

SERVICIO  
GEOLÓGICO  
COLOMBIANO



MinMinas  
Ministerio de Minas y Energía

PROSPERIDAD  
PARA TODOS

**EXPLORACIÓN GAS METANO ASOCIADO AL CARBÓN. ÁREA  
ÚMBITA-RONDÓN**

**Bogotá, diciembre de 2014**



**GRUPO DE INVESTIGACIÓN Y EXPLORACIÓN DE RECURSOS  
MINERALES ENERGÉTICOS**

***EXPLORACIÓN GAS METANO ASOCIADO AL CARBÓN. ÁREA  
ÚMBITA- RONDÓN***

Por:

**Marco Antonio Rincón M.**

**Geólogo**

**Claudia Inés Duarte B.**

**Ingeniera Geóloga**

**Fernando Andrés Parra C.**

**Ingeniero Geólogo**

**Sonia Rojas Barbosa**

**Geóloga**

**Mary Luz Peña**

**Químico**

**Yolanda Cañón**

**Químico**

**Cindy Lizeth Urueña S**

**Geólogo**

**Sergio Amaya Ferreira**

**Geólogo**

**Maribel Moreno Forero**

**Químico**

**Maribel Barajas Q**

**Químico**

**Manuel H. Romero**

**Químico**

**Billy A. Rodríguez**

**Ingeniero Químico**

**Víctor Daniel Ballén**

**Químico**

**Jimmy A. Muñoz**

**Químico**

**Bogotá, diciembre de 2014**

## CONTENIDO

	Pág.
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>16</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>17</b>
<b>1. METODOLOGIA .....</b>	<b>18</b>
<b>2. EXPLORACIÓN DE GMAC .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 GENERALIDADES .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.1 Localización y extensión del área de estudio .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.2 Vías de comunicación .....</b>	<b>24</b>
<b>2.1.3 Clima y Vegetación .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.4 Hidrografía .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.5 Hidrogeología .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1.6 Población .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2 GEOLOGIA .....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.1 Estratigrafía .....</b>	<b>29</b>
2.2.1.1 Formación Fómeque (b4b6f) .....	30
2.2.1.2 Formación Une (b6k1u) .....	30
2.2.1.3 Formación Chipaque (k2k4cp) .....	30
2.2.1.4 Formación Arenisca Dura (k4k5d) .....	31
2.2.1.5 Formación Plaeners (k5p) .....	32
2.2.1.6 Formación Arenisca Labor - Tierna (k6lt) .....	33
2.2.1.7 Formación Guaduas (k6e1g) .....	35
2.2.1.8 Formación Socha Inferior (E1si) .....	37
2.2.1.9 Formación Socha Superior (e3e4ss) .....	38
2.2.1.10 Formación Picacho (E2p) .....	38
2.2.1.11 Formación Concentración (E2E3co) .....	40
2.2.1.12 Depósitos Coluviales (Q2c) .....	41
<b>2.2.2 Tectónica .....</b>	<b>41</b>
2.2.2.1 Pliegues .....	41
2.2.2.2 Fallas .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>2.3 SECTORES EVALUADOS PARA EXPLORACIÓN DE GMAC .....</b>	<b>49</b>
<b>2.3.1 Sector Úmbita - Tibaná (Flanco Occidental) .....</b>	<b>51</b>
<b>2.3.2 Sector Úmbita - Chinavita (Flanco Oriental) .....</b>	<b>53</b>
<b>3. GEOLOGIA DEL SUBSUELO .....</b>	<b>56</b>
<b>3.1 DESARROLLO DE PERFORACIONES .....</b>	<b>56</b>
<b>3.1.1 Pozo Úmbita -1 .....</b>	<b>58</b>

3.1.2	Pozo Chinavita-1 .....	60
3.2	INCONVENIENTES REGISTRADOS DURANTE LAS PERFORACIONES .....	62
3.3	ANÁLISIS GEOLÓGICO DE LOS POZOS PERFORADOS.....	62
3.3.1	Registros de Pozo .....	62
3.3.1.1	Registro de Rayos Gamma .....	63
3.3.1.2	Registro de Densidad.....	63
3.3.1.3	Registro Temperatura .....	63
3.3.1.4	Registros de Resistividad.....	63
3.3.2	Interpretación de Registros.....	64
3.3.2.1	Pozo Úmbita -1.....	64
3.3.2.2	Pozo Chinavita-1 .....	65
3.4	SELLAMIENTO .....	66
4.	TERMOCRONOLOGÍA Y GEOLOGÍA ISOTÓPICA .....	67
4.1	METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	67
4.1.1	Selección Área de Estudio .....	67
4.1.2	Estrategia de Muestreo.....	67
4.1.3	Preparación de muestras.....	71
4.1.4	Técnicas analíticas utilizadas .....	72
4.2	RESULTADOS.....	74
4.2.1	Sección Estratigráfica.....	74
4.2.2	Dataciones U/Pb .....	76
4.2.3	Reflectancia en Vitrinita.....	78
4.2.4	Huellas de fisión en Apatitos .....	80
4.2.5	Isótopos Estables <sup>13</sup> C/ <sup>12</sup> C .....	81
4.3	EVOLUCIÓN TÉRMICA.....	83
4.3.1	Antecedentes.....	83
4.3.2	Modelo Térmico.....	84
4.4	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	86
5.	CARACTERIZACION DE CARBONES .....	94
5.1	ANÁLISIS FISIQUÍMICOS .....	97
5.1.1	Análisis Próximo .....	98
5.1.2	Poder Calorífico.....	103
5.1.3	Análisis Elemental.....	104
5.1.4	Formas de Azufre.....	108
5.1.5	Humedad de Equilibrio (HE).....	110
5.1.6	Gravedad Específica Verdadera (GEV).....	112
5.1.7	Índice de Hinchamiento .....	112
5.1.8	Índice de Molienda Hardgrove (IHG).....	113
5.1.9	Contenido de Mercurio .....	114
5.1.10	Plastometría.....	117
5.1.11	Análisis Químico de Cenizas.....	117

5.1.12	Elementos menores y trazas en cenizas de carbón .....	119
5.1.13	Clasificación de los Carbones .....	121
5.2	<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICOS.....</b>	<b>123</b>
5.2.1	Reflectancia media de la vitrinita (%Rm).....	123
5.2.2	Determinación de la composición maceral.....	132
6.	<b>MEDICIONES DE CONTENIDOS DE GAS Y CROMATOLOGRAFIA. 137</b>	
6.1	<b>MEDICIONES DE CONTENIDOS DE GAS METANO.....</b>	<b>137</b>
6.1.1	<b>Metodología utilizada para calcular el contenido de gas asociado a los mantos de carbón (GMAC) .....</b>	<b>138</b>
6.1.2	<b>Procedimiento en la medición de contenidos de GMAC .....</b>	<b>139</b>
6.1.2.1	Obtención de muestras en campo.....	139
6.1.2.2	Prueba de desorción en campo (Gas Perdido) .....	141
6.1.2.3	Mediciones en laboratorio .....	142
6.1.2.4	Procesamiento de la información .....	146
6.1.3	<b>Resultados obtenidos .....</b>	<b>147</b>
6.1.3.1	Pozo Úmbita -1.....	147
6.1.3.2	Pozo Chinavita-1 .....	148
6.1.3.3	Frentes de Mina .....	148
6.2	<b>CROMATOLOGRAFIA .....</b>	<b>152</b>
6.2.1	<b>Metodología .....</b>	<b>152</b>
6.2.1.1	Muestreo .....	152
6.2.1.2	Identificación y Cuantificación .....	153
6.2.1.3	Resultados .....	158
7.	<b>CÁLCULO DE RECURSOS Y RESERVAS DE GAS METANO ASOCIADO AL CARBON.....</b>	<b>159</b>
7.1	<b>DEFINICIÓN DE RECURSO Y RESERVA.....</b>	<b>159</b>
7.2	<b>LIMITES PARA LA EVALUACIÓN DE RESERVAS Y RECURSOS.....</b>	<b>160</b>
7.2.1	<b>Zona explotada .....</b>	<b>160</b>
7.2.2	<b>Zona de Dilución .....</b>	<b>160</b>
7.2.3	<b>Zona de Concentración.....</b>	<b>161</b>
7.3	<b>EVALUACIÓN DE RECURSOS Y RESERVAS DE GMAC.....</b>	<b>161</b>
7.3.1	<b>Categorías de Evaluación.....</b>	<b>161</b>
7.3.2	<b>Cálculo del Potencial de GMAC .....</b>	<b>163</b>
7.3.2.1	Recursos y Reservas de GMAC.....	164
7.3.2.2	Recursos Especulativos .....	195
8.	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>196</b>
9.	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>200</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>202</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Fases en el desarrollo de un proyecto de Gas Metano asociado al carbón Fuente: Modificado de Mariño, 2010. ....	18
<b>Figura 2.</b> Localización área de estudio. ....	23
<b>Figura 3.</b> Replegamientos en la Formación Chipaque, río Mueche, municipio de Rondón. ....	31
<b>Figura 4.</b> Secuencia de arenitas de grano muy fino en capas delgadas a gruesas características de la Formación Arenita Dura. Quebrada Azul, municipio de Rondón. ....	32
<b>Figura 5.</b> Secuencia de arenitas, porcelanitas y arcillolitas de color gris de la Formación Plaeners en el recorrido efectuado por la vía Tibaná - Chinavita municipio de Tibaná. ....	33
<b>Figura 6.</b> Arenitas de grano fino en capas delgadas a medias que infrayacen la formación Guaduas. En la parte superior derecha se observa detalle de los icnofósiles identificados hacia la base de la formación. Aguas abajo Río Garagoa, municipio de Chinavita. ....	34
<b>Figura 7.</b> Morfología suave de la Formación Guaduas en contraste con las formaciones Arenisca Labor y Tierna (infrayace) y Socha Superior (suprayace), municipios de Chinavita y Úmbita . ....	36
<b>Figura 8.</b> Deformaciones en algunos mantos de carbón hacia el norte de la zona de estudio (Rondón) por efecto de los esfuerzos originados por las fallas evidenciadas. ....	36
<b>Figura 9.</b> Escarpe que conforma las arenitas de grano fino a conglomeráticas de la formación Socha Inferior (E1si). Loma El Coque, Vereda Juncal, municipio de Úmbita. ....	37
<b>Figura 10.</b> Contacto Formación Picacho-Formación Socha Superior. A la izquierda detalle de concreciones subredondeadas en la Formación Socha Superior. Vía Chinavita-Ramiriquí. ....	38
<b>Figura 11.</b> Escarpes característicos de la Formación Picacho, en la parte superior izquierda se observa el detalle de las arenitas de grano fino a conglomerático, con presencia de niveles de guijos de la formación. Material extraído en la zona de estudio para comercialización. Vereda Uvero, Municipio de Úmbita. ....	39

