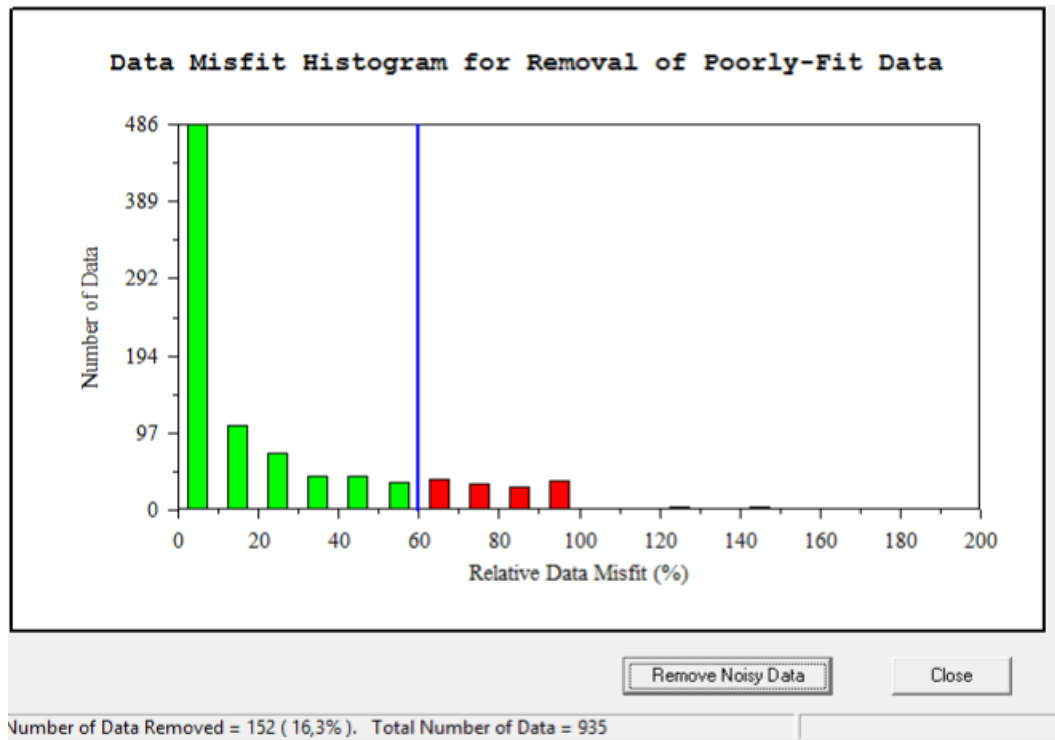


Figura 42. Gráfica de dispersión corregida, resultado de la segunda inversión.

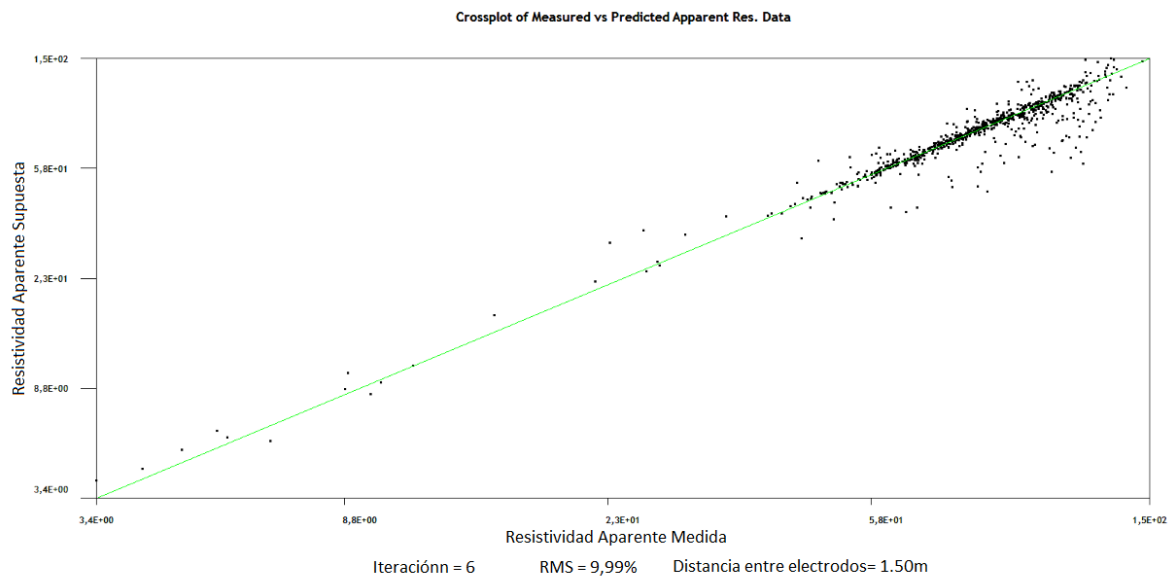
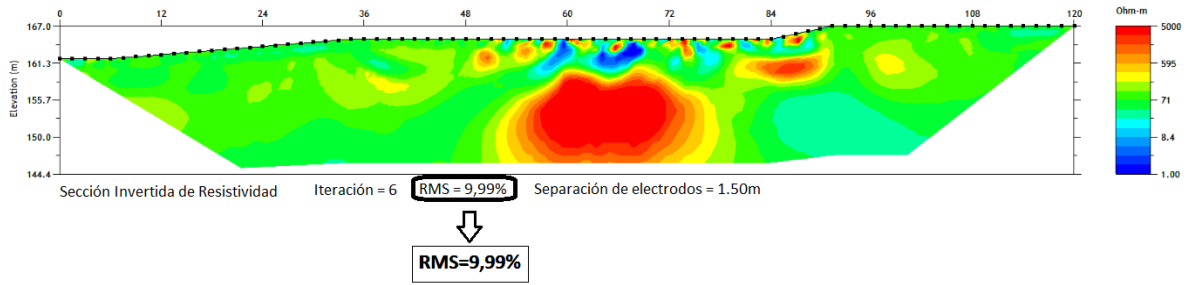


Figura 43. Perfil de resistividades reales corregido con error de 9,99%.



7. RESULTADOS

En esta etapa se muestra el producto final de las diferentes pruebas físicas y químicas realizadas en laboratorio y la geofísica en campo, con lo cual se generó la clasificación geoquímica y orientación espacial de las asfaltitas analizadas.

7.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Para la caracterización física de cada una de las muestras se realizaron dos análisis físicos, punto de ablandamiento y densidad, llevados a cabo en el Laboratorio de Geoquímica del Petróleo ubicado en la sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander. Los resultados se observan a continuación.

7.1.1 Punto de ablandamiento. Esta técnica se calculó para 6 muestras, separadas en crisoles con 2 g de material aproximadamente cada uno, se sometieron a temperaturas mayores de 50°C y menores de 150°C, rango en el cual se encuentra la temperatura de ablandamiento de la asfaltita.

En la tabla 4 se presenta las diferentes temperaturas de ablandamiento obtenidas para cada muestra:

Tabla 4. Punto de ablandamiento de las muestras analizadas.

Numero de muestra	Temperatura punto de ablandamiento
M-ME01	92°C
M-ME02	117°C
M-ME03	83°C

Numero de muestra	Temperatura punto de ablandamiento
M-ME05	106°C
M-ME06	87°C
M-ME07	NR*

*NR: no se registró

Los materiales bituminosos no cambian del estado sólido al estado líquido a una temperatura determinada, sino que se vuelven más blandos de manera progresiva cuando se incrementa la temperatura. En las muestras M-ME01, M-ME02, M-ME03, M-ME04, M-ME05 y M-ME06 se logró determinar el valor la temperatura a la cual la muestra pierde sus propiedades sólidas para comportarse de manera plástica.

En el caso de la muestra M-ME07 se repitió el ensayo ya que en el primer intento se creyó que esta se había estropeado por recalentamiento, debido a esto se tomó una nueva cantidad de muestra para realizar el ensayo y se confirmó que esta tenía un punto de ablandamiento mayor al cual se puede determinar con este método, por lo tanto no se obtuvo registro de la temperatura.

Con esta prueba se logró identificar la muestra M-ME02 como la asphaltita que posee mayor resistencia al calor y de mayor calidad, por el contrario la muestra M-ME03 posee bajo punto de ablandamiento por lo cual se infiere que es la asphaltita de menor calidad. No se alcanzó a registrar el punto de ablandamiento de la muestra M-ME07 ya que es una roca impregnada de bitumen y posee punto de ablandamiento más alto que cualquier asphaltita estudiada.

7.1.2 Densidad. Esta propiedad se calculó por medio de dos métodos: con picnómetro y con probeta.

Picnómetro

Este ensayo se le realizó a las 7 muestras recolectadas en campo, se aclara que el procedimiento con picnómetro tiene mayor precisión que el método con probeta ya que en este último los valores que arroja la medición son aproximados debido a que los datos decimales son estimados a criterio del formulador (persona que realiza el ensayo) ya que la probeta no cuenta con precisión decimal; en cambio cuando se usa el método del picnómetro se emplea una balanza electrónica que genera mediciones exactas.

En la Tabla 5 se observan los valores de las mediciones y cálculos realizados con los cuales se obtuvo la densidad de cada muestra.

Probeta

Se sometieron a este ensayo las 7 muestras del proyecto y como se mencionó anteriormente no es el método más preciso para hallar la densidad pero se tomó para comparar los resultados con los calculados en el método con picnómetro. Los valores calculados por este método se encuentran en la Tabla 6.

Tabla 5. Datos y resultado de densidades por medio del método del picnómetro.

Densidad del agua: 0.99593											
	peso Pi	Peso M	Peso Pi+M	Peso Pi+M+H ₂ O	Peso H ₂ O	Vol. H ₂ O	Vol. Pi	Vol. M	Densidad M	sumatoria Densidades	Prom. Densidad
M1	25.7976	0.1417	25.9393	49.1915	23.2522	23.3472232	23.465	0.117776802	1.20312318	3.85983415	1.28661138
M1	25.7978	0.1386	25.9364	49.2135	23.2771	23.372225	23.465	0.092775044	1.493936229		
M1	25.7978	0.2077	26.0055	49.1971	23.1916	23.2863755	23.465	0.178624452	1.162774739		
M2	25.798	0.3773	26.1753	49.2334	23.0581	23.15233	23.465	0.312670017	1.206703488	3.83960507	1.27986836
M2	25.7983	0.2726	26.0709	49.226	23.1551	23.2497264	23.465	0.215273614	1.266295462		
M2	25.7972	0.212	26.0092	49.2242	23.215	23.3098712	23.465	0.155128824	1.366606116		
M3	25.797	0.1275	25.9245	49.2242	23.2997	23.3949173	23.465	0.070082687	1.819279573	4.42162693	1.47387564
M3	25.7973	3.294	29.0913	49.2303	20.139	20.2213007	23.465	3.243699306	1.0155072		
M3	25.798	0.2425	26.0405	49.2578	23.2173	23.3121806	23.465	0.152819425	1.586840154		
M4	25.7976	0.4192	26.2168	49.3932	23.1764	23.2711134	23.465	0.193886568	2.162088914	6.51029656	2.17009885
M4	25.7984	0.5354	26.3338	49.4557	23.1219	23.2163907	23.465	0.24860929	2.153580023		
M4	25.7986	0.5304	26.329	49.4578	23.1288	23.2233189	23.465	0.241681092	2.194627621		
M5	25.7978	0.1458	25.9436	49.211	23.2674	23.3624853	23.465	0.102514685	1.422235266	4.35131653	1.45043884
M5	25.7984	0.1209	25.9193	49.2079	23.2886	23.383772	23.465	0.081228048	1.488402131		
M5	25.7986	0.207	26.0056	49.232	23.2264	23.3213178	23.465	0.143682237	1.440679132		
M6	25.7983	0.2448	26.0431	49.2295	23.1864	23.2811543	23.465	0.183845702	1.33155139	4.04409815	1.34803272
M6	25.7886	0.137	25.9256	49.202	23.2764	23.3715221	23.465	0.093477905	1.465586974		
M6	25.7987	0.2608	26.0595	49.2207	23.1612	23.2558513	23.465	0.209148685	1.246959788		
M7	25.7977	0.2601	26.0578	49.3051	23.2473	23.3423032	23.465	0.122696826	2.119859236	6.75514192	2.25171397
M7	25.7984	0.3311	26.1295	49.3568	23.2273	23.3222214	23.465	0.142778559	2.318975643		
M7	25.798	0.4391	26.2371	49.4178	23.1807	23.275431	23.465	0.189568996	2.316307042		

Tabla 6. Datos y resultados de la densidad por medio del método de la probeta.

Muestra	vol. Muestra	Peso Muestra	Densidad	Suma Densidades	Promedio densidad
1	0.4	0.2767	0.69175	1.991083333	0.663694444
1	0.3	0.2303	0.767666667		
1	0.18	0.0957	0.531666667		
2	0.18	0.2274	1.263333333	4.168953846	1.389651282
2	0.25	0.4232	1.6928		
2	0.78	0.946	1.212820513		
3	0.45	0.5599	1.244222222	3.710138889	1.236712963
3	0.6	0.8065	1.344166667		
3	0.8	0.8974	1.12175		
4	0.26	0.4467	1.718076923	5.028956768	1.676318923
4	0.43	0.8497	1.976046512		
4	0.6	0.8009	1.334833333		
5	0.58	0.4406	0.759655172	2.369962865	0.789987622
5	0.78	0.7064	0.905641026		
5	1.2	0.8456	0.704666667		
6	0.5	0.602	1.204	3.052869318	1.017623106
6	1.1	1.1794	1.072181818		
6	1.6	1.2427	0.7766875		
7	0.38	0.7517	1.978157895	5.882430622	1.960810207
7	0.7	1.5848	2.264		
7	1.1	1.8043	1.640272727		

Mediante la prueba de densidad por picnómetro realizada anteriormente se calculó una densidad entre 1,28 - 1,47 g/cm³ para las muestras M-ME01, M-ME02, M-ME03, M-ME05 y M-ME06 las cuales son asfaltitas y para las rocas M-ME04 y M-ME07 la densidad calculada fue de 2,17 y 2,25 respectivamente.

Con el método por probeta los resultados son más variables y se tuvieron en cuenta los resultados con la prueba por picnómetro solamente debido a que este presenta mayor precisión que el método por probeta.

7.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

Para la caracterización química de las muestras se realizaron dos análisis químicos, Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Difracción de Rayos X (DRX) los cuales se realizaron en la sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander y los resultados se observan a continuación.

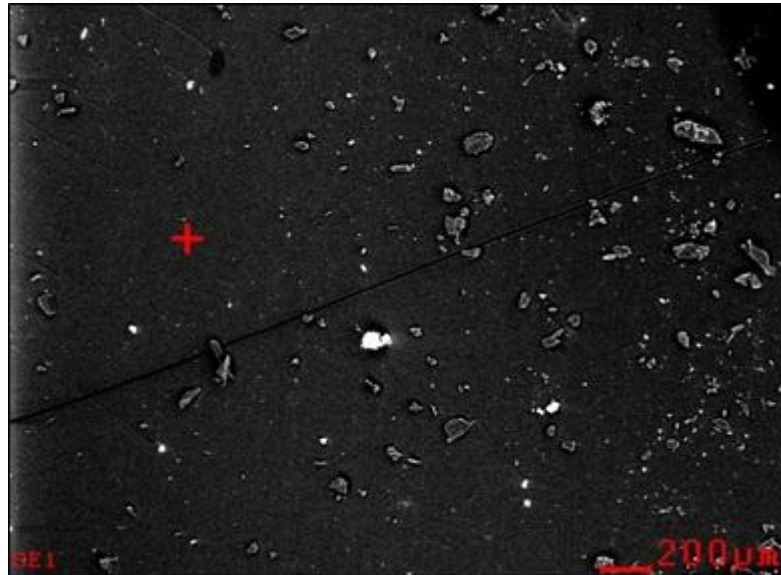
7.2.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM). Este estudio solo se realizó para 3 muestras de las 7 programadas, debido a que el aporte del laboratorio de microscopía electrónica de barrido es de una hora para cada proyecto de grado. Las muestras escogidas fueron la M-ME01, M-ME02 y M-ME03, a las cuales se les tomaron dos imágenes de alta resolución. Por medio de las siguientes imágenes se presentan sus respectivos resultados.