<b>Figura 12.</b> Formación Concentración hacia el núcleo del Sinclinal de Úmbita, donde se aprecian algunos niveles competentes de arenitas, municipio de Tibaná. ....	40
<b>Figura 13.</b> Sinclinal de Úmbita, donde se aprecia hacia su eje las Formaciones Picacho y Concentración. Vía Tibaná – Úmbita .....	41
<b>Figura 14.</b> Se aprecia el efecto que la Falla de San José causa sobre la Formación Picacho, disectándola y originando un movimiento en la componente vertical hacia abajo del bloque oriental, al inicio de su trazo. Vereda Uvero, municipio de Úmbita. ....	43
<b>Figura 15.</b> Falla de San José hacia el nor-orienté, donde se evidencia el cambio en el movimiento de sus bloques en relación al comportamiento inicial de la misma. Vereda Uvero, municipio de Úmbita. ....	43
<b>Figura 16.</b> Desplazamiento en la componente horizontal de la Falla El Uvero, que se aprecia en la Formación Picacho. Vía Tibaná-Úmbita.....	45
<b>Figura 17.</b> Trazo de la Falla Ramiriquí, donde la formación Arenisca Labor y Tierna sube con respecto a la Formación Guaduas. Municipios de Chinavita y Úmbita.....	45
<b>Figura 18.</b> Efectos de la Falla Río Garagoa, se evidencia verticalización e inversión de estratos. ....	46
<b>Figura 19.</b> Falla El Carmen que pone en contacto la Formación Guaduas con la Formación Arenisca Dura, Vereda San José, Tibaná. ....	47
<b>Figura 20.</b> Replegamientos originados por efecto de la Falla de Soapaga en materiales blandos de la Formación Chipaque, que sube con respecto a Formaciones más jóvenes como Socha Inferior y Socha Superior. Vía Ramiriquí-Zetaquirá. ....	47
<b>Figura 21.</b> Localización sectores analizados para exploración de GMAC en la zona de estudio.....	51
<b>Figura 22.</b> Sector GMAC Úmbita - Tibaná. Ubicado al suroccidente de la zona de estudio.....	52
<b>Figura 23.</b> Sector GMAC Úmbita - Chinavita. Ubicado al suroriente de la zona de estudio.....	53
<b>Figura 24.</b> Localización perforaciones realizadas en la exploración de GMAC. ....	57
<b>Figura 25.</b> Localización Pozo Úmbita -1, municipio de Úmbita.....	58
<b>Figura 26.</b> Montaje del Pozo Úmbita -1, Vereda Juncal, municipio de Úmbita. ....	59
<b>Figura 27.</b> Manejo de los núcleos recuperados para el traslado a la Litoteca del SGC. ....	60
<b>Figura 28.</b> Ubicación del pozo Chinavita-1, municipio de Chinavita-1. ....	60
<b>Figura 29.</b> Montaje del pozo Chinavita-1. ....	61
<b>Figura 30.</b> Realización de Registros en el Pozo Úmbita -1. ....	64
<b>Figura 31.</b> Sellado del Pozo Úmbita -1, municipio de Úmbita .....	66
<b>Figura 32.</b> Mapa y perfil geológico del área de interés en el Sinclinal de Úmbita con los puntos previstos de acuerdo con la estrategia de muestreo planteada para el desarrollo del estudio (tomado de SGC, 2014).....	68

<b>Figura 33.</b> Muestreo realizado en arenitas de la formación Guaduas, municipio de Tibaná. ....	69
<b>Figura 34.</b> Muestreo realizado en carbones para análisis de Isótopos Estables. Vereda Quichatoque, municipio de Tibaná. ....	69
<b>Figura 35.</b> Sección estratigráfica del Sinclinal de Úmbita (Flanco oriental). Medición de espesores y posicionamiento de muestras. ....	76
<b>Figura 36.</b> Histogramas de distribución de edades U/Pb para la Formación Picacho (a - b - c), Formación Socha Inferior (d). ....	78
<b>Figura 37.</b> Histogramas de distribución de edades U/Pb para la Formación Guaduas (e - f). ....	78
<b>Figura 38.</b> Modelamiento térmico a partir de análisis de huellas de fisión. (a) Trayectoria T-t para la muestra 14-HF-003 de la Fm. Socha Sup. (b) Modelamiento inverso en HeFTy, el área magenta representa las trayectorias de mejor ajuste. (c) Histograma de distribución de las longitudes de trazas, distribución normal ajustada al modelo. (d) Modelo térmico incluida la trayectoria hipotética (en verde) de la Fm. Guaduas. ....	85
<b>Figura 39.</b> Esquema de evolución del kerógeno de los carbones de la Formación Guaduas en el sinclinal de Úmbita , representado mediante el diagrama de van Krevelen. Se muestran tres tipos de kerógenos, el tipo III corresponde a origen de restos de vegetación continental. Tomado de (Tissot & Welte, 1984). ....	91
<b>Figura 40.</b> Producción relativa de gas a partir de materia orgánica enterrada en sedimentos de grano fino como una función de la temperatura. (a) Fuente sapropelica y (b) fuente húmica. El C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> + representa los gases hidrocarbonados más pesados que el metano y es colectivamente llamado gas húmedo. Tomado de Hunt (1996) . ....	92
<b>Figura 41.</b> Variación en la composición porcentual de los parámetros Cz, HR, CF, MV, en base como se analiza de las muestra del estudio. ....	98
<b>Figura 42.</b> Composición del contenido promedio de cenizas, materia volátil y carbono fijo (%) en b.s. ....	99
<b>Figura 43.</b> Variación del promedio de contenido de MV bs y CZ bs a través de los mantos en el área de estudio. ....	100
<b>Figura 44.</b> Variación contenido de MVslmm y Cz con la profundidad. Pozo Chinavita-1. ....	101
<b>Figura 45.</b> Comportamiento contenido de MVslmm y Cz con la profundidad. Pozo Úmbita -1. ....	101
<b>Figura 46.</b> Histograma de valores de Poder calorífico (PC) Btu/lb (base seca)..	103
<b>Figura 47.</b> Promedios PC (bs) y PClmm con respecto a la secuencia carbonífera identificada. ....	104
<b>Figura 48.</b> Histograma de valores de contenido de Carbono Total (C) (base seca). ....	105
<b>Figura 49.</b> Interrelación de Hidrogeno y Oxigeno (% bs vs C (% bs). ....	106
<b>Figura 50.</b> Variación de los contenidos medios de C, H, N y O en porcentajes vs mantos. ....	106



<b>Figura 51.</b> Histograma de valores de contenido de azufre total (ST), (base seca).	107
<b>Figura 52.</b> Variación de la media los contenidos de formas de azufre en función de los mantos	108
<b>Figura 53.</b> Variación del contenido de SP y SO en base seca con el contenido de Azufre total en base seca	109
<b>Figura 54.</b> Variación de la media de humedad de equilibrio con la profundidad de los mantos.	111
<b>Figura 55.</b> Variación del contenido de HR (%) con el contenido de humedad inherente (%)	111
<b>Figura 56.</b> Variación del contenido de GEV con el contenido de CZ (%) bca.	112
<b>Figura 57.</b> Variación del promedio IMH con los mantos.	113
<b>Figura 58.</b> Histograma del contenido de mercurio $\mu\text{g}/\text{Kg}$ (base seca).	115
<b>Figura 59.</b> Variación de la media del contenido de mercurio con la profundidad de los mantos.	115
<b>Figura 60.</b> Variación del contenido de Hg ( $\mu\text{g}/\text{g}$ ) con el contenido de ST (%) en b.s.	116
<b>Figura 61.</b> Variación del contenido de Hg ( $\mu\text{g}/\text{g}$ ) con el contenido de SP (%) en b.s.	116
<b>Figura 62.</b> Composición elemental de las cenizas expresadas en porcentajes de óxidos.	118
<b>Figura 63.</b> Clasificación de las cenizas en los sectores de estudio.	119
<b>Figura 64.</b> Composición porcentual de la clasificación de carbones de acuerdo con la norma ASTM.	122
<b>Figura 65.</b> Generación de gas en el carbón Fuente: Law and Rice (1991).	122
<b>Figura 66.</b> Reflectancia media de la vitrinita para los carbones en los sectores de estudio.	124
<b>Figura 67.</b> Estados de carbonificación de acuerdo a la clasificación americana (ASTM, 1978). Fuente: Uribe y Pérez, 1987.	125
<b>Figura 68.</b> Análisis maceral para las muestra de carbón.	127
<b>Figura 69.</b> Relación de la profundidad con la reflectancia media de la vitrinita (%) por pozos.	127
<b>Figura 70.</b> Comportamiento de la reflectancia media de la vitrinita con la profundidad para cada manto de carbón.	128
<b>Figura 71.</b> Relación materia volátil bs reflectancia por puntos de muestreo.	129
<b>Figura 72.</b> Relación materia volátil bs reflectancia por mantos.	129
<b>Figura 73.</b> Relación materia volátil sICz Vs reflectancia (Tomado de STACH, et al 1982).	130
<b>Figura 74.</b> Relación materia volátil sICz reflectancia por puntos de muestreo.	131
<b>Figura 75.</b> Distribución espacial de reflectancia por puntos de muestreo.	131
<b>Figura 76.</b> Análisis maceral bcsa por mantos.	132
<b>Figura 77.</b> Análisis maceral blmm por mantos.	133
<b>Figura 78.</b> Variación de la vitrinita bcsa por manto de carbón respecto a la profundidad.	134

<b>Figura 79.</b> Variación de Inertinita por manto de carbón respecto a la profundidad. ....	134
<b>Figura 80.</b> Variación de liptinita bcsa por manto de carbón respecto a la profundidad. ....	135
<b>Figura 81.</b> Análisis maceral bcsa en los puntos de muestreo. ....	136
<b>Figura 82.</b> Pruebas de hermeticidad en los canister. Muestreo frente de mina. .	140
<b>Figura 83.</b> Pruebas de hermeticidad en los canister. Muestreo frente de mina. .	141
<b>Figura 84.</b> Sistema de medición del gas perdido en muestras de carbón pozo Úmbita -1. ....	142
<b>Figura 85.</b> Conservación de la temperatura de los canister en un baño termostático. ....	143
<b>Figura 86.</b> Medición de contenidos de gas metano en muestras de pozo. Sistema de medición con control de temperatura (izquierda) y sistema de medición con buretras (derecha). ....	144
<b>Figuras 87 y 88.</b> Molino empleado para la determinación de gas residual en una muestra de carbón. ....	145
<b>Figura 89.</b> Curva de desorción, donde se aprecia los intervalos para los contenidos de gas perdido, medido y residual. ....	147
<b>Figura 90.</b> Cromatógrama estándar 3. ....	154
<b>Figura 91.</b> Curva de calibración para Nitrógeno. ....	155
<b>Figura 92.</b> Curva de calibración para Metano. ....	156
<b>Figura 93.</b> Curva de calibración para Dióxido de Carbono. ....	156
<b>Figura 94.</b> Cromatograma muestra canister 16 del Pozo Chinavita-1. ....	157

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Coordenadas área de estudio Úmbita – Rondón .....	22
<b>Tabla 2.</b> Coordenadas Sector GMAC Úmbita - Tibaná .....	24
<b>Tabla 3.</b> Coordenadas Sector GMAC Úmbita - Chinavita .....	24
<b>Tabla 4.</b> Relación de muestras tomadas en campo y análisis realizados de acuerdo con la disponibilidad de minerales tras la preparación de la muestra .....	70
<b>Tabla 5.</b> Reflectancia de vitrinita y paleotemperatura calculada para muestras de carbón de la Formación Guaduas tomadas en superficie .....	79
<b>Tabla 6.</b> Reflectancia de vitrinita y paleotemperatura calculada para muestras de carbón de la Formación Guaduas tomadas en pozo Úmbita-1 y Chinavita-1 .....	80
<b>Tabla 7.</b> Edades obtenidas por análisis de trazas de fisión en apatitos para la Formación Socha Superior.....	81
<b>Tabla 8.</b> Resultados de isótopos estables de carbono (Fraccionamiento $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) y su relación con los valores de reflectancia en vitrinita y paleotemperatura calculada .....	82
<b>Tabla 9.</b> Resultados análisis de carbones, concentración de azufre .....	89
<b>Tabla 10.</b> Relación de los métodos de ensayos empleados para los análisis .....	94
<b>Tabla 11.</b> Número y tipo de muestras obtenidas en el área de estudio Úmbita – Rondón.....	97
<b>Tabla 12.</b> Análisis próximo de las muestras con mayor contenido de metano en los Pozos .....	102
<b>Tabla 13.</b> Contenido promedio de elementos mayores expresado en óxidos en las cenizas de los carbones obtenidas a $750^{\circ}\text{C}$ .....	117
<b>Tabla 14.</b> Clasificación de carbones por rango a partir de valores de reflectancia de la vitrinita .....	126
<b>Tabla 15.</b> Muestras analizadas en el área de estudio para GMAC .....	138
<b>Tabla 16.</b> Valores de contenidos de gas metano en las muestras analizadas Pozo Úmbita -1 .....	149
<b>Tabla 17.</b> Valores de contenidos de gas metano en las muestras analizadas Pozo Chinavita-1 .....	150
<b>Tabla 18.</b> Valores de contenidos de gas metano en las muestras analizadas de Frente de mina .....	151
<b>Tabla 19.</b> Concentración de gases en los diferentes estándares.....	155
<b>Tabla 20.</b> Concentración de gases en los diferentes canisters realizada en el laboratorio del SGC Bogotá.....	157

<b>Tabla 21.</b> Localización sitios con información y muestras de carbón del Área GMAC Úmbita -Rondón, Sector Úmbita -Chinavita.....	175
<b>Tabla 22.</b> Clasificación de carbones por rango según la norma ASTM. Área Úmbita -Rondón. Sector Úmbita -Chinavita.....	177
<b>Tabla 23.</b> Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita. Manto 1.	181
<b>Tabla 24.</b> Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita. Manto 2	182
<b>Tabla 25.</b> Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita. Manto 3	183
<b>Tabla 26.</b> Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita. Manto 4	184
<b>Tabla 27.</b> Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita. Manto 5	185
<b>Tabla 28.</b> Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita, Manto 6	186
<b>Tabla 29.</b> Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita, Manto 7	187
<b>Tabla 30.</b> Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita, Manto 8	188
<b>Tabla 31.</b> Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita, Manto 9	189
<b>Tabla 32.</b> Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita, Manto 10 .....	190
<b>Tabla 33.</b> Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita, Manto 11 .....	191
<b>Tabla 34.</b> Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita, Manto 12 .....	192
<b>Tabla 35.</b> Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita, Manto 13 .....	193
<b>Tabla 36.</b> Resumen Cálculo de Reservas y Recursos, Área GMAC Úmbita - Rondón, Sector Úmbita -Chinavita .....	194
<b>Tabla 37.</b> Resumen Recursos Especulativos. Area Úmbita – Chinavita.....	195

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Informe de perforaciones	
Anexo B. Resultados de los análisis fisicoquímicos de las diferentes muestras de carbón en base como se analiza (csa)	
Anexo C. Resultados de los análisis fisicoquímicos de las diferentes muestras de carbón en base seca (bs)	
Anexo D. Estadística de los análisis fisicoquímicos realizados a las muestras colectadas en el sector GMAC Úmbita - Chinavita.	
Anexo E. Resultados Elementos menores y trazas en cenizas de carbón	
Anexo F. Fórmulas de conversión en diferentes bases	
Anexo G. Resultados Análisis Petrográfico	
Anexo H. Mediciones contenido de gas metano asociado al carbón	
Anexo I. Libretas de campo	
Anexo J. Solicitud para archivar muestras litológicas	
Anexo K. Cartografía, Columnas,	
Mapa Geológico Área General. Mapa 1 de 17	
Mapa Geológico Área General. Mapa 2 de 17	
Mapa Geológico Área General. Mapa 3 de 17	
Mapa Geológico Sector. Mapa 4 de 17	
Contornos Estructurales. Sector Úmbita - Chinavita, Manto 1. Mapa 5 de 17	
Contornos Estructurales. Sector Úmbita - Chinavita, Manto 2. Mapa 6 de 17	

- Contornos Estructurales. Sector Úmbita - Chinavita, Manto 3. Mapa 7 de 17
- Contornos Estructurales. Sector Úmbita - Chinavita, Manto 4. Mapa 8 de 17
- Contornos Estructurales. Sector Úmbita - Chinavita, Manto 5. Mapa 9 de 17
- Contornos Estructurales. Sector Úmbita - Chinavita, Manto 6. Mapa 10 de 17
- Contornos Estructurales. Sector Úmbita - Chinavita, Manto 7. Mapa 11 de 17
- Contornos Estructurales. Sector Úmbita - Chinavita, Manto 8. Mapa 12 de 17
- Contornos Estructurales. Sector Úmbita - Chinavita, Manto 9. Mapa 13 de 17
- Contornos Estructurales. Sector Úmbita - Chinavita, Manto 10. Mapa 14 de 17
- Contornos Estructurales. Sector Úmbita - Chinavita, Manto 11. Mapa 15 de 17
- Contornos Estructurales. Sector Úmbita - Chinavita, Manto 12. Mapa 16 de 17
- Contornos Estructurales. Sector Úmbita - Chinavita, Manto 13. Mapa 17 de 17
- Columna 1. Sector Úmbita - Chinavita. Úmbita - Juncal
- Columna 2. Sector Úmbita – Chinavita. Mina San Antonio
- Columna 3. Sector Úmbita – Chinavita. Río Garagoa
- Columna 4. Sector Úmbita – Chinavita. Pozo Úmbita -1
- Columna 5. Sector Úmbita – Chinavita. Pozo Chinavita-1

**NOTA:** El anexo I no se encuentra disponible para descarga en el sistema. Si lo requiere, solicítelo a la dirección de gestión de información.

## RESUMEN

Con el fin de analizar la generación y almacenamiento de gas metano ( $\text{CH}_4$ ) en los mantos de carbón de la Formación Guaduas, en la zona carbonífera de Boyacá, se estableció un área de trabajo de  $200 \text{ Km}^2$ , comprendida entre los municipios de Úmbita y Rondón que corresponde al área GMAC denominado Úmbita-Rondón, ubicado en el área carbonífera Úmbita -Laguna de Tota (807).