M-ME01

Primer enfoque

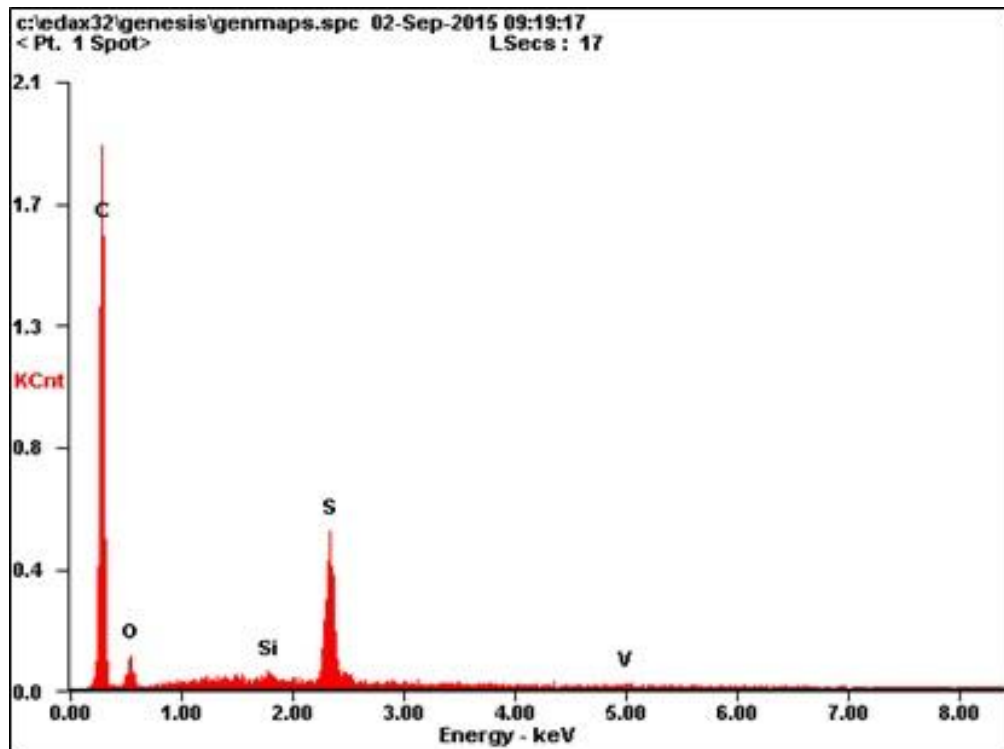
En el primer enfoque (ver Figura 44), se sitúa sobre el material más predominante de la asfaltita para identificar su espectrograma (ver Figura 45). Donde se distingue el porcentaje de los elementos que componen la roca, siendo el carbono el principal elemento, el azufre y oxígeno como elementos secundarios. (Ver Tabla 7).

Figura 44. Primer enfoque muestra M-ME01.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Figura 45. Espectrograma del primer enfoque muestra M-ME01.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Tabla 7. Porcentaje de los elementos que componen la muestra M-ME01.

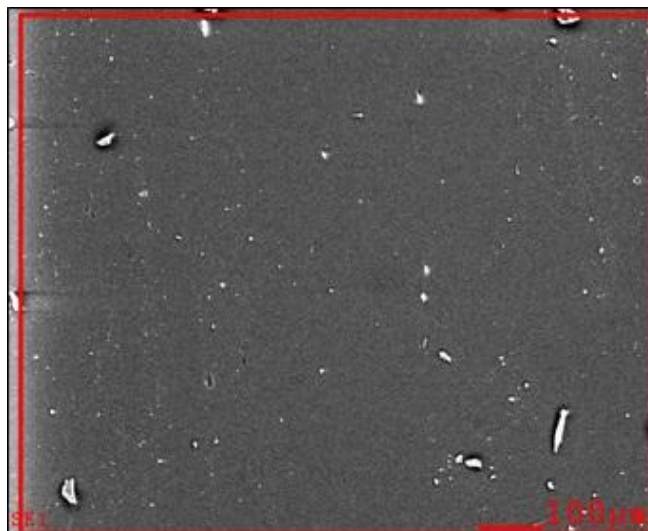
Elemento	Wt%	At%
CK	81.95	89.13
OK	08.78	07.17
SiK	00.47	00.22
SK	08.15	03.32
VK	00.66	00.17
Matriz	corrección	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Segundo enfoque

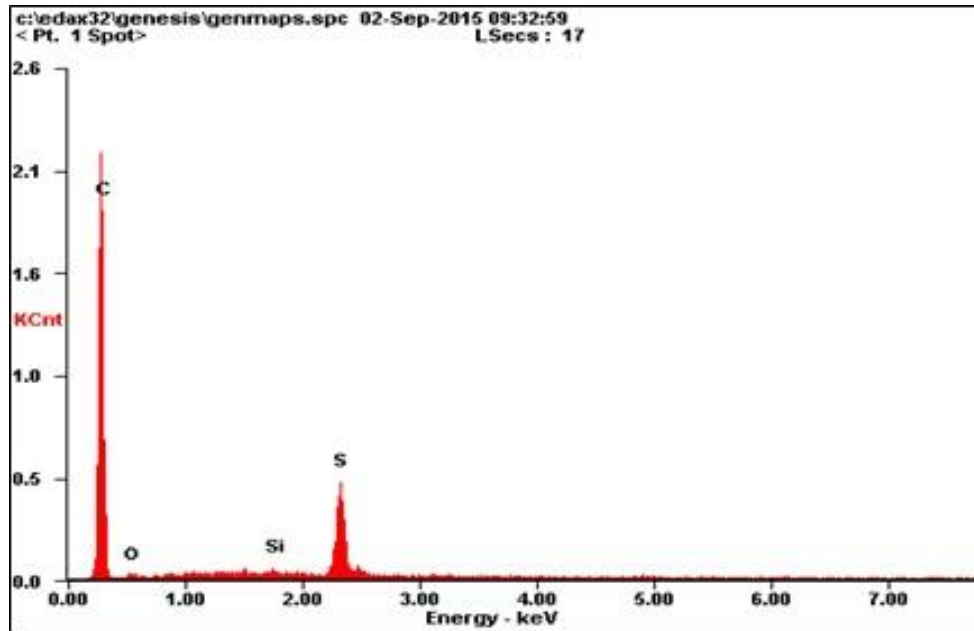
En el segundo enfoque (ver Figura 46). Se observa la asphaltita de manera homogénea con algunas partículas que pueden ser producto de contaminación de la muestra. Se observa su espectrograma (ver Figura 47). Donde se distingue el carbono como elemento principal y el azufre como elemento secundario. (Ver Tabla 8).

Figura 46. Segundo enfoque muestra M-ME01.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Figura 47. Espectrograma del segundo enfoque muestra M-ME01.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Tabla 8. Porcentaje de los elementos que componen la muestra M-ME01.

Elemento	Wt%	At%
CK	91.11	95.96
OK	01.30	01.03
SiK	00.33	00.14
SK	07.29	02.88
Matriz	corrección	ZAF

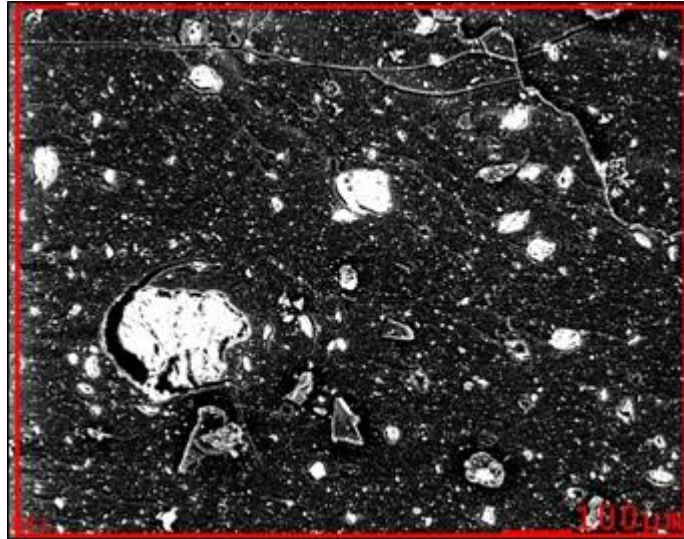
Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

M-ME02

Primer enfoque

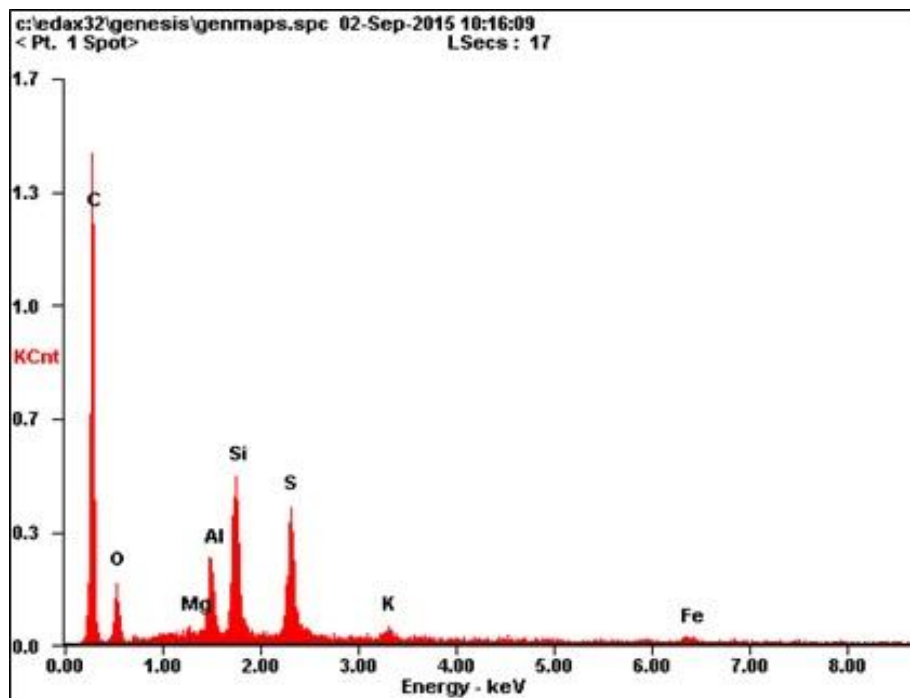
En el primer enfoque (ver Figura 48). Se sitúa sobre la superficie que resalta el cuadro rojo, se observa un material no tan homogéneo, donde se puede conocer su composición por medio de su espectrograma (ver Figura 49). En el que se distingue el carbono como principal elemento y el oxígeno, silicio, azufre y aluminio como elementos secundarios. (Ver Tabla 9).

Figura 48. Primer enfoque muestra M-ME02.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Figura 49. Espectrograma del primer enfoque muestra M-ME02.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Tabla 9. Porcentaje de los elementos que componen la muestra M-ME02.

Elemento	Wt%	At%
CK	71.63	82.62
OK	10.81	09.36
MgK	00.27	00.15
AlK	02.90	01.49
SiK	06.73	03.32
SK	05.98	02.58
KK	00.63	00.22
FeK	01.05	00.26
Matriz	corrección	ZAF

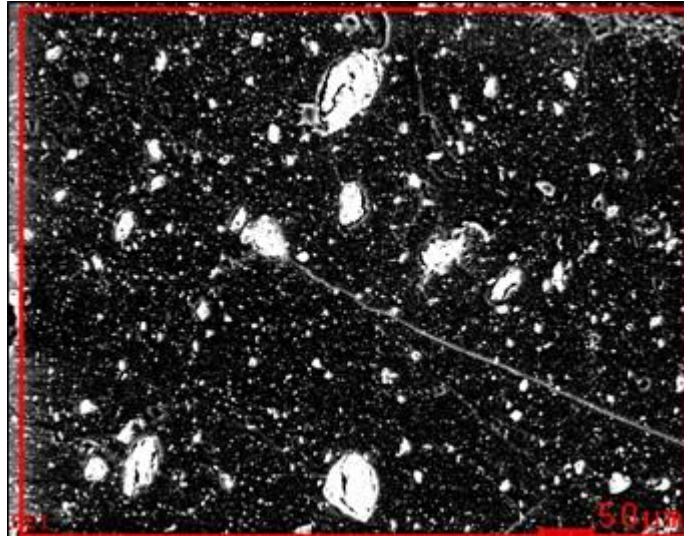
Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Segundo enfoque

Con este acercamiento se analizó el área encerrada en el cuadro rojo como se indica en la Figura 50, junto con tres partículas que están comprendidas en esta zona.

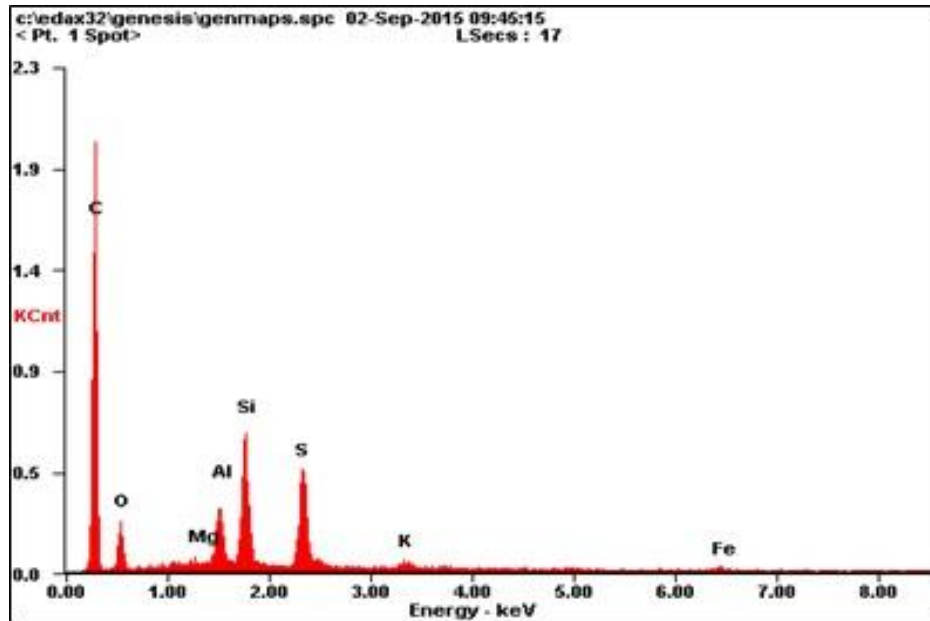
En el enfoque (ver Figura 50). Se encuentra la asphaltita con algunas partículas cuya composición será mostrada posteriormente. Su espectrograma (ver Figura 51). Señala el carbono como elemento principal y el oxígeno, silicio, azufre y aluminio como elementos secundarios. (Ver Tabla 10).

Figura 50. Segundo enfoque muestra M-ME02



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Figura 51. Espectrograma del segundo enfoque muestra M-ME02.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Tabla 10. Porcentaje de los elementos que componen la muestra M-ME02.

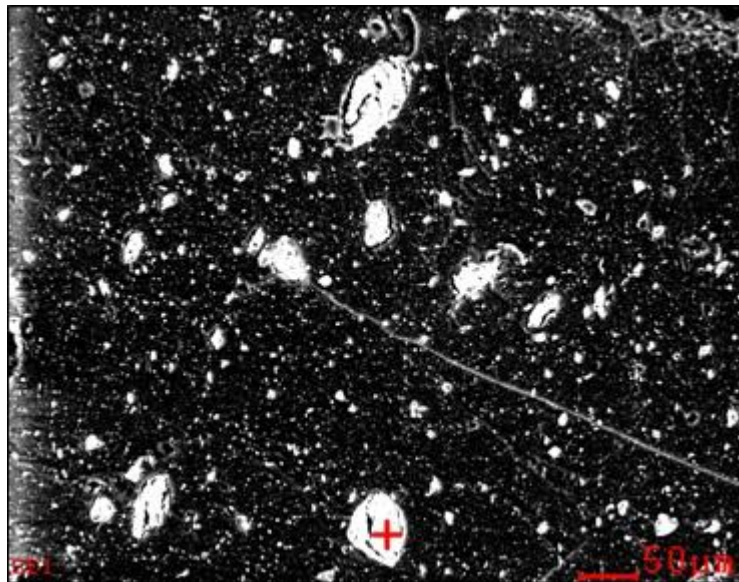
Elemento	Wt%	At%
CK	72.01	82.72
OK	11.08	09.56
MgK	00.23	00.13
AlK	02.93	01.50
SiK	06.49	03.19
SK	05.70	02.45
KK	00.66	00.23
FeK	00.89	00.22
Matriz	corrección	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Partícula 1

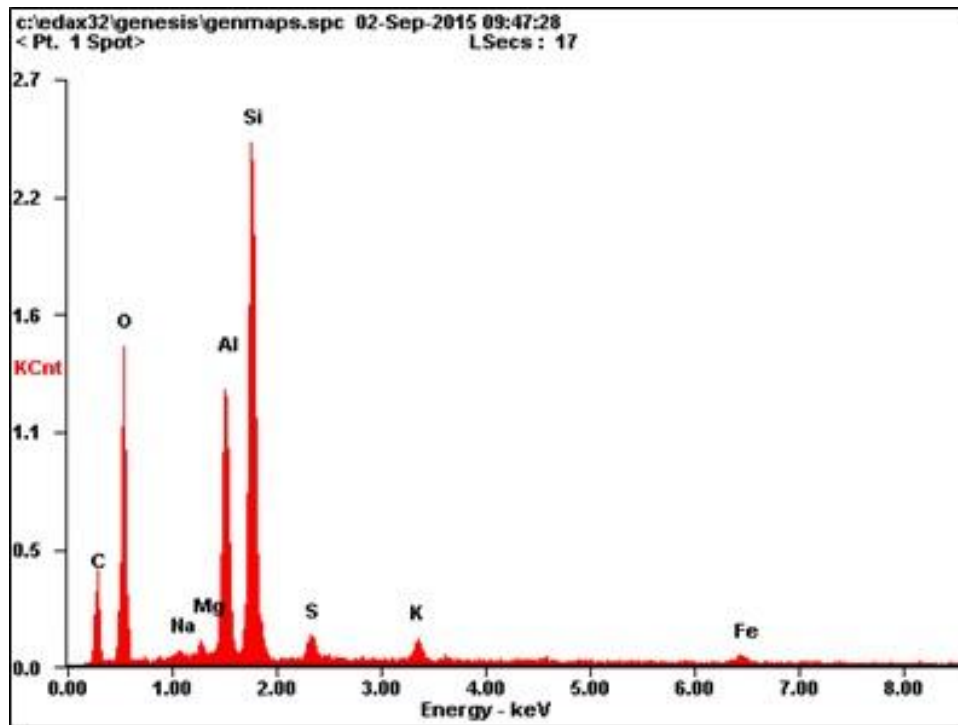
En este segundo enfoque se señaló la partícula 1 (ver Figura 52). Para analizar su composición y espectrograma (ver Figura 53). Donde se observa como principales componentes de la partícula los elementos oxígeno, silicio y carbono. (Ver Tabla 11).

Figura 52. Enfoque partícula 1, muestra M-ME02.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Figura 53. Espectrograma de la partícula 1, muestra M-ME02.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Tabla 11. Porcentajes de elementos que componen la partícula 1 de la muestra M-ME02.

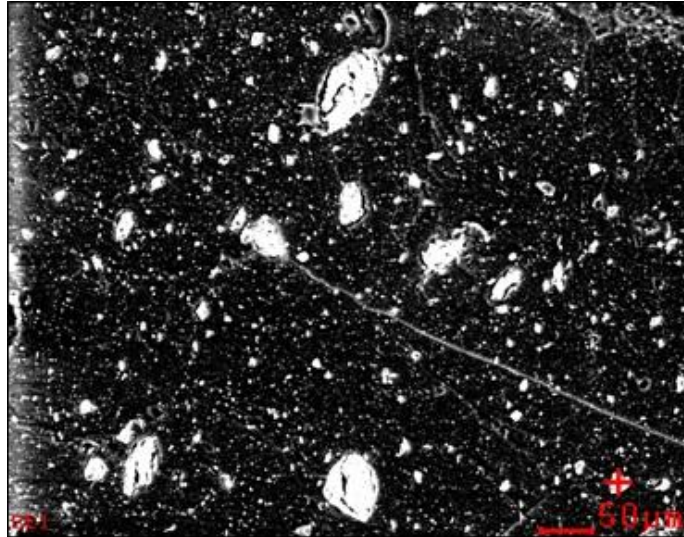
Elemento	Wt%	At%
CK	23.25	34.76
OK	34.64	38.88
NaK	00.29	00.22
MgK	00.65	00.48
AlK	11.42	07.60
SiK	24.86	15.90
SK	01.60	00.90
KK	01.47	00.67
FeK	01.82	00.58
Matriz	corrección	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Partícula 2

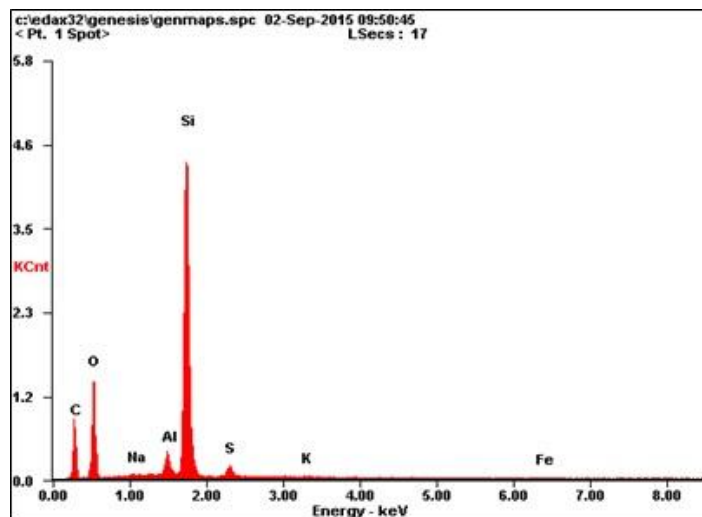
En este segundo enfoque se señaló la partícula 2 (ver Figura 54) para analizar su composición y espectrograma (ver Figura 55). Donde se observa como principales componentes de la partícula los elementos carbono, silicio y oxígeno. (Ver Tabla 12).

Figura 54. Enfoque partícula 2, muestra M-ME02.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Figura 55. Espectrograma de la partícula 2, muestra M-ME02.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Tabla 12. Porcentajes de elementos que componen la partícula 2 de la muestra M-ME02.

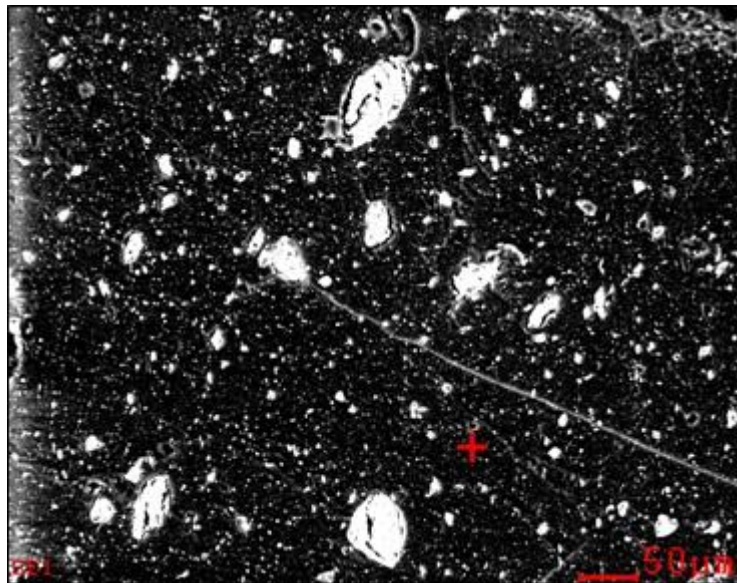
Elemento	Wt%	At%
CK	34.2	47.65
OK	30.00	31.30
NaK	00.18	00.13
AlK	02.08	01.29
SiK	31.41	18.67
SK	01.43	00.75
KK	00.28	00.12
FeK	00.34	00.10
Matriz	corrección	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Partícula 3

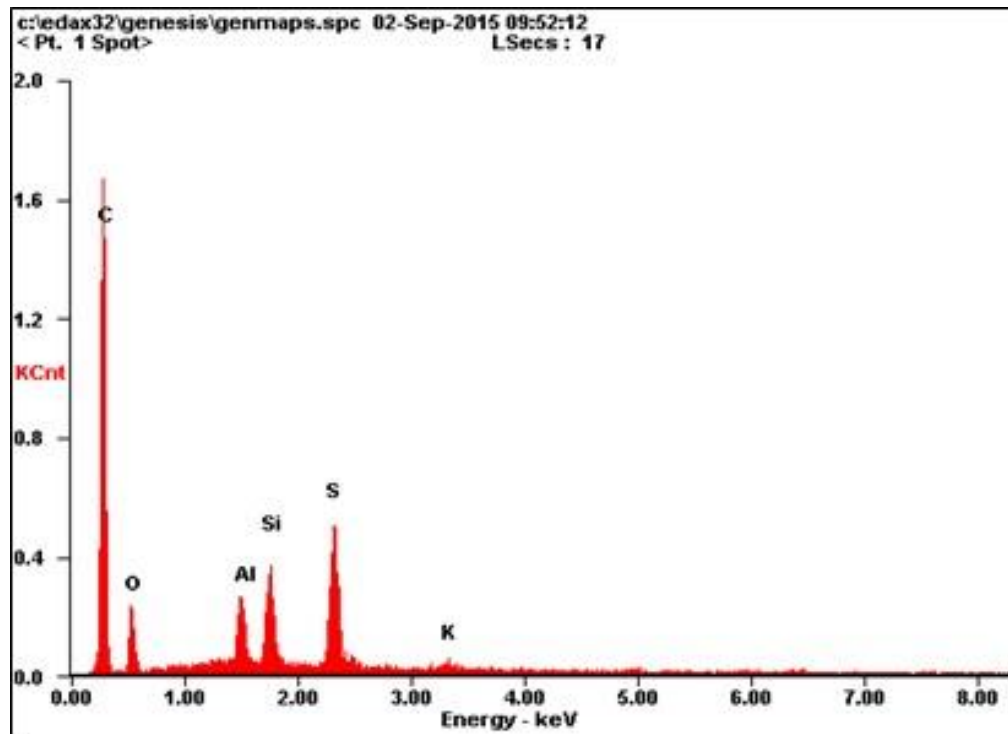
En este segundo enfoque se señaló la partícula 3 (ver Figura 56). Para analizar su composición y espectrograma (ver Figura 57). Donde se observa como principales componentes de la partícula los elementos carbono y oxígeno. (Ver Tabla 13).

Figura 56. Enfoque partícula 3, muestra M-ME02.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Figura 57. Espectrograma de la partícula 3, muestra M-ME02.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Tabla 13. Porcentajes de elementos que componen la partícula 3 de la muestra M-ME02.

Elemento	Wt%	At%
CK	72.91	82.68
OK	12.5	10.72
AlK	02.72	01.37
SiK	04.36	02.11
SK	06.89	02.3
KK	00.53	00.18
Matriz	corrección	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

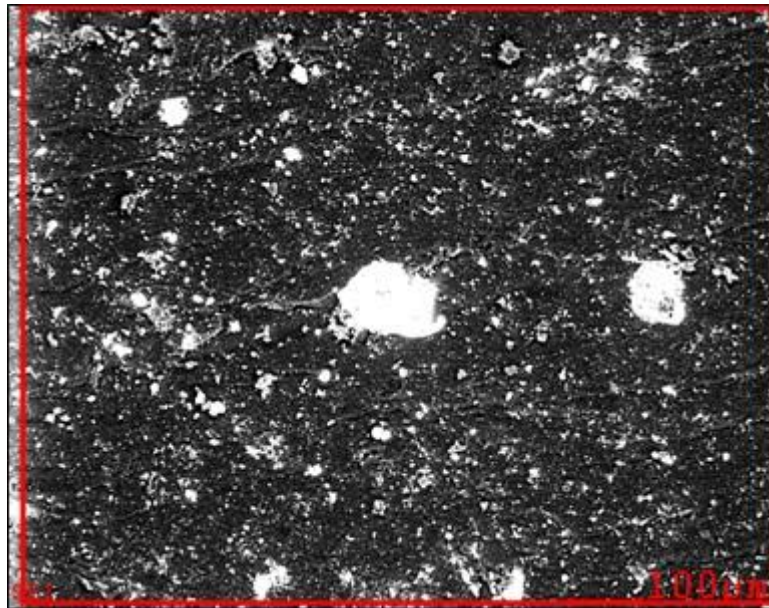
M-ME03

Primer enfoque

Con este acercamiento se analizó el área encerrada en el cuadro rojo como se indica en la (ver Figura 58). Junto con tres partículas que están comprendidas en esta zona.

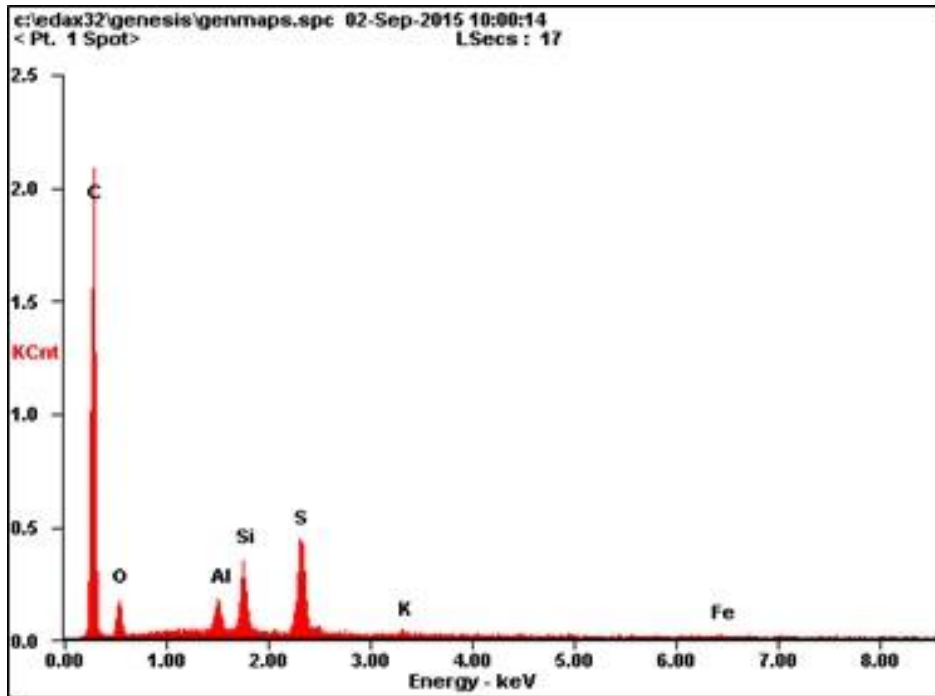
Se observa que en el enfoque se encuentra la asfaltita con algunas partículas cuya composición será mostrada posteriormente. Su espectrograma (ver Figura 59). Señala el carbono como elemento principal y el oxígeno y azufre como elementos secundarios. (Ver Tabla 14).