De acuerdo al análisis realizado, se establecieron 2 sectores de evaluación denominados: Úmbita -Tibaná y Úmbita -Chinavita; en el primero de ellos por factores sociales no se pudieron realizar los trabajos de exploración, en el segundo de ellos, se adelantaron dos perforaciones, identificadas como: Pozo Úmbita -1, con una profundidad de 520,0 m y 10 capas de carbón identificadas y Pozo Chinavita-1 con 580,0 m de profundidad y 13 capas de carbón cortadas. Además de estas muestras, se realizaron mediciones de contenidos de gas metano en 5 muestras de frente de mina. Para el estudio, se definió el muestreo de capas de carbón con espesores mayores e iguales a 0,40m. Las mediciones de  $\text{CH}_4$  se efectuaron aplicando métodos directos. Los contenidos de  $\text{CH}_4$ , en el pozo Úmbita -1 arrojaron valores entre 50,0 a 308,0  $\text{pies}^3/\text{ton}$ ; en el pozo Chinavita-1, entre 12,0 a 61,0  $\text{pies}^3/\text{ton}$ ; en los frentes de mina entre 7,0 a 29,0  $\text{pies}^3/\text{ton}$  con valores de Reflectancia de la vitrinita entre 0.45 a 0.70%. Los mayores volúmenes los registraron los mantos: 1, 2, 3, 4, 6, 11, 12 de la Formación Guaduas.

En cada pozo se corrieron registros de Resistividad Eléctrica, Temperatura, Gamma Ray, Densidad.

Adicionalmente, se realizó una caracterización de carbones, en total se obtuvieron 33 muestras, 30 de carbón, 2 respaldos y 1 arenita (tanto de pozo como de frente de mina). Los carbones muestreados fueron clasificados como Bituminoso alto volátil C, B, A.

Con base en el análisis de Termocronología, la máxima paleotemperatura alcanzada en la formación Guaduas corresponde a  $110^\circ\text{C}$ , los carbones y por tanto el gas metano se generaron dentro de la etapa de catagénesis, alcanzando su rango y madurez en un periodo comprendido entre los 45 M.a y 18 Ma. La exhumación de la cuenca sedimentaria del sinclinal de Úmbita tiene lugar desde al menos unos 6 Ma.

Finalmente, se determinó el potencial de gas metano en los mantos de carbón de interés, como recursos y reservas de GMAC en las categorías de Medido, Indicado, Inferido e Hipotético. El Potencial obtenido correspondió a 120,4 Bcf.

## ABSTRACT

In order to continue with the research on the generation and storage of methane gas (CH<sub>4</sub>) in the coal beds in the Guaduas Formation in the coal Área of Boyacá, established a work area of 200 km<sup>2</sup>, between the municipalities of Úmbita and Rondón corresponding to the area GMAC called Úmbita-Rondón, located in the coal area Laguna de Tota -Úmbita (807).

According to the analysis, two areas of evaluation were established which were called: Úmbita -Tibaná and Úmbita -Chinavita. In the first area, by social factors could not be performed exploration work; in the second area two holes were made, called Úmbita -1 well with a depth of 520.0 m and ten (10) coal beds identified and Chinavita-1 well with a depth of 580,0 m and thirteen (13) bed cut. Besides these samples, measurements of methane gas content were performed on five (5) samples of the mine. For the study, the sampling of coal seams was defined as thicker than and equal to 0.40m. CH<sub>4</sub> measurements were made using direct methods. The coal samples from the Úmbita -1 well yielded values between 50,0 to 308,0 cf/ton; in the Chinavita-1 well, CH<sub>4</sub> contents ranged from 12,0 to 61,0 cf/ton, the values obtained at the mines were between 7,0 to 29,0 cf/ton; the values of Reflectance of vitrinite are between 0.45 and 0.70%. The highest volumes were recorded on the following coal beds: 1, 2, 3, 4, 6, 11, 12 of the Guaduas Formation.

In each well, logs were carried out of Electrical Resistivity, Temperature, Gamma Ray and Density.

Additionally, characterizations of coals were performed, in total thirty three (33) samples were obtained, thirty (30) of coal, two (2) backs and one (1) sandstones (of the well as in front of the mine). The coals sampled were classified as High volatile C, B, A bituminous coals.

Based on the analysis Thermochronology, the maximum paleotemperature reached in the Guaduas formation corresponds to 110 ° C, the coals and the methane gas were generated in the catagen stage, reaching its range and maturity in a period between 45 Ma and 18 Ma. The exhumation of the sedimentary basin where the Úmbita syncline takes place from at least about 6 Ma.

Finally, the potential of methane gas in the coal seams of interest were determined, for which a methodology were structured to determine CBM reserves and resources in the Measured, Indicated, Inferred and Hypothetical categories. The Potential obtained corresponded to 120,4 Bcf.



## INTRODUCCIÓN

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) en su investigación sobre el conocimiento del carbón como roca fuente, reservorio de gas metano y alternativa en la generación de energía a la población en general; continúa con la realización de actividades de exploración en la zona carbonífera de Boyacá, en el presente año los trabajos se orientaron hacia la zona que comprende los municipios de Úmbita, Tibaná, Chinavita, Rondón, entre otros, analizando la estructura geológica denominada Sinclinal de Úmbita.

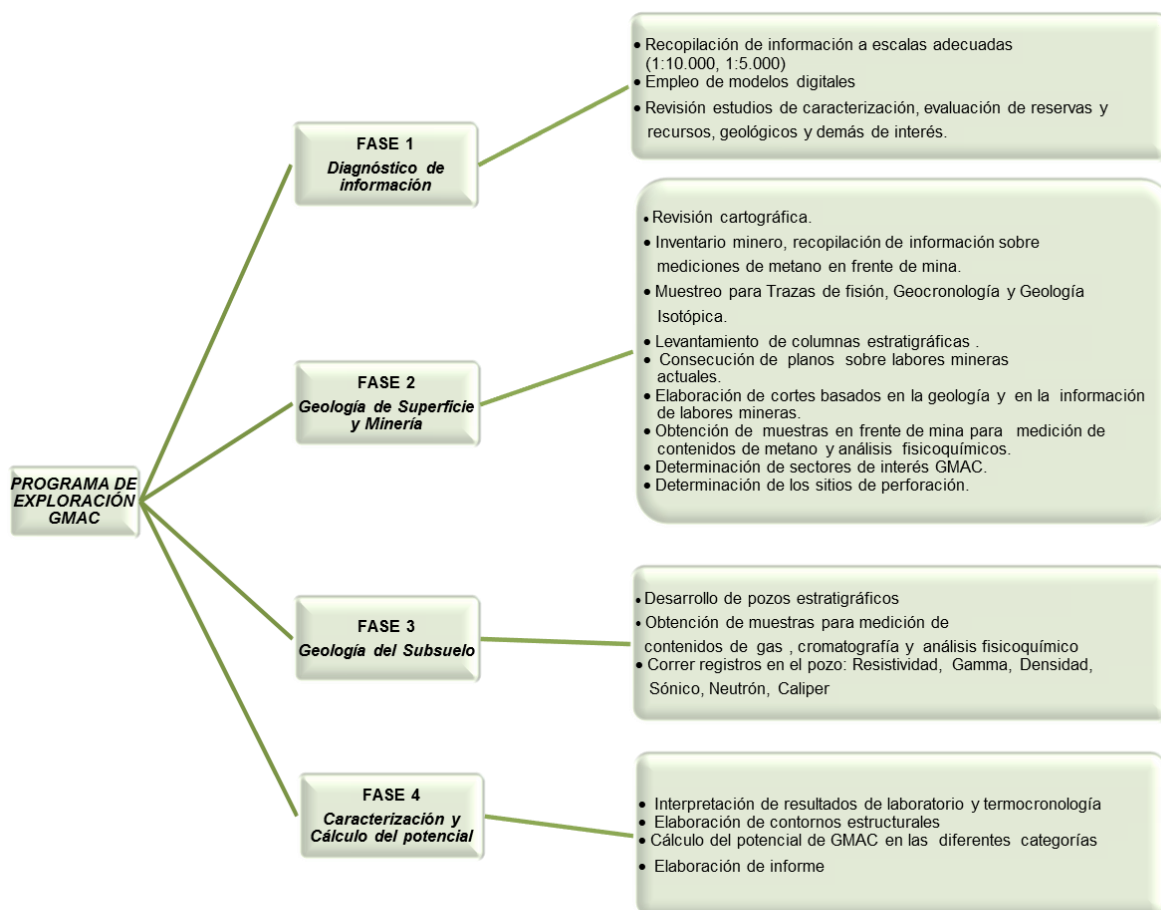
Estas actividades se enfocaron en la realización de perforaciones para obtener muestras representativas de carbón para medición de contenidos de gas metano. A partir de la información obtenida, se establecieron rangos de contenidos de Metano en las diferentes capas de carbón que cortaron las perforaciones y se identificaron las que mayores volúmenes poseían, con lo cual se realizó una estimación del potencial de este recurso en un sector del área de estudio, elaborando para ello una metodología de trabajo acorde a las características del mismo.

Las perforaciones realizadas correspondieron a 1100m de perforación direccionada en diámetro HTW con recuperación de núcleo, en donde se llevó a cabo la toma de registros eléctricos y de Temperatura.

De esta manera, se pretende, seguir aportando herramientas técnicas al sector minero y en general a los interesados en el tema, en procura de mejorar los trabajos de planificación y seguridad minera y continuar con el desarrollo del conocimiento sobre la existencia del gas metano en los mantos de carbón, en especial sobre su generación, almacenamiento y comportamiento a partir de trabajos de exploración orientados en las principales zonas carboníferas del país.

## 1. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto, se tiene en cuenta la metodología propuesta por Mariño, 2010, la cual se ha venido ajustando a partir de la experiencia y los resultados obtenidos en los estudios realizados. Las fases de trabajo expuestas a continuación están conformadas por todas las actividades adelantadas para evaluar de forma preliminar el potencial de GMAC que pueda tener un sector de interés, estas corresponden a: Diagnóstico de la información, Geología de Superficie y minería, Geología del Subsuelo, Caracterización y Cálculo del potencial (Ver Figura 1).