Figura 58. Primer enfoque muestra M-ME03.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Figura 59. Espectrograma del primer enfoque muestra M-ME03.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Tabla 14. Porcentaje de los elementos que componen la muestra M-ME03.

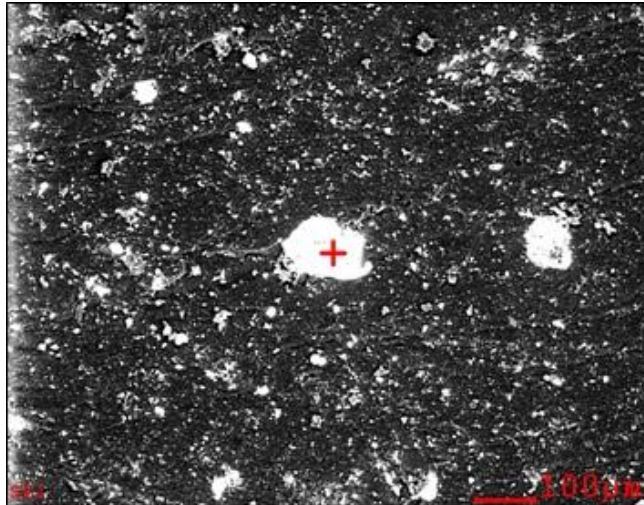
Elemento	Wt%	At%
CK	78.56	87.02
OK	09.34	07.77
AlK	01.61	00.79
SiK	03.41	01.62
SK	06.12	02.54
KK	00.41	00.14
FeK	00.55	00.13
Matriz	corrección	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Partícula 1

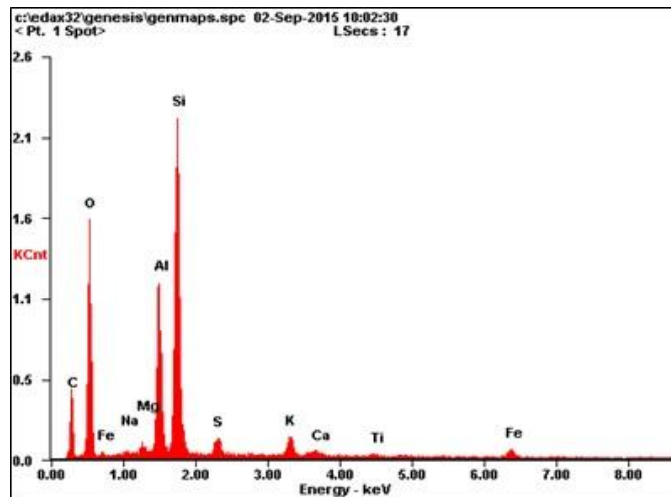
En este primer enfoque se señaló la partícula uno (1) (ver Figura 60). Para analizar su composición y espectrograma (ver Figura 61). Donde se observa como principales componentes de la partícula los elementos oxígeno, carbono, silicio y aluminio. (Ver Tabla15).

Figura 60. Enfoque partícula 1, muestra M-ME03.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Figura 61. Espectrograma de la partícula 1, muestra M-ME03.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Tabla 15. Porcentajes de elementos que componen la partícula 1 de la muestra M-ME02.

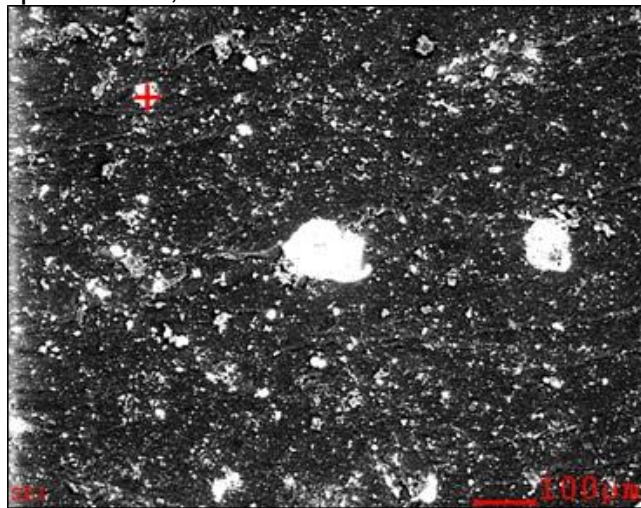
Elemento	Wt%	At%
CK	24.06	35.72
OK	35.75	39.84
NaK	00.29	00.22
MgK	00.66	00.48
AlK	10.11	06.68
SiK	22.24	14.12
SK	01.63	00.91
KK	01.83	00.83
CaK	00.51	00.23
TiK	00.44	00.16
FeK	02.48	00.79
Matriz	corrección	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Partícula 2

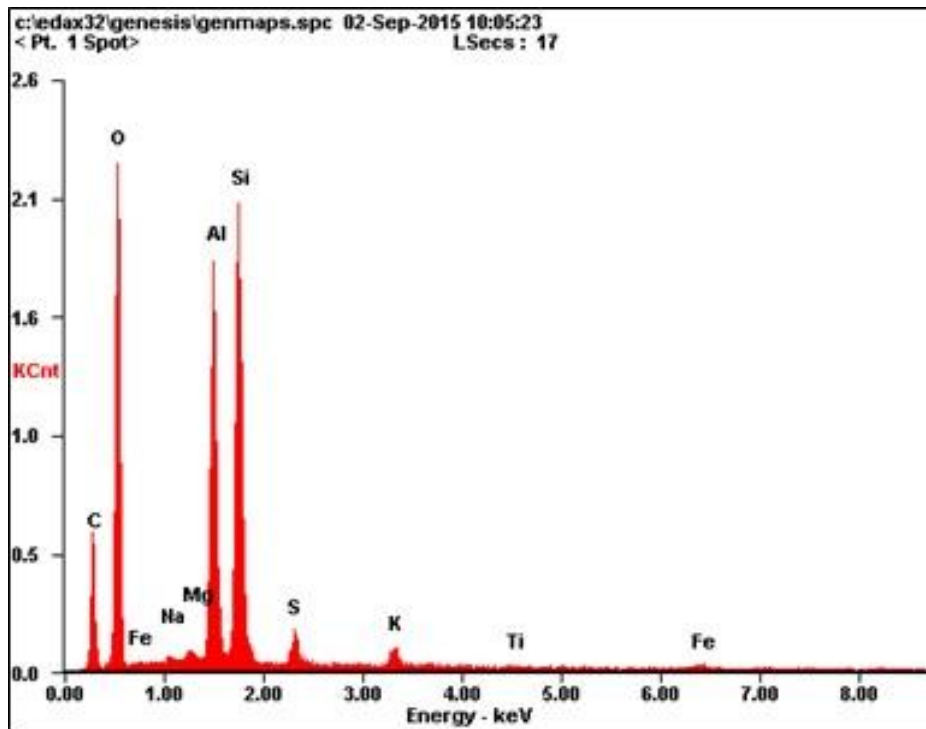
En este primer enfoque se señaló la partícula dos (2) (ver Figura 62). Para analizar su composición y espectrograma (ver Figura 63). Donde se observa como principales componentes de la partícula los elementos oxígeno, carbono, silicio y aluminio. (Ver Tabla 16).

Figura 62. Enfoque partícula 2, muestra M-ME03.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Figura 63. Espectrograma de la partícula 2, muestra M-ME03.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Tabla 16. Porcentajes de elementos que componen la partícula 2 de la muestra M-ME03.

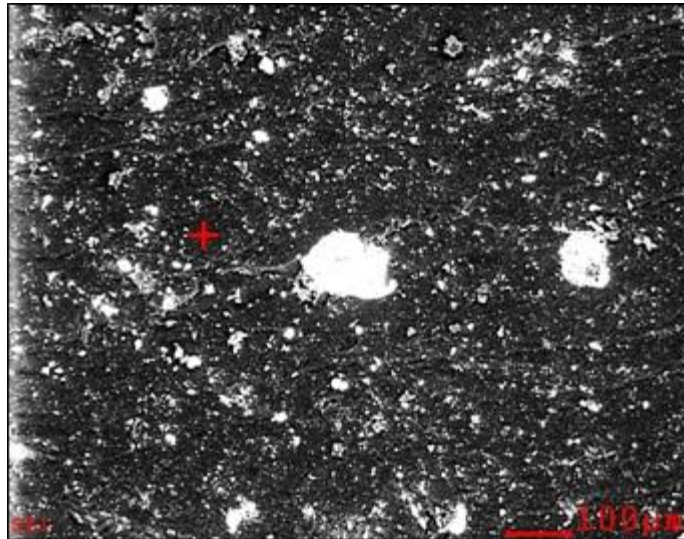
Elemento	Wt%	At%
CK	24.28	34.8
OK	40.54	43.73
NaK	00.29	00.22
MgK	00.39	00.28
AlK	12.81	08.19
SiK	17.99	11.06
SK	01.48	00.88
KK	01.07	00.47
TiK	00.25	00.09
FeK	00.89	00.28
Matriz	corrección	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Partícula 3

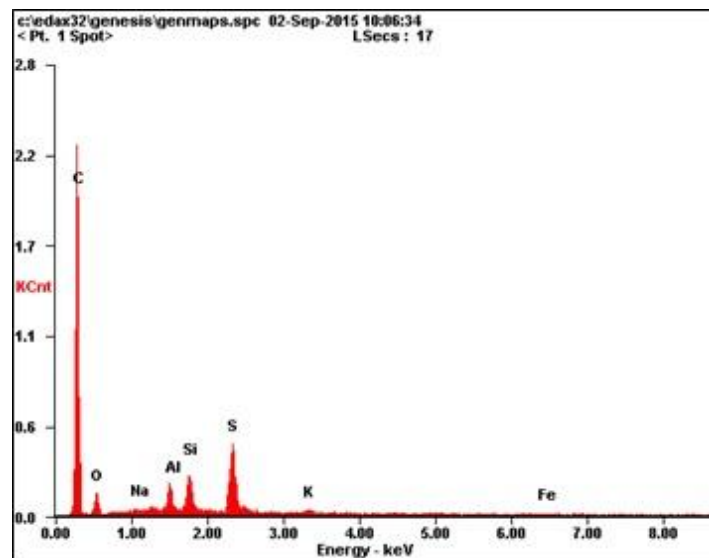
En este segundo enfoque se señaló la partícula tres (3) (ver Figura 64). Para analizar su composición y espectrograma (ver Figura 65). Donde se observa como principal componente de la partícula el elemento carbono. (Ver Tabla 17).

Figura 64. Enfoque partícula 3, muestra M-ME03.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Figura 65. Espectrograma de la partícula 3, muestra M-ME03.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

Tabla 17. Porcentajes de elementos que componen la partícula 3 de la muestra M-ME02.

Elemento	Wt%	At%
CK	80.63	88.70
OK	07.47	06.17
NaK	00.27	00.16
AlK	01.73	00.85
SiK	02.97	01.40
SK	06.03	02.48
KK	00.33	00.11
FeK	00.57	00.14
Matriz	corrección	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM, UIS.

En resumen los análisis de microscopía electrónica de barrido se analizaron tres muestras de asfaltita, presentan las siguientes características.

La primer muestra (M-ME01) presentó un aspecto principalmente homogéneo, se observaron algunas partículas de tamaño reducido que se infiere fueron producto de contaminación. La muestra M-ME02 presentó mayor cantidad de partículas y de superior tamaño comparadas con las de la muestra M-ME01, la composición principal de estos minerales es SiO_2 . La muestra final (M-ME03) presentó algunas partículas de cuarzo (SiO_2) en menor proporción que la muestra anterior.

Las asfaltitas analizadas tienen en común los elementos Carbono, Azufre y Oxígeno en su composición principalmente, aunque estos varían en cada una de las tres muestras. Por medio del análisis de los resultados de SEM se reconoció la muestra M-ME02 como la de mayor impureza, debido a la gran cantidad de partículas en ella que afectan su composición.

7.2.2 Difracción de rayos X. Se analizaron 7 muestras, las cuales se molturaron en un mortero de ágata y se llevaron a un tamaño menor o igual de 38 μm . Cada una de las muestras se montó en un portamuestra mediante la técnica de llenado frontal.

El análisis cualitativo de las fases presentes en cada muestra se realizó mediante la comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD).

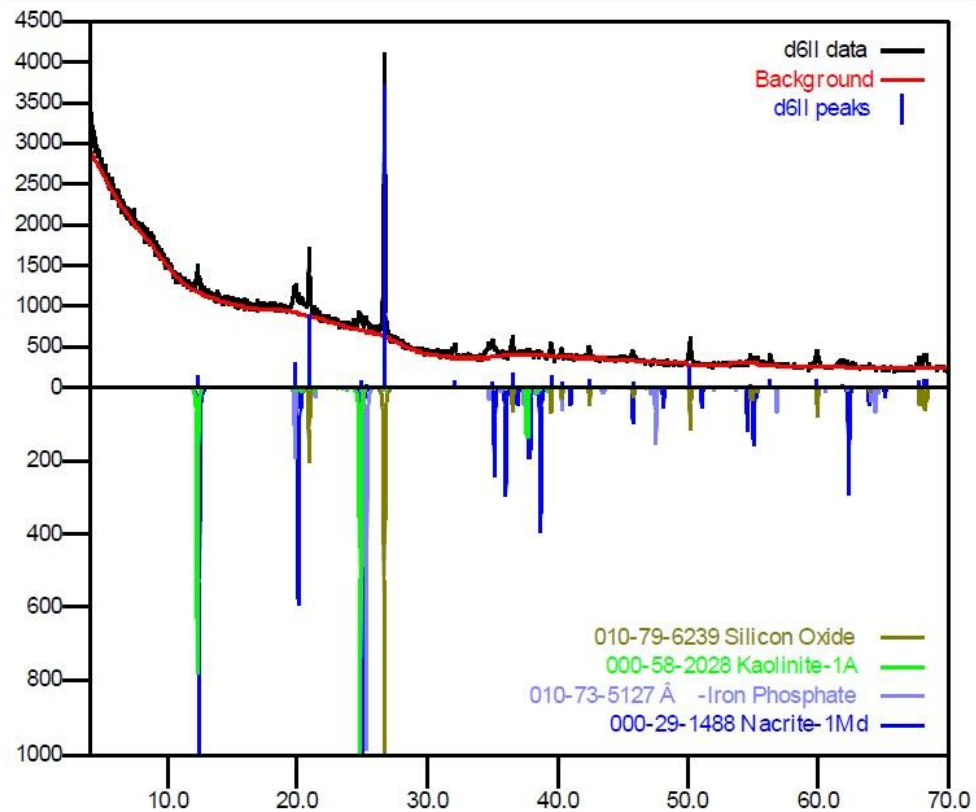
En la muestra M-ME02 (d6ll) se identificaron 4 fases cristalinas con sus respectivos nombres y los minerales contenidos en ella. Los resultados se muestran en la Tabla 18 y Figura 66.

Tabla 18. Resultados DRX para la muestra M-ME02.

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	Si O_2	010-79-6239	Cuarzo
	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$	000-58-2028	Kaolinita
	$\text{Fe} (\text{P O}_4)$	010-73-5127	Fosfato de hierro
	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$	000-29-1488	Nacrita

Fuente: Laboratorio DRX, UIS.

Figura 66. Difractograma de la muestra M-ME02.



Fuente: Laboratorio DRX, UIS.

Se han identificado señales en el perfil que corresponde a una estructura tipo espinela u óxido mixto, no se concluye que estructura por falta de información elemental de la muestra.

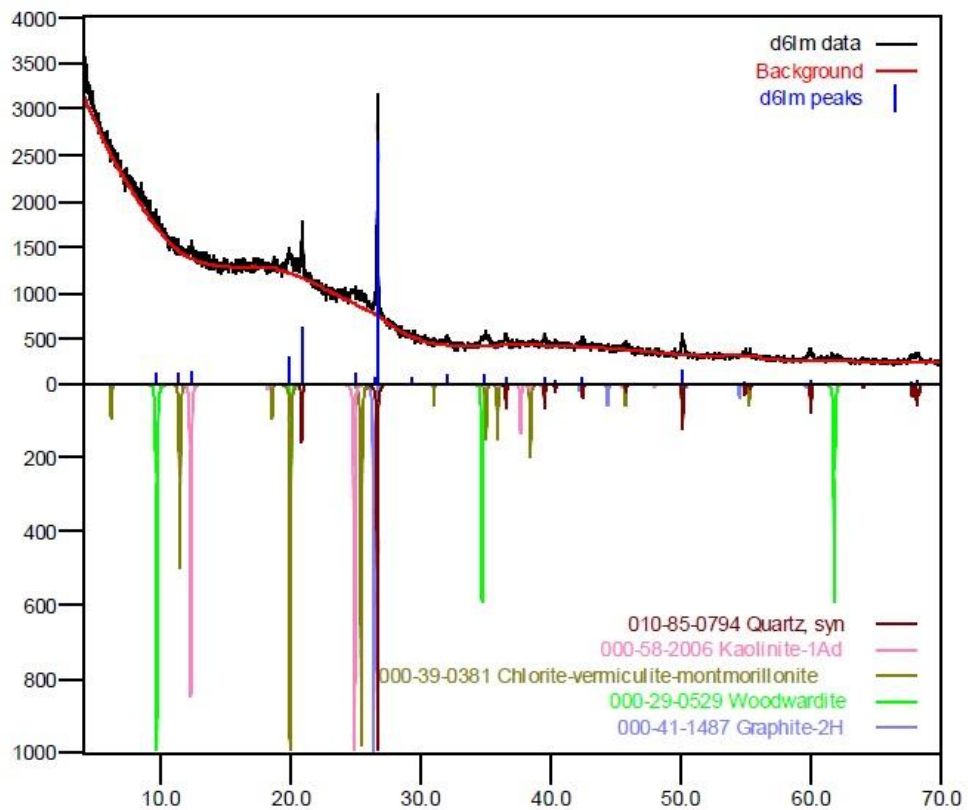
En la muestra M-ME03 (d6lm) se identificaron 4 fases cristalinas con sus respectivos nombres y los minerales contenidos en ella. Los resultados se muestran en la Tabla 19 y Figura 67.

Tabla 19. Resultados DRX para la muestra M-ME03.

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	Si O_2	010-85-0794	Cuarzo
	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$	000-58-2006	Kaolinita
	$\text{Na}_{0.5} \text{Al}_6 (\text{Si}, \text{Al})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_{10} \cdot \text{H}_2 \text{O}$	000-39-0381	Vermiculita
	$\text{Cu}_6 \text{Al}_2 (\text{SO}_4) (\text{OH})_{16} \cdot 4 \text{H}_2 \text{O}$	000-29-0529	Woodwardita

Fuente: Laboratorio DRX, UIS.

Figura 67. Difractograma de la muestra M-ME03.



Fuente: Laboratorio DRX, UIS.

Se han identificado señales en el perfil que corresponde a una estructura tipo espinela u óxido mixto, no se concluye que estructura por falta de información elemental de la muestra.

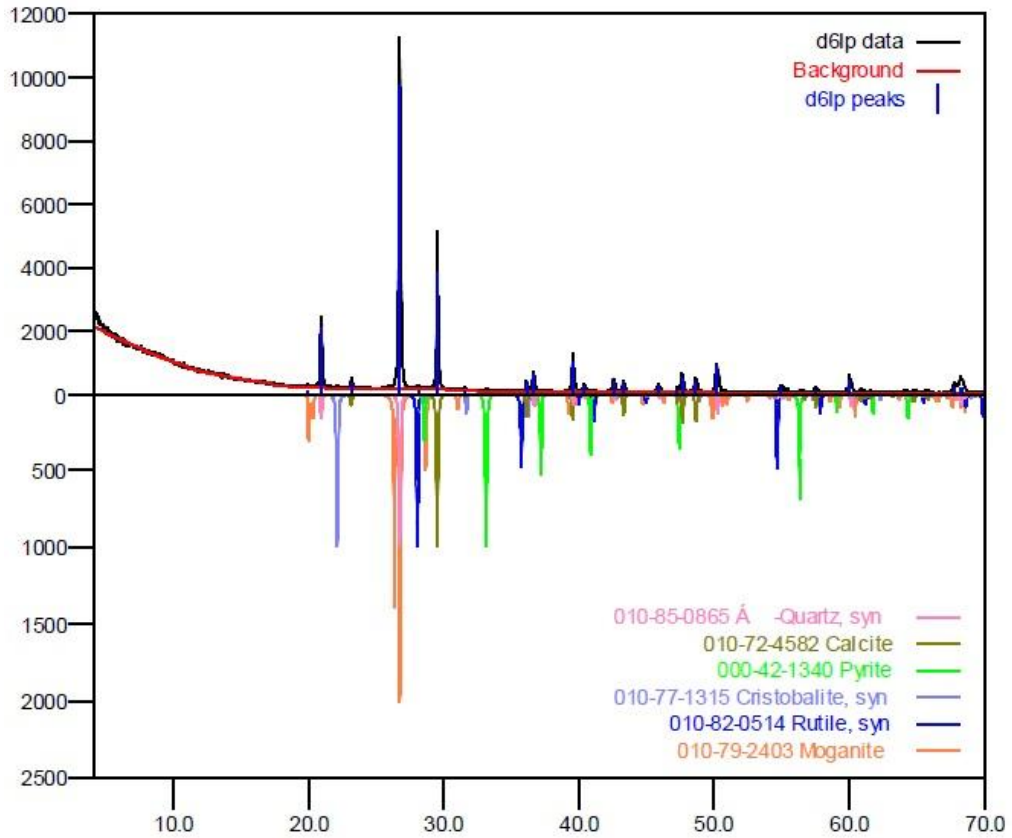
En la muestra M-ME04 (d6lp) se identificaron 6 fases cristalinas con sus respectivos nombres y los minerales contenidos en ella. Los resultados se muestran en la Tabla 20 y Figura 68.

Tabla 20. Resultados DRX para la muestra M-ME04.

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	Si O ₂	010-85-0865	Cuarzo
	Ca (C O ₃)	010-72-4582	Calcita
	Fe S ₂	000-42-1340	Pirita
	Si O ₂	010-77-1315	Cristobalita
	Ti O ₂	010-82-0514	Rutilo
	Si O ₂	010-79-2403	Moganita

Fuente: Laboratorio DRX, UIS.

Figura 68. Difractograma de la muestra M-ME04.



Fuente: Laboratorio DRX, UIS.

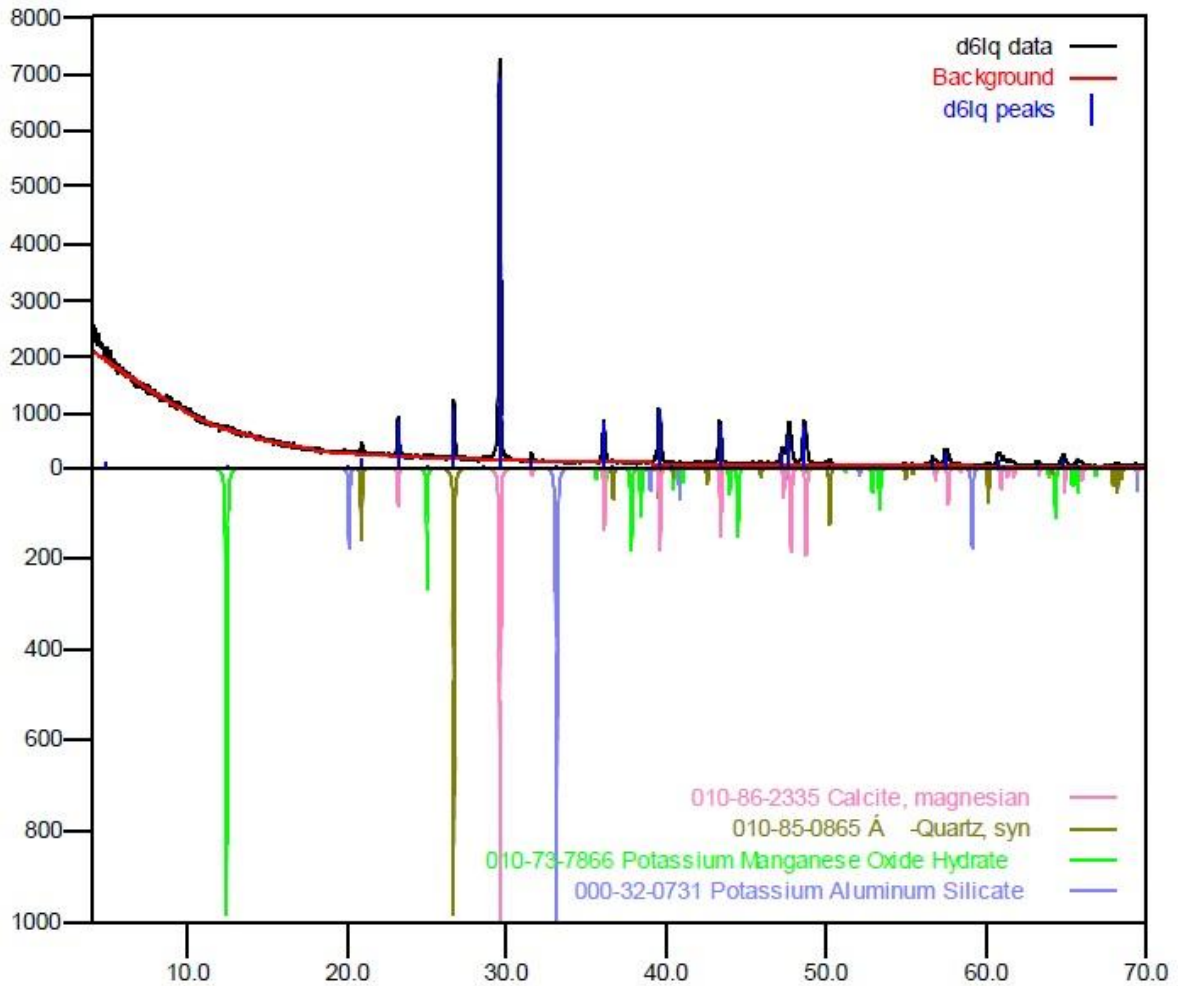
En la muestra M-ME07 (d6lq) se identificaron 4 fases cristalinas con sus respectivos nombres y los minerales contenidos en ella. Los resultados se muestran en la Tabla 21 y Figura 69.

Tabla 21. Resultados DRX para la muestra M-ME07.

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	$(Mg_{0.64} Ca_{0.936}) (C O_3)$	010-86-2335	Calcita-magnesio
	$Si O_2$	010-85-0865	Cuarzo
	$K_{0.27} (Mn_{0.98} O_2) (H_2 O)_{0.54}$	010-73-7866	Birnessita
	$K_{1.25} Al_{1.25} Si_{0.75} O_4$	000-32-0731	Alumino silicato

Fuente: Laboratorio DRX, UIS.

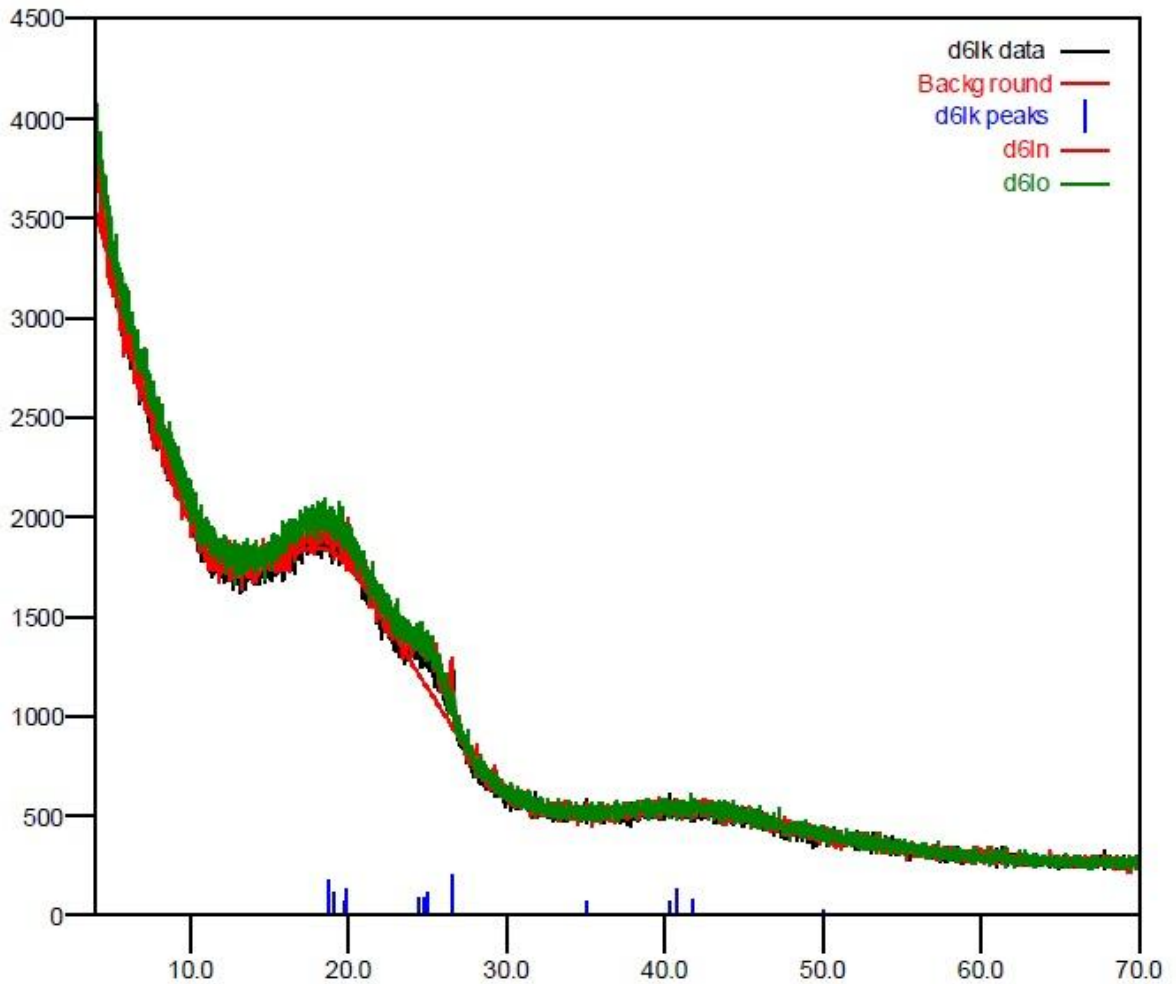
Figura 69. Difractograma de la muestra M-ME07.