**Figura 1.** Fases en el desarrollo de un proyecto de Gas Metano asociado al carbón Fuente: Modificado de Mariño, 2010.

De esta manera, en el proyecto piloto adelantado, se desarrollaron las Fases que corresponden a la etapa de exploración en un proyecto de Gas Metano asociado al carbón, las cuales parten del análisis adelantado a las características geológicas de las diferentes zonas carboníferas del país, identificando así las que presentan mayor favorabilidad para adelantar estudios de investigación desde el punto de vista de estudios adelantados, escalas de trabajo adecuadas, desarrollo minero. Estas Fases se describen a continuación:

#### Fase I Diagnóstico de información

Recopilación de información. Se tomó como referencia el estudio: Recursos Carboníferos Área Úmbita – Laguna de Tota en Boyacá (Ingeominas, 2008), igualmente la información contenida en los estudios sobre la geología de las Planchas 191\_Tunja y 210\_Guateque, revisión de información de carácter ambiental para determinación del polígono de trabajo, análisis de información títulos y solicitudes mineras en el área de interés.

#### Fase II. Geología de superficie e información minera

En esta fase se desarrollaron las siguientes actividades:

1. Sobre las áreas de interés, se realizó la recopilación y corrección de información geológica y minera a escalas 1:25.000 y 1:100.000.
2. Levantamiento geológico del área de estudio a escala 1:25.000 que incluyó entre otros, definición de contactos, determinación de estructuras geológicas; dichas actividades tuvieron especial énfasis en la Formación portadora de los carbones (Formación Guaduas).
3. Muestreo para análisis de trazas de fisión y técnicas complementarias en geocronología y geología isotópica. A través de las cuales se realizan dataciones e interpretaciones de los eventos térmicos que afectaron las rocas pertenecientes a la secuencia estratigráficas definida en la estructura de interés en la zona de estudio, (ver capítulo Termocronología y Geología Isotópica).
4. Elaboración de columnas estratigráficas en los sectores de interés donde se adelantarán las perforaciones para mediciones de contenidos de gas metano.
5. Realización de cortes geológicos soportados con información obtenida en superficie, labores mineras actuales y perforaciones.
6. Determinación de sectores con mejores expectativas, evaluación de parámetros para la definición de sitios de perforación: vías de acceso, cobertera, rango del carbón, reportes de mediciones de gases en las minas y de accidentalidad, suministro de agua.

7. Localización de los pozos sobre la base de consideraciones geológicas, estructurales y técnicas.

#### Fase III. Geología del subsuelo

- Conlleva la ejecución de perforaciones, con el fin de precisar estructuras, la ubicación y características de los mantos y de la litología en general de las áreas de interés a través de la obtención de las muestras y corazones sobre los que se determinará el contenido de gas, la composición del mismo y se realizará la descripción de los mismos. Esta información se ve complementada con la realización de Registros eléctricos y de Temperatura, que permiten corroborar la presencia de los diferentes materiales y sus características físicas.

#### Fase IV. Laboratorio. Caracterización de carbones, mediciones de contenidos de gas metano, Cromatografía, Huellas de Fisión

- De la zona de estudio, se seleccionaron muestras representativas de los carbones tanto en frentes de mina como en las perforaciones con el fin de caracterizarlos desde el punto de vista fisicoquímico, petrográfico y de cromatografía. Se realizan análisis como:

- Caracterización Básica: Análisis próximo ampliado, Análisis elemental, Formas de Azufre, Índice de Molienda, Índice de Hinchamiento, Humedad de Equilibrio, Gravedad Especifica Verdadera, Fusibilidad de Cenizas; Análisis Químico de Cenizas, Análisis petrográfico (Preparación de probeta, reflectancia de vitrinita y composición maceral); Análisis elemental, determinación de Carbono, Hidrógeno, Nitrógeno, Determinación de Plastometría; Elementos menores.
- Medición de contenidos de gas metano. Determinación de gas absorbido, Residual y gas total.
- Análisis de cromatografía
- Preparación de muestras para Huellas de Fisión, Isótopos Estables

- Procesamiento de información, clasificación de carbones

#### Fase IV. Cálculo del potencial e Informe Final

- Se realiza el cálculo de Recursos y Reservas, a partir de la elaboración de mapas de contornos estructurales de acuerdo con los parámetros establecidos por el Sistema de Clasificación ECOCARBON 1995, El Servicio Geológico de Los Estados Unidos en (Wood et al, 2003), y de acuerdo al análisis realizado para la exploración de este tipo de recurso que incluyó información de labores mineras y las normatividad sobre Exploración y Explotación de Gas Metano Asociado al Carbón por parte del Ministerio de Minas y Energía (Resolución 90341 del 27 de marzo de 2014).

## 2. EXPLORACIÓN DE GMAC

En el desarrollo del estudio de exploración de GMAC, se adelantaron varias etapas que permitieron caracterizar el área de estudio, con el fin de lograr el entendimiento sobre la misma, facilitando la toma de decisiones de tipo técnico para lograr los objetivos propuestos.

### 2.1 GENERALIDADES

El conocimiento sobre el entorno del área de estudio, conllevó, la descripción de algunos aspectos generales de la zona, los cuales se refieren a: localización, vías de comunicación, clima, vegetación, hidrografía, hidrogeología, población, economía. Así mismo se realiza la descripción de las unidades geológicas identificadas, de los diferentes rasgos estructurales que caracterizan la zona y de la información minera obtenida.

Analizados todas estas variables, se procedió a determinar sectores de interés en donde se adelantaron las perforaciones que permitieron llevar a cabo las mediciones de contenidos de gas metano en la formación portadora de los mismos, la formación Guaduas (k6e1g).

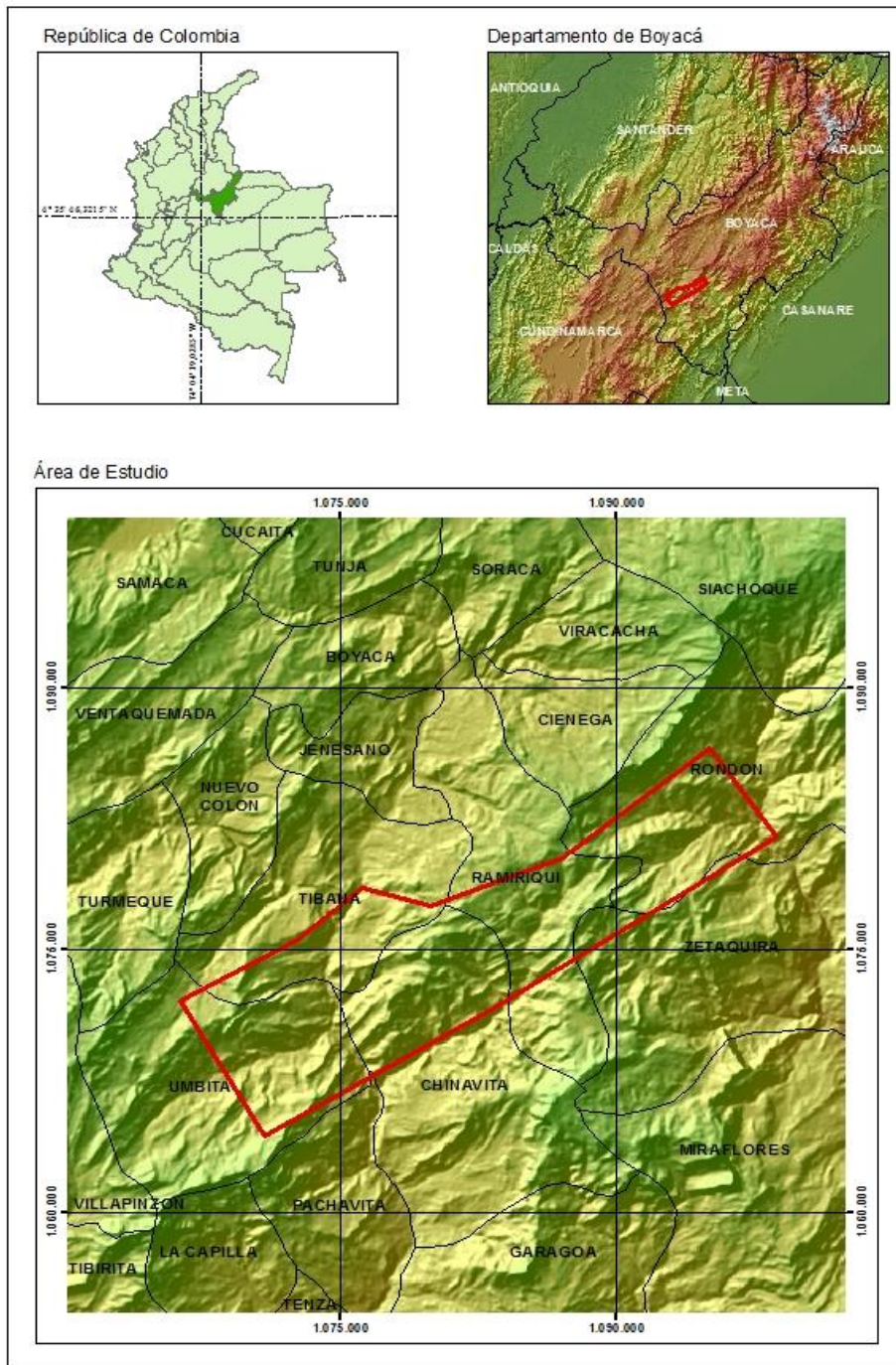
#### 2.1.1 Localización y extensión del área de estudio

El área de estudio corresponde al área carbonífera 807 denominada Úmbita - Laguna de Tota que forma parte de la zona carbonífera 8 Boyacá (Ingeominas, 2004), localizada en la cordillera oriental, al sur de la ciudad de Tunja. Para el presente trabajo se seleccionó un área de 200 Km<sup>2</sup> que comprende los municipios de Úmbita, Tibaná, Chinavita, Pachavita, Ramiriquí, Zetaquirá, Rondón en el departamento de Boyacá (Ver Figura 2), enmarcada dentro de las siguientes coordenadas (Ver Tabla1).

**Tabla 1.** Coordenadas área de estudio Úmbita – Rondón.

PUNTO	NORTE	ESTE
1	1071778,00	1066752,00
2	1075280,00	1072994,00
3	1078293,00	1076618,00
4	1077269,00	1080334,00
5	1079961,00	1087496,00
6	1086238,00	1095519,00
7	1081200,00	1099088,00
8	1071297,00	1083577,00
9	1064101,00	1071272,00
10	1068544,00	1068656,00

Esta área se encuentra delimitada dentro de las planchas del I.G.A.C. a escala 1:25.000 correspondientes a: 210-I-A, 210-I-B, 210-1-C, 210-I-D, 191-III-D, 191-IV-C, 210-II-A y las planchas geológicas a escala 1:100.000, 191\_Tunja y 210\_Guateque.



**Figura 2.** Localización área de estudio.

En el área de estudio general (que cubre 200 Km<sup>2</sup>), se establecieron dos sectores de interés para adelantar la exploración de GMAC y proyectar las perforaciones, hacia el sur de la zona de estudio, con las cuales se obtuvieron muestras de carbón para realizar mediciones de contenidos de gas metano; estos sectores se denominaron: Úmbita - Tibaná (Ver Tabla 2, Figura 2) y Úmbita – Chinavita, en el primero de ellos no se pudo adelantar trabajos de exploración debido a factores de tipo social, en el segundo se realizaron los trabajos de perforación (Ver Tabla 3, Figura 2), con las siguientes coordenadas:

**Tabla 2.** Coordenadas Sector GMAC Úmbita – Tibaná.

PUNTO	NORTE	ESTE
1	1071778,00	1066752,00
2	1075282,00	1073016,00
3	1076683,00	1074681,00
4	1078293,00	1076619,00
5	1077894,00	1078066,00
6	1074134,00	1078612,00
7	1071068,00	1073151,00
8	1071888,00	1072616,00
9	1069329,00	1068191,00

**Tabla 3.** Coordenadas Sector GMAC Úmbita - Chinavita.

PUNTO	NORTE	ESTE
1	1069329,00	1068191,00
2	1071888,00	1072616,00
3	1071068,00	1073151,00
4	1074134,00	1078611,00
5	1070121,00	1081565,00
6	1064101,00	1071272,00

### 2.1.2 Vías de comunicación

Para acceder a la zona de estudio en general, se cuenta con vías como las carreteras: Bogotá – Villapinzón - Úmbita; Bogotá – Tierra Negra –Jenesano – Úmbita, Tunja - Tibaná – Úmbita , Tunja - Tibaná – Chinavita, vía Tibaná -



Turmequé - Bogotá vía Tibaná - Jenesano - Tierra Negra - Bogotá vía Tibaná - Tunja vía. Igualmente, entre los municipios del área de interés existen vías intermunicipales para acceder a los puntos de perforación, que se describirán en el numeral 3.3 Sectores evaluados para exploración de GMAC.

### 2.1.3 Clima y Vegetación

En general los municipios que conforman la zona de estudio, poseen temperaturas medias entre 15 a 20 °C, con alturas que oscilan entre 1500 m.s.n.m. a 3050 m.s.n.m, definiéndose un relieve de tipo plano a montañoso, con características laderas empinadas.

El clima, corresponde a zonas climáticas entre frías a cálidas. Se presenta un comportamiento bimodal de la precipitación, con dos periodos lluviosos, el primer periodo lluvioso se presenta en los meses de marzo, abril y mayo; el segundo periodo lluvioso corresponde a los meses de octubre y noviembre. Los meses secos corresponden a Enero y Febrero, Junio a Septiembre y Diciembre los más lluviosos.

En general en la zona de estudio, se han registrado valores de precipitación media anual entre 600 a 3500 mm.

Existe vegetación de páramos, bosque húmedo montano, premontano, especies introducidas como eucaliptos y pinos, especies nativas, medicinales, especies con valor artesanal y especies comestibles (aves nativas).

### 2.1.4 Hidrografía

A continuación se hace referencia a las diferentes fuentes hídricas presentes en cada municipio que conforma la zona de estudio y las cuencas, subcuencas y microcuencas que conforman.

En el municipio Úmbita<sup>1</sup>, se destaca la cuenca del Río Garagoa y las microcuencas del río el Bosque, el Río Icabuco, Quebradas: Caibo, Colorada, Tásvita, Supaneca, Raboemacho, Barrosa.

Hacia Chinavita<sup>2</sup>, las fuentes hídricas presentes hacen parte de las cuencas: Ríos Garagoa, Fusavita, Jenesano, con las quebradas La Hundida, La Quenquenera,

---

<sup>1</sup>[http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/02-sistema%20fisico-%20Úmbita%20\(82%20pag%20-%201140%20kb\).pdf](http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/02-sistema%20fisico-%20Úmbita%20(82%20pag%20-%201140%20kb).pdf). Esquema de Ordenamiento territorial Úmbita .

Quinchatoque, San Antonio, Tres quebradas o Perlasía, Estoraque, Los Quinchos, El Oso, La Miel, El Cementerio, Siaguiza, Sicha, La Senda, entre otros.

En Tibaná<sup>3</sup>, se identifican las subcuencas del Río Tibaná, en ella se une el Río Turmequé para formar la parte alta de la cuenca del Río Garagoa en el sitio denominado Puente de Las Juntas; la abastece las microcuencas de las quebradas Juana Ruiz, La Sucia, Ruche y Chiguata, la cañada La Cabaña. La Subcuenca del Río Turmequé, recibe como afluentes importantes los ríos Muincha y el Icabrico y las Quebradas Basa, Agua Caliente y la cañada La Campana; la Subcuenca del Río Garagoa, que se origina en la confluencia de los ríos Turmequé y Tibaná, cuyos principales tributarios son las quebradas Quinchatoque, La Barrosa, Cardonal, la Colorada, La Laja y Los Lara. La Subcuenca del Río Fusavita, el Río Fusavita sirve como límite natural municipal entre Tibaná y Chinavita. Sus principales afluentes son las quebradas La Tendida, Hundida y Tasajeras.

En el municipio de Ramiriquí<sup>4</sup>, se encuentra el río Fusavita, tributario del Río Garagoa, sobresale el aporte hídrico proveniente del páramo de Bijagual, Loma Azul y Mama Pacha, que comparten los municipios de Zetaquíra, Chinavita y Ciénega. Dentro de las cuencas presentes en el municipio se identifican la Cuenca del río Fusavita, con las quebradas que la alimentan como: Ortigal, Mesetas, Moncacia, Granizal, Los Loros, Salamanca, el Quincho, Uval, Chorro aguardiente, Potreritos y espartal. La Microcuenca del Uval, cuyo afluente es la quebrada La Miel. La Microcuenca de la Quebrada San Antonio, con un pequeño afluente, la Quebrada La Colorada. La Microcuenca del río Guayas, su principal afluente es la quebrada el Rosal, la cual nace cerca de los límites con Soracá. La Microcuenca de la Quebrada La Miel que aporta sus aguas al río Garagoa.

En Zetaquíra<sup>5</sup>, sobresale la microcuenca del Río Mueche, que recibe aguas de sus principales afluentes como las quebradas San Antonio, Las Chochas, Las Lajas, La Robada, Conventos, Montonera, Gaitán, La Volcanera, Los Micos, El Ramo y las Máquinas. La microcuenca del Río La Rusa, cuyo principal tributario es la quebrada La Colorada y las quebradas Calle Real, Montejos, La Osa, Portachuelo y Congoy. La microcuenca de La Quebrada La Colorada, de donde se obtiene el

---

<sup>2</sup>[http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/f%3%ADsico\\_biotico\\_china\\_vita\(55\\_pag\\_440\\_kb\).pdf](http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/f%3%ADsico_biotico_china_vita(55_pag_440_kb).pdf). Esquema de Ordenamiento Territorial municipio de Chinavita

<sup>3</sup>[http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/fisico-biotico\\_tiban%C3%A1\\_\(86\\_pag\\_302\\_kb\).pdf](http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/fisico-biotico_tiban%C3%A1_(86_pag_302_kb).pdf). Esquema de Ordenamiento Territorial municipio de Tibaná.

<sup>4</sup>[http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/fisico\\_biotico\\_ramiriqu%C3%AD%2866\\_pag\\_2420\\_kb%29.pdf](http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/fisico_biotico_ramiriqu%C3%AD%2866_pag_2420_kb%29.pdf). Esquema de Ordenamiento Territorial municipio de Ramiriquí.

<sup>5</sup>[http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/fisico\\_biotico\\_zetaquira\(15\\_pag\\_311\\_kb\).pdf](http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/fisico_biotico_zetaquira(15_pag_311_kb).pdf). Esquema de Ordenamiento Territorial municipio de Zetaquíra.

caudal para el acueducto urbano, sus afluentes son: la quebrada Amarilla, La Plata, la Esquina, El Encenillo, Las Carboneras, Puente Tabla y La Palmera. La microcuenca de La Calderona, nace en el Páramo de Juracambita y se forma con la quebrada Porras.

En el sector norte de la zona de interés, se localiza el municipio de Rondón<sup>6</sup>, caracterizado por pertenecer en buena parte a la zona del páramo de Bijagual que aporta en el desarrollo de la cuenca del Río Mueche, el cual es alimentado por 3 subcuencas y 22 microcuencas.