Fuente: Laboratorio DRX, UIS.

Las muestras M-ME01 (d6lk), M-ME05 (d6ln) y M-ME06 (d6lo) presenta tres o más domos amorfos, una de ellos centrado alrededor de $18,0^{\circ}$ (2theta), el cual se puede atribuir al cuarzo amorfo, los dos restantes (centrados en 25 y 42° 2 theta), de acuerdo a los reportes de Manivannan y de Dong corresponderían a hidrocarburos aromáticos de bajo contenido de oxígeno. (Ver Figura 70)

Figura 70. Difractograma de las muestras M-ME01, M-ME05 y M-ME06.



Fuente: Laboratorio DRX, UIS.

Según los resultados se pueden definir las muestras M-ME01, M-ME05 y M-ME06 como asfaltitas debido al alto contenido de aromáticos arrojado en el análisis, dado que la composición química de la asfaltita es básicamente asfaltenos los cuales están conformados por anillos aromáticos que forman una estructura cristalina plana característica de este material.

7.3 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

Para realizar la caracterización geoquímica se hizo análisis de Carbono Orgánico Total (TOC) y contenido de Azufre en las muestras M-ME01, M-ME02, M-ME03, M-ME04, M-ME05, M-ME06 Y M-ME07, en el Laboratorio de Geoquímica del Petróleo, de la sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

7.3.1 Carbono orgánico total (TOC). En la Tabla 22, se puede observar que las muestras M-ME06, M-ME05, M-ME01 tienen mayor contenido orgánico total, seguidas de las muestras M-ME03, M-ME02, mientras que las muestras M-ME07 y M-ME04 arrojan valores muy bajos de TOC. Esto evidencia la diferencia del contenido de materia orgánica de una roca (M-ME04 y M-ME07) en este caso son muestras de la formación la Luna (Ksl) comparadas con las asphaltitas pertenecientes a la misma formación.

Tabla 22. Contenido de Carbono Orgánico Total (TOC).

Muestra	Concentración % [p/p]	Desviación Estándar
M-ME01	49,29	2,653
M-ME02	37,731	0,262
M-ME03	43,586	0,342
M-ME04	1,884	0,135
M-ME05	50,406	0,325
M-ME06	51,552	0,612
M-ME07	5,496	0,253

Fuente: Laboratorio de Geoquímica del petróleo, UIS.

7.3.2 Azufre Total. En la Tabla 23, se indica la concentración de azufre que se encuentra en cada muestra, las muestras M-ME01, M-ME06, M-ME05, M-ME03, M-ME02, tienen mayor contenido de sulfuros respectivamente, mientras que las muestras M-ME07 y M-ME04 arrojan valores bajos de sulfuros.

Tabla 23. Contenido de Azufre Total (TS).

Muestra	Concentración % [p/p]	Desviación Estándar
M-ME01	3,544	0,058
M-ME02	2,969	0,042
M-ME03	3,146	0,039
M-ME04	0,781	0,236
M-ME05	3,457	0,036
M-ME06	3,467	0,01
M-ME07	0,59	0,397

Fuente: Laboratorio de Geoquímica del petróleo, UIS.

Se logró caracterizar geoquímicamente estas muestras por medio de los dos ensayos anteriores corroborando que la muestra M-ME07 no hace parte del grupo de las asphaltitas, sino que es una roca de la Formación La Luna (Ksl) con presencia de bitumen, por tanto arroja valores bajos de TOC y contenido de sulfuros comparados con las asphaltitas y un poco mayores que los de la muestra M-ME04 que es una roca calcárea de la Formación La Luna (Ksl) la cual no está impregnada de bitumen.

7.4 CLASIFICACIÓN DE LAS ASFALTITAS (M-ME01, M-ME02, M-ME03, M-ME05 Y M-ME06)

Según la clasificación de Jacob (1989) para el punto de ablandamiento (tabla 24) se clasifican las muestras M-ME02 y M-ME05 como gilsonitas debido a sus propiedades. Las muestras M-ME01, M-ME06 y M-ME03 también se clasificaron como gilsonita pero de una menor calidad respectivamente.

Tabla 24. Punto de ablandamiento de asfaltitas.

Punto de ablandamiento de asfaltos y asfaltitas	
Asfalto	< 110°C
Gilsonita	110°C - 177°C
Glance pitch	110°C - 177°C
Grahamita	177°C - 316°C

Tomado de Jacob, 1989.

La gilsonita M-ME05 se diferencia de la M-ME02 por tener mayor densidad, contenido de materia orgánica y contenido de azufre.

La muestra M-ME03 que se clasificó como gilsonita posee propiedades inferiores a las demás, su punto de ablandamiento, contenido de materia orgánica y contenido de azufre es menor que en las asfaltitas M-ME05 y M-ME06.

La muestra M-ME02 clasifica en el rango de gilsonita debido a su punto de ablandamiento de 117°C aunque posee el menor contenido de materia orgánica y azufre.

En conclusión se observa que la clasificación de todas las muestras se dificulta un poco debido a que estas poseen características muy variables que no permiten encajar completamente en algún tipo de asfaltita. En el resultado final se caracterizaron las asfaltitas M-ME02 y M-ME05 como Gilsonitas debido a que poseen las propiedades más cercanas a este tipo.

7.5 INFORMACIÓN E INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA A PARTIR DE LEVANTAMIENTOS CON RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Se realizaron 10 sondeos geoeléctricos, de los cuales 8 fueron tipo Wenner y 2 tipo Schlumberger. Adicional a este trabajo se adquirieron 4 tomografías tomadas anteriormente en la mina El Edén por la empresa Hydroingeniería SAS, las cuales fueron procesadas y reinterpretadas.

7.5.1 Sondeos eléctricos verticales (SEV)

- **Sondeos Tipo Wenner**

- **WME-1**

- **Ubicación:** 1080815 E - 1322149 N

Este sondeo se realizó sobre un costado de la mina El Edén, específicamente la línea total de muestreo del sondeo corta un dique de asfaltita de 70cm de ancho que se emplazó sobre la Fm La luna, hacia la derecha del dique se identificó en campo como suelo arcilloso de la Formación Bocas o arcillolitas de la Fm bocas (ver Figura 71) y (Tabla 25) mostrando resistividades muy bajas a partir de 2,4 metros de longitud del sondeo. Las rocas de la Fm La Luna que no presentan saturación en este punto evidencian resistividades entre 100 ohm-m y 40 ohm-m.

Figura 71. Ubicación Sondeo WME-1.

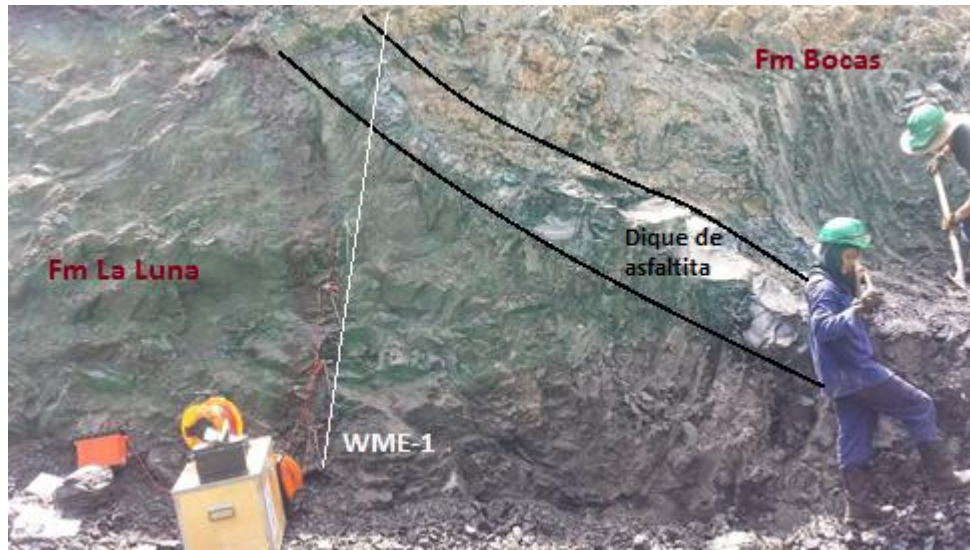
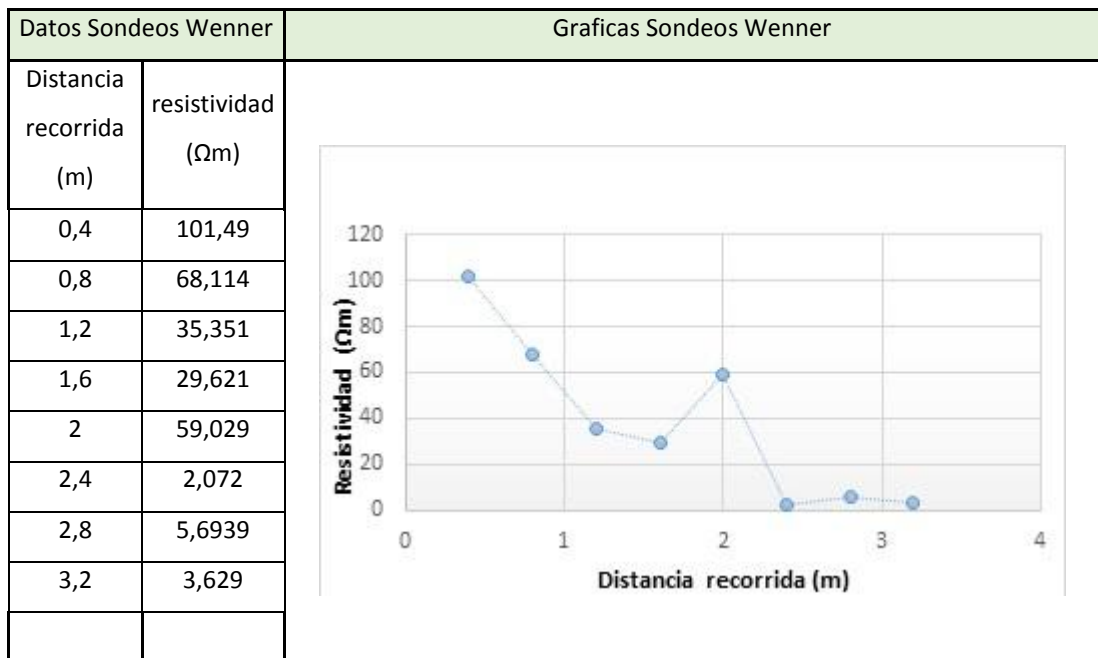


Tabla 25. Datos Sondeo WME-1.



- **WME-2**

Ubicación: 1080841 E - 1322312 N

Este sondeo Wenner se ubicó sobre la unidad de roca meteorizada de la Fm La Luna, en la tabla 26 y Figuras 72 y 73, se evidencia hacia la parte izquierda bajas resistividades y suelos aluviales mezclados con arcillas de la Fm Bocas la cual posee altas resistividades que se ven plasmadas en la parte derecha de la tabla. El dique de asfaltita se encuentra proyectado sobre el centro de la línea Wenner pero no se logró muestrear la resistividad, debido a que la profundidad del tope del dique es superior a 1m y el sondeo Wenner tiene los electrodos separados cada 0.5m, característica que no permite alcanzar esta profundidad.

En conclusión se identificó suelo aluvial con resistividades entre 100 – 250 ohm-m y roca meteorizada tipo lutitas con variación de resistividad en el rango de 10 – 100 ohm-m.

Figura 72. Ubicación sondeo WMF-2, vista superior.



Figura 73. Ubicación sondeo WME-2.

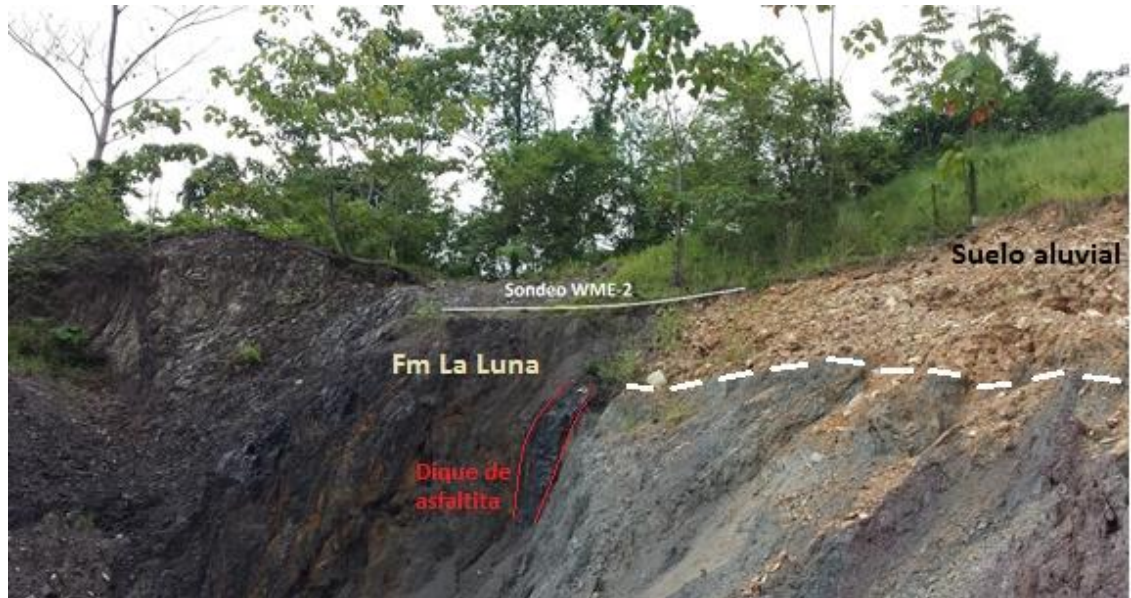


Tabla 26. Datos Sondeo WME-2.



- **WME-4**

Ubicación

Punto inicial: 1080820 E, 1322144 N

Punto final: 1080820 E, 1322147 N

Este sondeo Wenner se realizó sobre rocas fracturadas y muy saturadas correspondientes a la Fm La luna. El nivel de saturación es superficial. La Fm La Luna en este sector está conformada por lutitas y concreciones calcáreas. La resistividad medida en este punto tiene un rango entre 50 – 65 ohm-m. Este rango permitirá reconocer cambios litológicos de la Fm La Luna en sondeos más profundos.

A partir de los sondeos Wenner se puede definir un rango de valores típicos para la Fm. La Luna fracturada y saturada la cual varía entre 10 ohm-m y 100 ohm-m. Tabla 27.

Tabla 27. Datos sondeo WME-4.



- **WME-5, WME-6, WME-7, WME-8 y WME-9**

Estos sondeos se realizaron en un potrero situado aproximadamente a 10 metros de la entrada de la mina El Edén, (ver Figura 74) están organizados paralelamente entre ellos. Se muestra las resistividades de cada una de las líneas hechas en esta zona. (Ver Figura 75).