La Cuenca del Río Mueche, nace en los límites con Siachoque, sus afluentes son las Quebradas Santa Rosa, La Pabellona, Agua Blanca, Rosariera, los Volcanes, Renanica, La Porquera, Quebrada Honda, No Pase, La Potrerana, La Peña, El Espinal, El Uvo y el Río Grande. La subcuenca Quebrada La Rosariera, nace en la parte alta del municipio, en límites con el municipio de Pesca, es afluente del Río Mueche y recibe las aguas de las quebradas: El Oso, El Muerto y Jaraquita. La subcuenca Quebrada Azul, nace en la parte alta del peñón de la Galera, es afluente de la quebrada Honda y recibe el agua de las quebradas: El Encenillo, El Cerezo, Los Polos, y Los Laureles. La subcuenca Quebrada Honda, que nace en las cimas de Caguata, recibe agua de las quebradas: Azul, El Jordán, La Barrosa y Quiña.

### 2.1.5 Hidrogeología

La presencia de cuerpos de agua subterráneos, como los acuíferos, en una zona de exploración de GMAC, incide en la retención de este recurso al estar confinado por el agua, la liberación de la presión confinante permite a su vez el flujo del mismo para su aprovechamiento. El estudio del comportamiento geológico de los acuíferos presentes por encima o por debajo de las capas de carbón, el conocimiento de los sitios de recarga, entre otros, permite definir mejor el planeamiento de un proyecto de GMAC, ya que dependiendo de esto, se debe manejar en un principio grandes volúmenes de agua antes de obtener los volúmenes de gas esperados.

A continuación se mencionan de forma general algunos aspectos hidrogeológicos de la zona de estudio, ya que no se cuenta con estudios detallados que permitan precisar el modelo hidrogeológico característico en la misma. Desde el punto de vista Hidrogeológico, la zona de estudio pertenece a la Provincia Hidrogeológica Andina (Ingeominas, 2003- Unesco, 1996), en donde los valles y las mesetas son los grandes centros de almacenamiento de agua tanto superficial como

---

<sup>6</sup><http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/rond%C3%B3nboyac%C3%A1pd20122015.pdf>. Esquema de Ordenamiento Territorial municipio de Rondón.

subterránea y en donde se han identificado las siguientes unidades hidrogeológicas presentes en la zona de estudio:

La Formación Socha Inferior (E1si). Corresponde a un acuífero de extensión Regional, confinado, continuo (Sistema Acuífero Paleógeno), con una capacidad específica Baja (0.1-0.5 l/s/m) compuesto por areniscas cuarzosas de grano medio a grueso y conglomeráticas y delgadas capas de arcillolitas.

Las zonas de recarga están conformadas por agua lluvia y en menor proporción por las corrientes superficiales que discurren por las pendientes empinadas que conforman estos materiales.

La formación Guaduas, unidad portadora de carbones, se constituye en un acuífero confinante del Cretácico, clasificada como un acuitardo, teniendo en cuenta su composición litológica, de arcillolitas no permeables, con solo algunos niveles de arenisca, que presentan cierto grado de permeabilidad.

En el caso de las formaciones Picacho y Socha Inferior, se tienen unidades hidrogeológicas correspondientes a acuíferos. Los acuíferos libres corresponden a depósitos cuaternarios. Los Acuíferos corresponden a las formaciones Concentración y Socha Superior.

De acuerdo a lo anteriormente citado, se tiene que las condiciones sobre la influencia del agua subterránea en cuanto a la retención del gas metano pueden ser favorables en la zona de estudio, ya que se cuenta con unidades suprayacentes correspondientes a acuíferos como la Formación Socha Inferior que podría estar facilitando la retención del gas en la formación portadora de los carbones, lo cual se constituye en factor de interés en el desarrollo del proyecto.

Este aspecto se evidencia especialmente hacia la zona donde se ubicó el Pozo Chinavita-1, en cuyo caso la inclinación de las capas es muy alta casi 90° y en algunos casos hay inversión, facilitando el aporte de agua lluvia y de corrientes superficiales hacia los acuíferos ubicados en la estructura.

### **2.1.6 Población**

La zona de estudio, está ubicada en el extremo suroccidental del departamento de Boyacá, comprende los municipios de: Úmbita, Chinavita, Tibaná, Zetaquirá, Rondón. Los municipios de Úmbita, Rondón, Tibaná pertenecen a la provincia de Márquez.

De acuerdo al Censo Dane, 2005, la población del Municipio de Úmbita corresponde a 5.102 habitantes, la de Chinavita 10.371 y la de Tibaná a 9.812, Zetaquirá, 5171, Rondón 3.011 habitantes.

La economía en la zona, se basa fundamentalmente en el sector agropecuario, con productos como: papa maíz, arveja, frijol, habas, arracacha, ibias, arveja, frijol, rubas, nabos, yuca, caña de azúcar, tomate, aguacate, plátano, café, cítricos, guayaba, yuca, arracacha, aguacate, guama, ciruela, pera, manzana, durazno, mora, tomate de árbol, curuba, uchuva, entre otros. De otro lado también se cultivan plantas medicinales como hierba buena, menta, manzanilla, llantén, ortiga, entre otras.

Otro renglón importante en la economía, es la ganadería, en la cual se destaca la cría de ganado cebú y criollo, cruces entre normando y cebú, la cría de ganado porcino, con diferentes razas como landras y pietran, al igual que la cría de aves de corral.

Se destaca al igual, los derivados de la leche como queso, mantequilla y cuajada. De igual forma existe la explotación de madera con fines ebanísticos. Se destaca las artesanías a nivel comercial, como canastos en chusque y gaita.

Por otro lado los habitantes obtienen ingresos por las explotaciones mineras de arena, conglomerados, chircales y carbón.

## 2.2 GEOLOGÍA

En el área de estudio, afloran rocas de origen sedimentario con edades del Cretácico y Paleógeno, como las formaciones Fόμεque, Une, Chipaque, Arenisca Dura, Plaeners, Arenisca labor y Tierna, Guaduas, Socha Inferior, Socha Superior, Picacho, Concentración y depósitos coluviales.

Como referencia de la cartografía presentada para el área de interés, se trabajó con base en la geología de la plancha 210 Guateque (Ingeominas, 2010) y 191 Tunja (Ingeominas, 1998), a escala 1:100.000 así mismo de la cartografía del estudio Recursos Carboníferos Área Úmbita – Laguna De Tota (Ingeominas, 2008).

### 2.2.1 Estratigrafía

Las unidades litológicas presentes en el área de estudio, corresponden a rocas sedimentarias desde el Cretácico medio al Paleógeno, representadas de base a techo por las formaciones: Fόμεque (b4b6f), Une (b6k1u), Chipaque (k2k4cp), Arenisca Dura (k4k5d), Plaeners (k5p), Arenisca Labor y Tierna (k6lt), Guaduas (k6e1g), Socha inferior (E1si), Socha superior (e3e4ss), Picacho (E2p), Concentración (E2E3co) y el Cuaternario con depósitos de tipo Coluvial (Q2c), las cuales se describen a continuación desde la más antigua a la más reciente.

#### 2.2.1.1 Formación Fόμεque (b4b6f)

El nombre de formación Fόμεque fue dado por Hubach, E. (1957b, p.48), para designar una serie de “esquistos, caliza cristalina y areniscas cuarcíticas”, su localidad tipo fue establecida por su autor en la carretera Bogotá – Villavicencio, situando sus límites inferior y superior en el tope de la arenisca de Cáqueza y la base de la formación Une, respectivamente.

La edad de la formación Fόμεque fue establecida por Hubach, E. (en Kehrer, 1933), como del Barremiano Medio hasta el Aptiano superior; Hubach E. (1957a, p.104) considera que la parte superior de la formación abarca el Albiano inferior, opinión que es sustentada por Burgl, H. (1961a).

#### 2.2.1.2 Formación Une (b6k1u)

El nombre de formación Une, fue establecido por Hubach, E. (1957a, p.47), para representar un conjunto de areniscas que afloran en la carretera Bogotá – Villavicencio, entre las poblaciones de Chipaque y Cáqueza.

En el área de estudio, se presentan arenitas de grano muy fino a fino, color blanco, amarillo claro, amarillo oscuro, rojizo en capas delgadas a gruesas, presencia de glauconita y algunos niveles de arcillolita de color gris oscuro a gris claro, hacia la parte media de la zona de estudio, vía Chinavita-Ramiriquí-Zetaquirá, se distinguen de acuerdo a lo mencionado en la memoria de la plancha 210 Guateque (Ingeominas, 2010) dos conjuntos litológicos denominados en este trabajo b6k1u1 y b6k1u2 con espesores entre 50 a 60 m.

La edad de la formación ha sido considerada por Burgl, H. (1957) y Campbell, C. (1962) como Albiano – Cenomaniano.

#### 2.2.1.3 Formación Chipaque (k2k4cp)

El término Chipaque fue empleado por primera vez por Hubach (1931b) bajo la denominación del “conjunto Chipaque” y posteriormente como Formación Chipaque, según su autor el techo de la formación Chipaque lo forma la caliza de Chipaque.

En el área de estudio afloran limolitas silíceas de color gris oscuro con láminas de arenita de grano fino y arenita de grano fino, de color gris, en capas delgadas con niveles de arenita de grano muy fino, de color gris oscuro en capas delgadas a medias, laminación plano paralelo discontinua y arcillolitas de color gris oscuro, laminación plano paralelo discontinua a laminación plano paralelo continua (ver Figura 3).

El espesor medido en el área de estudio para esta formación es de 600 m. La formación Chipaque ha sido considerada por Hubach, E. (1957), Burgl, H. (1959), Etayo, F (1964) y McLaughlin, D. y Arce M. (1969) con un rango de edad que va desde el Cenomaniano Superior hasta el Coniaciano.