Figura 74. Ubicación Sondeos WME-5, WME-6, WME-7, WME-8 y WME-9.



Se visualizaron todos los datos en el software Matlab en forma de superficie debido a que la separación de los electrodos es la misma en todas las líneas.

En la zona de más baja pendiente topográfica de la licencia 14511, sobre campo abierto se realizaron 5 sondeos Wenner con electrodos separados una distancia de 3m, en total cada línea Wenner cubre una distancia de 42 metros de largo. Las líneas adyacentes se realizaron cada 3m cubriendo una distancia total perpendicular de 15 metros. Con este arreglo de líneas Wenner se pudo muestrear la resistividad que tiene el suelo a cierta profundidad (3 – 4 metros aproximadamente) mostrando que no existe continuidad entre los valores registrados, lo que permite analizar para esta zona que la resistividad tienen un

rango de 150 ohm-m hasta 350 ohm-m para suelo residual y Fm La Luna meteorizada, además las resistividades > 450 ohm-m corresponde a anomalías de suelos aluviales-coluviales saturados debido la alta frecuencia de lluvias que se tuvo en la zona de estudio durante la adquisición de los datos, estos cambios pueden apreciarse de mejor manera en la imagen 3D. (Ver Figura 76.)

A continuación se presentan dos Figuras (Figura 75 – Figura 76) en las cuales se dimensiona la variación de la resistividad en el área con más baja pendiente topográfica de la zona de estudio.

Figura 75. Variación de la resistividad en los sondeos tipo Wenner donde línea 1: WME-5, línea 2: WME-6, línea 3: WME-7, línea 4: WME-8 y línea 5: WME-9.

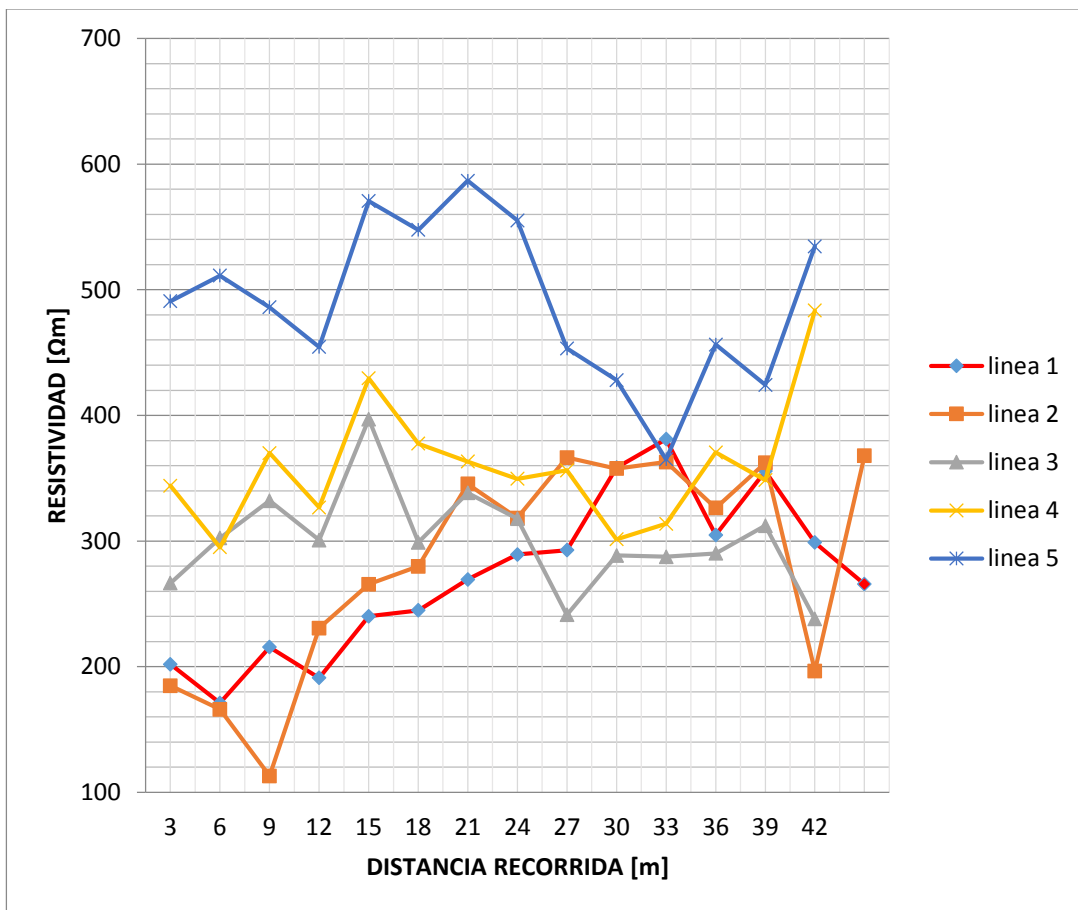
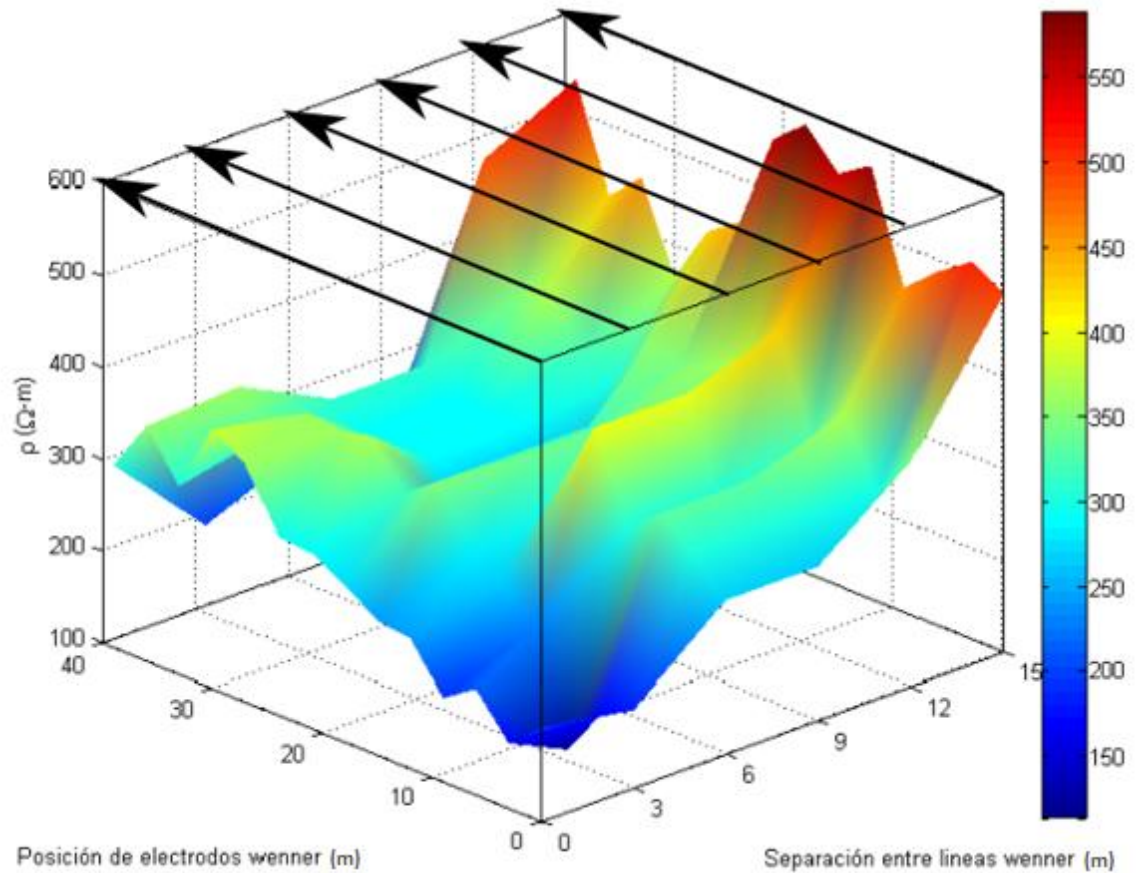


Figura 76. Proyección 3D de la variación en la resistividad de los sondeos tipo Wenner, WME-5, WME-6, WME-7, WME-8 y WME-9.



7.5.2 Sondeos Tipo Schlumberger

- SME-1

Ubicación: 1080804 E, 1322260 N

Este sondeo se realizó en el costado Oeste de la mina El Edén (ver Figura 77). En este sondeo, entre 0 – 2m y 3 – 6m de profundidad se evidencian datos de resistividades pertenecientes a la Fm La Luna. Entre 2 – 3 metros de profundidad la resistividad es superior a 100 ohm-m indicando una anomalía eléctrica en ese sitio. (Ver Figura 78).

Geológicamente este sector corresponde a ocurrencias de asphaltita que se emplazan siguiendo planos de debilidad de la roca y contiene arcilla en el contacto asphaltita-roca. Excavaciones posteriores mostraron la evidencia de asphaltita diseminada en pequeños y medios bloques generados a partir del uso de explosivos. (Ver Figura 79).

Figura 77. Ubicación Sondeo SME-1.



Figura 78. Visualización de los datos obtenidos en el sondeo SME-1.

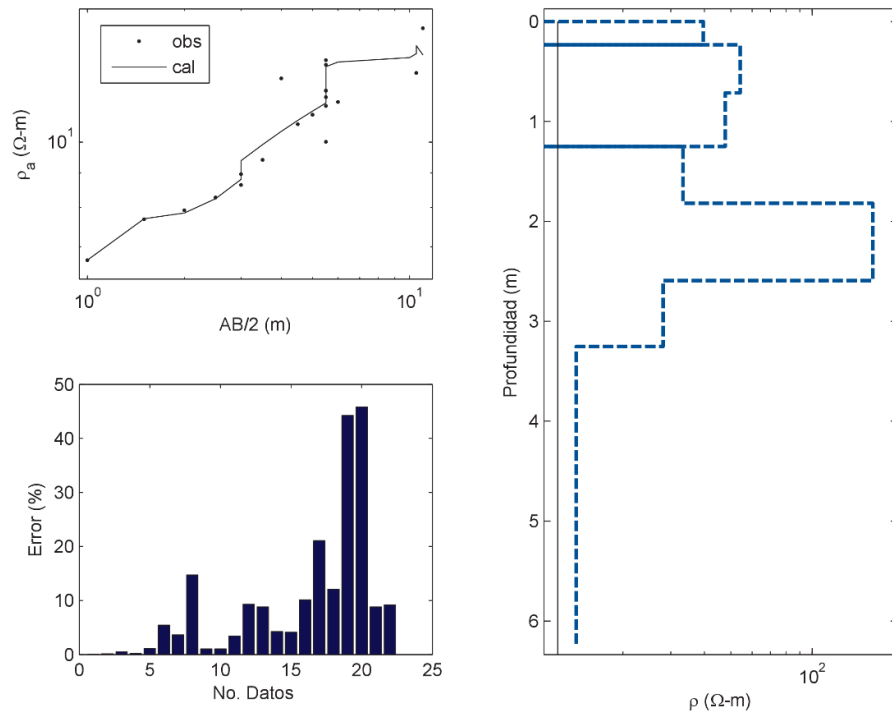
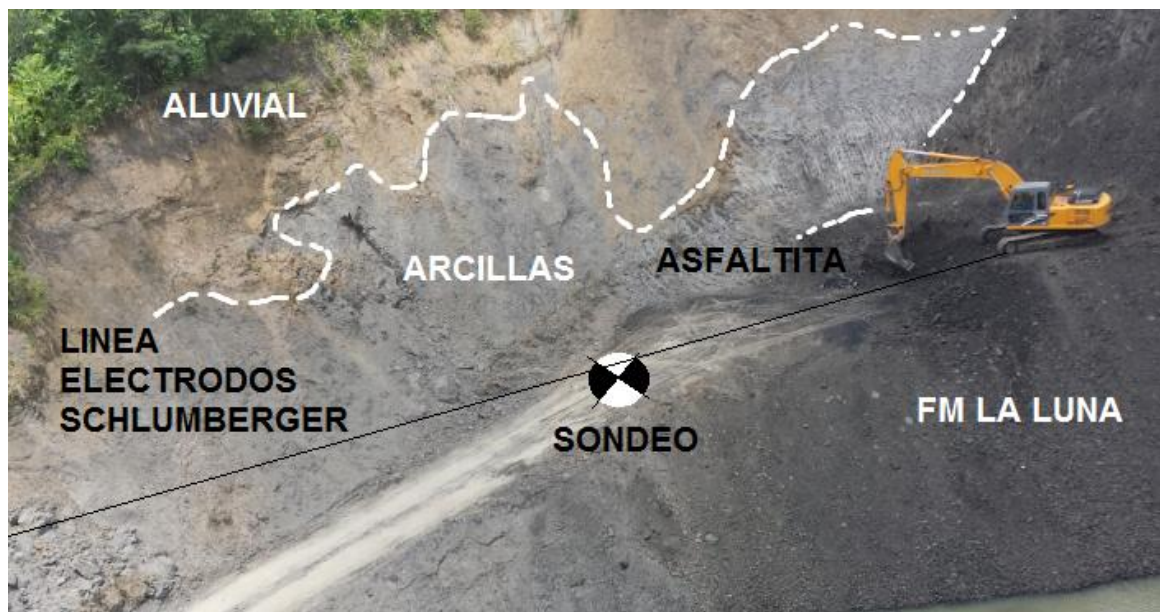


Figura 79. Corte geológico de la Zona de adquisición del sondeo SME-1.



7.5.3 Tomografías de resistividad eléctrica (TRE). En total se tienen cuatro tomografías de resistividad eléctrica, con una extensión de los perfiles geoelectrónicos entre 100 - 200 m, los cuales tienen espaciamiento de electrodos entre 1,5 y 2,5 metros, respectivamente.

- **TME-1**

Ubicación:

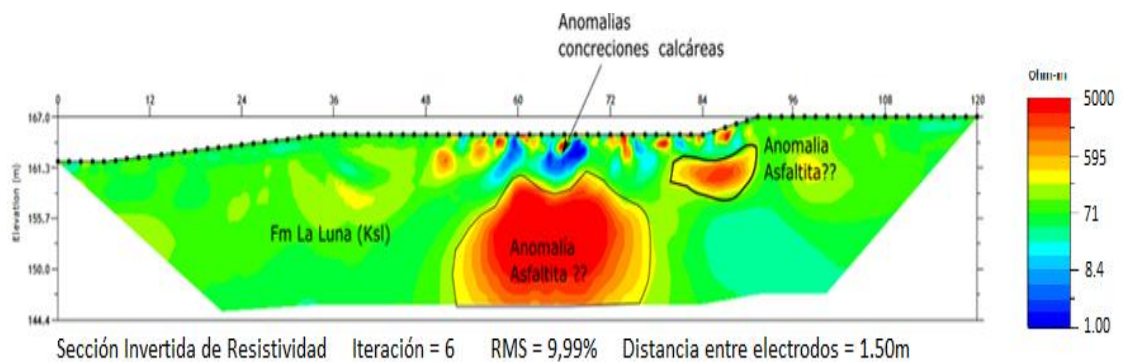
Punto inicial: 1080823 E, 1322231 N

Punto final: 1080807 E, 1322113 N

Esta tomografía está ubicada en la mina El Edén sobre el frente de explotación actual la cual se sitúa sobre la Fm La Luna, posee una extensión de 120 m con una profundidad máxima de 20 m.

En la Figura 80 el valor predominante de resistividades varía entre 40 – 200 ohm-m el cual se cataloga como característico de la Fm La Luna, además se observa una anomalía que evidencia resistividades mayores de 3000 ohm-m lo que se infiere como la resistividad de la asfaltita en un medio seco y sin fracturamiento.

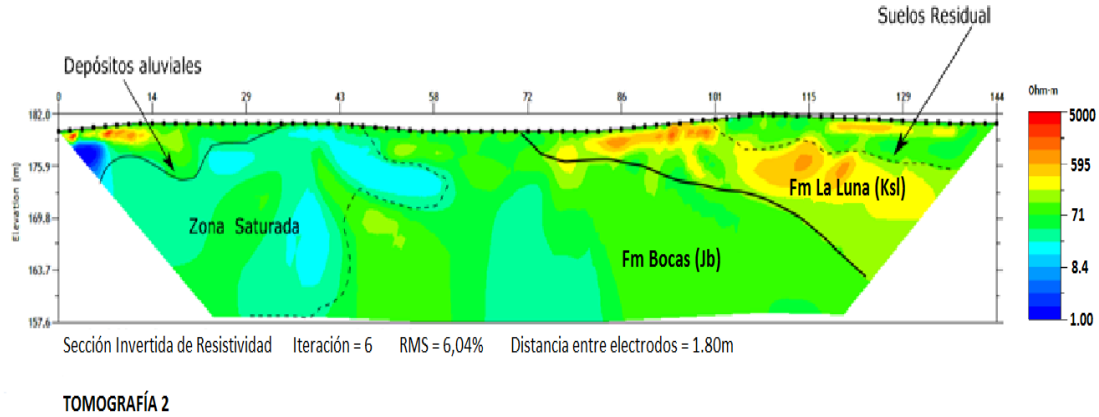
Figura 80. Modelo 2D de la resistividad y profundidad real de la tomografía 1.



TOMOGRAFÍA 1

- **TME-2**

Figura 81. Modelo 2D de la resistividad y profundidad real de la tomografía 2.



Ubicación:

Punto inicial: 1080846 E, 1322189 N

Punto final: 1080949 E, 1322286 N

Esta tomografía está ubicada sobre dos Formaciones geológicas importantes: Fm La Luna y Fm Bocas. Posee una extensión de 144 m con una profundidad máxima de 24 m. En la parte SW de la tomografía (ver Figura 81). Se evidencian resistividades entre 10 – 70 ohm-m, lo cual se catalogó como zona saturada, un poco más al NE se encuentra la Fm Bocas, presentando en este punto resistividades de 50 ohm-m hasta 150 ohm-m aproximadamente. Seguidamente se tiene un cambio en la resistividad del subsuelo, con valores de 150 ohm-m hasta 500 ohm-m definidos en este trabajo para la Fm La Luna.

- **TME-3**

Ubicación:

Punto inicial: 1080796 E, 1322060 N

Punto final: 1080884 E, 1322019 N

Esta tomografía está ubicada hacia la parte Sur de la mina El Edén, exactamente sobre la Fm La Luna y la Fm Bocas. Posee una extensión de 98 m con una profundidad máxima de 30 m aproximadamente. Figura 82.

Se evidencia en la parte superior una sección con resistividades entre 200 – 1000 ohm-m con un espesor de 3 m hasta 10 m, el cual se señala como depósito aluvial. Infrayaciendo esta sección, hacia la parte NW, se encuentra la Fm La Luna con resistividades entre 30 – 80 ohm-m. También se identificó la Fm Bocas con resistividades alrededor de 250 ohm-m y 300 ohm-m. Entre el suelo aluvial y la Fm Bocas se evidenció una capa denominada como suelo arcilloso residual perteneciente a la Fm Bocas.

- **TME-4**

Ubicación:

Punto inicial: 1080721 E, 1321928 N

Punto final: 1080759 E, 1322120 N

Esta tomografía está ubicada en sentido S-N en la mina El Edén, exactamente sobre la Fm La Luna. (Figura 83). Posee una extensión de 200 m con una profundidad máxima de 35 m aproximadamente. En la parte superior se evidencia un suelo arcilloso con resistividades de 20 – 90 ohm-m, con un espesor mínimo de 3 m y máximo de 11 m. Se observan valores de resistividad bajos en la capa que infrayace los suelos arcillosos, la cual se denominó como zona saturada de la Fm La Luna. Debajo de esta capa se observan resistividades variantes con respecto a la zona saturada, por lo cual se denominó como Fm La Luna. Esta tomografía presenta 3 puntos con anomalías resistivas.

Figura 82. Modelo 2D de la resistividad y profundidad real de la tomografía 3.

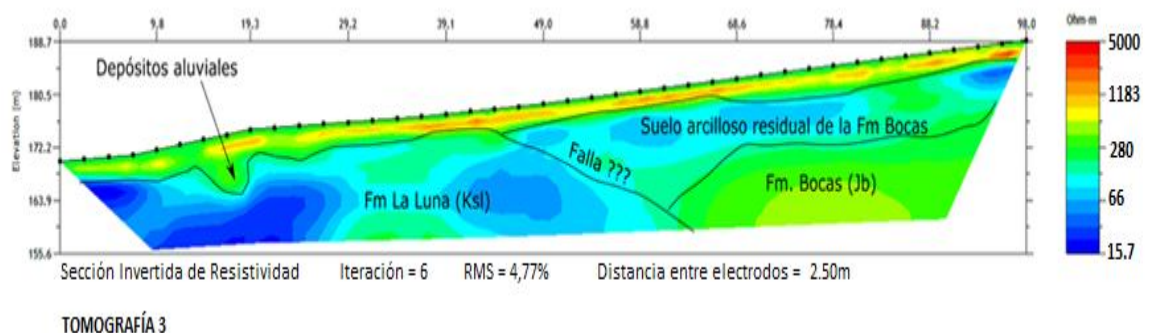
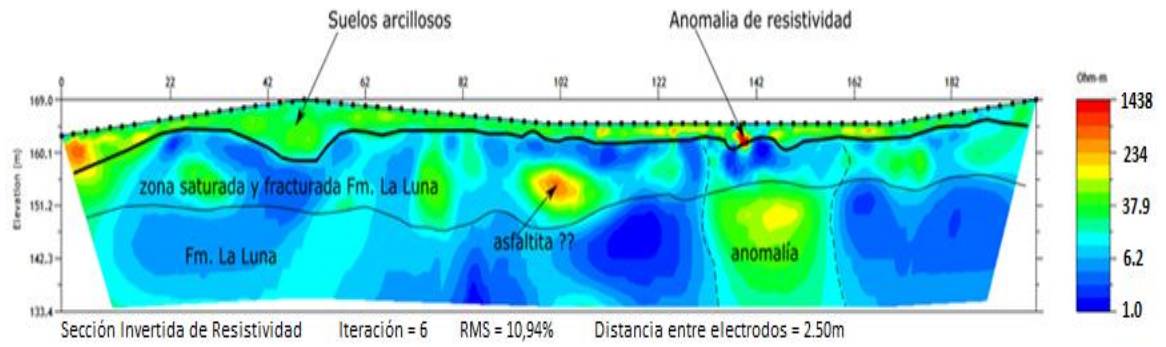


Figura 83. Modelo 2D de la resistividad y profundidad real de la tomografía 4.



TOMOGRAFÍA 4

8. CONCLUSIONES

- Mediante los análisis físico-químicos realizados se clasificaron las muestras M-ME01, M-ME02, M-ME03, M-ME05 y M-ME06 como asfaltita tipo gilsonita destacando las muestras M-ME01, M-ME05 Y M-ME06 por presentar alto contenido en aromáticos, característico de este mineral.
- Por medio de los resultados obtenidos en los sondeos eléctricos verticales (SEV) y las tomografías se logró identificar cada litología y anomalías presentes en los perfiles obtenidos, ya que uno de estos se ubicó sobre estratos visibles.
- Se logró definir un rango de resistividad para la Fm la Luna (Ksl) de 40 a 300 ohm y para la Fm Bocas (Jib) una resistividad menor a 100 ohm, por medio del reconocimiento de dichas litologías en campo, ya que afloraban en el punto de adquisición de los sondeos lo cual permitió correlacionarlo con los resultados de cada SEV.
- De acuerdo a los resultados del estudio realizado sería posible proyectar el desarrollo del proyecto minero en sentido NNW siguiendo una dirección paralela al contacto entre el VMM y el límite de la Cordillera Oriental. (anexo 1)
- Es necesario complementar la técnica de SEV con la Tomografía eléctrica, ya que estas permiten evidenciar las anomalías presentes en el subsuelo arrojando el rango de resistividades para cada material.

BIBLIOGRAFIA

ABRAHAM, H. (1945) *Asphalts and Allied Substances*, 1st edition. Van Nostrand-Rheinhold, Princeton, N.J.

ABRAHAM, H., 1960. *Asphalts and Allied Substances*. 1. Historical Review and Natural Raw Materials. Princeton University Press, Princeton, NJ, 370 pp.

ALONSO, L. (2001). ESTUDIO DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA Y GEOTÉCNICA PARA EL EMPLAZAMIENTO DEL EMBALSE DE SAN ESTEBAN DE ANDAGOYA (ÁLAVA). (Tesis de pregrado). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. España.

ARIAS, D. (2011). *Exploración Geotécnica – Relaciones Geoeléctricas*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

ÁVILA, M., REALES, L., BENÍTEZ, J. (2014). Análisis Del Sub-Suelo Mediante Polarización Inducida Y Resistividad Para La Detección De Estructuras Minerales En La Vereda Santa Lucia – Cauca. 12th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology. Guayaquil, Ecuador.

DE PORTA, J., ET AL., 1974. *Lexique Stratigraphique International*. Centre National Recherche Scientifique. Volume V. Amerique Latine, fascicule 4b, Colombie, 692 p. París.

Diagnóstico dimensión biofísico ambiental territorial de Santander. (2011). Universidad Industrial de Santander.

DIKEY, P.A., 1941. Pre-Cretaceous sediments in Cordillera Oriental of Colombia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 29,: 1789-1795. Tulsa.

Earth sciences & Resources Institute (ESRI) (1986): Technical Report 86-0014, University of South Carolina.

Eldridge, G.H., 1901. The asphalt and bituminous rock deposits of the United States: U.S. Geological Survey 22nd Annual Report, pt. 1, p. 209-464.

GARCÍA, J. Y VARGAS, M. (2015). Interpretación de la Madurez Termal y Discusión sobre la Génesis a partir de la Caracterización Fisicoquímica de los Hidrocarburos Sólidos (Bitumen Sólido) Hospedados en Rocas Sedimentarias Cretácicas y Cenozoicas en el Límite de las Cuencas del Valle Medio del Magdalena y Cordillera Oriental, Colombia. (Tesis de Pregrado). Universidad Industrial de Santander. Colombia.

GLOBAL REACH, recuperado de <http://www.americangilsonite.com>

GOVEA, C. & AGUILERA, H. (1985): Cuencas sedimentarias de Colombia.- Men. VI Congr. Latinoam. Geol., T.2, Bogotá.

GOYES Y., JIMENEZ G., MIER R. (2015). “Aplicación del Método de Inversión Usando Mínimos Cuadrados (dls) para el Procesamiento de Sondeos Eléctricos Verticales en Campo Escuela Colorado (Santander) – Caso de Estudio”. Universidad Industrial de Santander.

HAYS, W., NUTTLI, O. Y SCHARON, L., (1967). Mapping Gilsonita Veins with the Electrical Resistivity Method. Geophysics, Vol. XXXII. No 2. pp. 302-310.

HUNT J. M. (1979) Petroleum Geochemistry and Geology. Freeman, San Francisco.

I.A. BREGER AND T.K. MILES, 1971. "Asphalt and Asphaltite", in: McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology, 2, McGraw-Hill, New York, N.Y., pp. 637-638.

JACOB, H., 1967. Petrologie von Asphaltiten und asphaltischen Pyrobitumina. Erd61 Kohle, 20: 393-400.

JACOB, H., 1989. Classification, structure, genesis and practical importance of natural solid oil bitumen ("migrabitumen"). Int. J. Coal Geol., 11: 65-79.

JARAMILLO J., ROJAS S., GÓMEZ C., RODRÍGUEZ G., BERNAL N. (2014). "Bitumen Deposits in Middle Magdalena Valley, Colombia, South America" Search and Discovery Article #51051.

JARVIE, D.M. (1991). Total Organic Carbon (TOC) Analysis in Treatise of Petroleum Geology: Handbook of Petroleum Geology: Source and Migration Processes and Evaluation Techniques, Ed. R.K. Merrill. AAPG, Tulsa.

JULIVER, M. ET AL., 1968. Lexique Stratigraphique International. Merique Latine Colombia Premiere parte: Centre National de la Recherche Scientifique. 5, (4a), Colombie, 651 p. París.

KUMAR, D., THIAGARAJAN, S. Y RAI, S.N. (2011). Deciphering Geothermal Resources in Deccan Trap Region using Electrical Resistivity Tomography Technique. Journal Geological Society of India. Vol. 78, pp. 541-548.

MARTINEZ, W, MENDEZ, A. RUBIO, W., & TABORDA, A. (1988): Ideas sobre la geología estructural del noreste de Colombia y su relación con los campo de petróleo.- III Simp. Bolivariano. Explor. Petr. Cuencas subandina, Caracas.

MOJICA, J. & FRANCO, R. (1990): Estructura y evolución tectónica del valle medio y superior del Magdalena. Geol. Colombiana.

MONSON, B. Y PARNELL, J. (1992). The Origin of Gilsonite Vein Deposits in the Uinta Basin, Utah, Hydrocarbon and Mineral Resources of the Uinta Basin, Utah and Colorado and Mineral Resources of the Uinta Basin, Utah and Colorado: Utah Geological Association Guidebook 20.

MORALES, L., ET AL., 1958. General geology and oil occurrence of the Middle Magdalena Valley, Colombia. In *Habitat of oil a Symposium American Association of Petroleum Geologists Bulletin*,: 641-695. Tulsa.

NETTLETON, L. L. (1940): Geophysical Prospecting for Oil.

PÉREZ, G. & VALENCIA, M. (1977): Evaluación geológica del Valle Medio del Magdalena.- Informe 588, Div. Explor., Depto. Geol., Ecopetrol, Bogotá.

PETERS E, Kenneth. Y CASSA, M. R. (1994). Applied Source Rock Geochemistry. En: MAOON, L.B. Y DOW W. G. The petroleum System-from source to trap. AAPG Memoir 60.

REMY, W., ET AL., 1975. Neueinstufung der Bocas-Folge (Bucaramanga, Kolumbien) in den Unteren Jura anhand einer *Phleboteris-branneri* und *classopollis*-Flora-Argumenta *Paleobotánica* (4): 55-77. Münster.ía (INGEOMINAS).

ROYERO, J. & CLAVIJO, J. (2001): Memoria explicativa del departamento de Santander. Ingeominas.

SONDHI, N. (2011). Petrophysical characterization of eagle ford shale. University of Oklahoma.

T.F. YEN, 1973. "Chemical Aspects of Interfuel Conversion", Energy Sources, pp.117-136

TERRAMETER ABEM SAS 1000/4000, recuperado de <http://www.abem.se/resistivity/sas1000.htm>

VARGAS, R. Y ARIAS, A. (2009). Geología de la Plancha 97, Cáchira. 1:100.000. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).

WARD, W., ET AL., 1970. Recursos minerales de parte de los departamentos de Norte de Santander y Snatander. Ingeominas. Boletín Geolgico, 21(1-3): 1-32. Bogotá.

Los anexos pueden consultarse en la carpeta adjunta al CD.