**Figura 3.** Replegamientos en la Formación Chipaque, río Mueche, municipio de Rondón.

#### 2.2.1.4 Formación Arenisca Dura (k4k5d)

Nombre propuesto formalmente por Pérez & Salazar (1978), para la unidad litoestratigráfica que reposa concordante y transicionalmente sobre una sucesión monótona de lutitas físis y grises de la Formación Chipaque y que es suprayacida por una secuencia de arcillolitas, arcillolitas silíceas y liditas de la Formación Plaeners. La sección tipo se localiza en el cerro El Cable (oriente de Bogotá), con un espesor de 449 m.

El espesor medido en el área de estudio para esta formación es de 150 m. Se observan arenitas de grano muy fino, color gris, blanco a amarillo claro en capas delgadas a masivas, con presencia de micas y estratificación plano paralela continua en alternancia con limolitas arcillosas con intercalación de arenita de grano fino color blanco (ver Figura 4).

Al no contar con fósiles para determinar la edad de la Formación Arenisca Dura, ésta se establece por posición estratigráfica y correlaciones; Montoya & Reyes (2003) le asignan una edad Campaniano Inferior.

Sin embargo, para esta formación varios autores han determinado un rango más amplio de edad, en el lado oriental de la Sabana de Bogotá, con la fauna citada por Hubach (1958 en Etayo, 1964), le asigna un intervalo Santoniano – Campaniano. Para el occidente (Tabio, La Pradera - Subachoque), Etayo (1964), menciona fauna localizada por debajo de la Dura y que pertenece al Coniaciano; por lo tanto la Arenisca Dura sería, para este autor Santoniano - Campaniano.



**Figura 4.** Secuencia de arenitas de grano muy fino en capas delgadas a gruesas características de la Formación Arenisca Dura. Quebrada Azul, municipio de Rondón.

#### 2.2.1.5 Formación Plaeners (k5p)

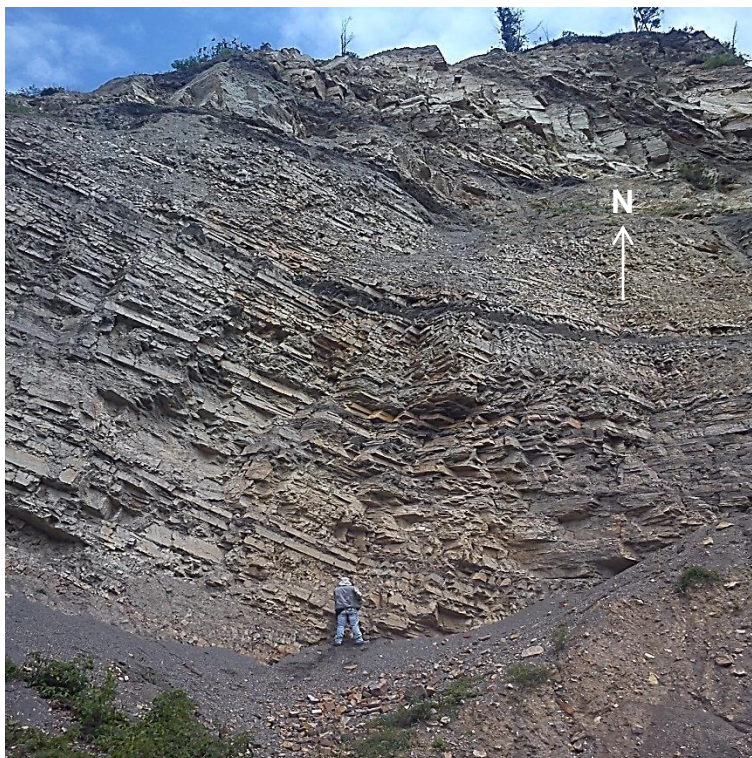
Nombre propuesto formalmente por Pérez & Salazar (1978) para la unidad litoestratigráfica que reposa concordantemente sobre la Formación Arenisca Dura e infrayace a la Formación Arenisca Labor-Tierna; en la sección tipo presenta un espesor de 73 m, está representada por arcillolitas, liditas, limolitas y en menor proporción areniscas de grano muy fino. En general presenta una morfología suave y genera una hondonada debido a su litología fina que contrasta con las pendientes abruptas de las unidades geológicas que la circundan.

El espesor medido en el área de estudio para esta formación es de 150 m. Se observan arenitas de grano muy fino, color amarillo claro, gris claro, amarillo



oscuro en capas medias a masivas con marcas de corriente, moteado bajo; porcelanitas de color gris, arcillolitas de color beige y limolitas de color gris (ver Figura 5).

La edad de la Formación Plaeners según Follmi et al. (1992 en Vergara y Rodríguez, 1997), con base en amonitas de la región de Tausa, es Campaniano Superior a Maastrichtiano temprano.



**Figura 5.** Secuencia de arenitas, porcelanitas y arcillolitas de color gris de la Formación Plaeners en el recorrido efectuado por la vía Tibaná - Chinavita municipio de Tibaná. Formación Arenisca Labor - Tierna (k6lt).

#### 2.2.1.6 Formación Arenisca Labor - Tierna (k6lt)

Renzoni, G. (1968) utiliza este término para referirse conjuntamente a las Formaciones Arenisca de Labor y Arenisca Tierna, miembros del Grupo Guadalupe. Pérez y Salazar (1978), separa la Formación Labor y Tierna en Formación Arenisca de Labor y Formación Arenisca Tierna. Ulloa y Rodríguez (1991), no separan claramente los miembros superiores de la Formación Guadalupe.

Montoya y Reyes (2005), de acuerdo a la similitud litológica y expresión morfológica emplean en una sola unidad a las dos formaciones Arenisca Labor y Arenisca Tierna y la denominan Arenisca de Labor-Tierna.

De acuerdo a Montoya y Reyes (2005), se ha registrado para esta formación un espesor de 123 m en cercanías de Cucunubá.

El espesor medido en el área de estudio para esta formación es de 200 m. Se observan arenitas de grano fino a grueso, color blanco, gris a amarillo claro, en capas delgadas a medias con intercalaciones de arcillolita color beige, gris con laminación plano paralela discontinua, limolitas arcillosas, color gris con láminas de arenita, color blanco, grano fino, hacia la vía Úmbita -Chinavita, se observan icnofósiles hacia la base de la formación (ver Figura 6).

Etayo (1964) asigna la edad como Maastrichtiano medio. (Pérez y Salazar, 1978), como Maastrichtiano Inferior. Martínez (1989 en Sarmiento, 1992) reporta la zona bentónica *Siphogenerinoides bramlettei*, a la que considera de edad Maastrichtiano tardío. (Fúquen y Osorno, 2005) Sugieren como edad para la Formación Arenisca Tierna el Maastrichtiano medio.



**Figura 6.** Arenitas de grano fino en capas delgadas a medias que infrayacen la formación Guaduas. En la parte superior derecha se observa detalle de los icnofósiles identificados hacia la base de la formación. Aguas abajo Río Garagoa, municipio de Chinavita.

### 2.2.1.7 Formación Guaduas (k6e1g)

La Formación Guaduas fue descrita originalmente por Hettner (1892, en De Porta, 1974) para referirse a una secuencia de arcillolitas varicoloreadas, areniscas, limolitas y mantos de carbón. Hubach (1931), denomina piso Guaduas a la secuencia que suprayace sobre el Grupo Guadalupe e infrayace el Horizonte del Cacho o su correlacionable Socha inferior. Alvarado y Sarmiento (1944) denominaron Formación Guaduas al conjunto de estratos de areniscas y arcillolitas que contienen mantos de carbón explotables.

En el área de estudio se registra un espesor para esta formación de 510 m, los cuales están constituidos por arcillolitas de color gris a beige, algunas con capas delgadas de arenita grano fino, color gris a blanco, limolitas de color gris con presencia de óxidos; capas delgadas de niveles concrecionales de limolitas color café oscuro a rojizo, se identificaron dos niveles de arenitas de grano muy fino a medio, color gris claro, blanco, amarillo oscuro, amarillo claro, moteado bajo, laminación tenue a plano paralela continua, dispuestos en capas delgadas a medias con presencia de micas, una de ellas limitando el miembro estéril de la formación y la otra hacia techo definiendo el paquete de carbones de la parte media de la formación, con espesores hasta de 8.0m. En la parte media y superior de la formación, se identifican capas de carbón, encontrándose hacia la parte media 13 mantos con espesores entre 0.40m y 3.0 m (ver Figuras 7, 8).

Análisis palinológicos realizados por Van der Hammen (1957, p.197) indican que la formación Guaduas, en la sabana de Bogotá es del Maastrichtiano – Paleoceno, y considera que la sucesión estratigráfica denominada formación Guaduas en la región de Paz de Río, no comprende el Paleoceno, lo cual queda confirmado con el estudio palinológico de Sarmiento, en Osorno (1994), quien le asignó una edad de Maastrichtiano.



**Figura 7.** Morfología suave de la Formación Guaduas en contraste con las formaciones Arenisca Labor y Tierna (infrayace) y Socha Superior (suprayace), municipios de Chinavita y Úmbita .



**Figura 8.** Deformaciones en algunos mantos de carbón hacia el norte de la zona de estudio (Rondón) por efecto de los esfuerzos originados por las fallas evidenciadas.

### 2.2.1.8 Formación Socha Inferior (E1si)

La Formación Socha Inferior descrita por (Alvarado & Sarmiento 1944), se encuentra en el sector oriental de la Cordillera Oriental en la región de Paz de Río, departamento de Boyacá, se considera como localidad tipo la sucesión litológica aflorante en Socha Viejo, allí, el espesor de la sucesión oscila entre 100 y 150 m. De acuerdo con estos autores, "las areniscas son de grano medio, color blanco y consistencia media en su parte superior. La parte inferior del conjunto es de grano grueso y presenta zonas de grano muy grueso, hasta guijoso.

En el área de estudio se observa un espesor de 200 m; conformados por arenitas grano fino a grueso, color gris, blanco, amarillo, en capas medias a masivas, con abundante materia orgánica y restos vegetales, con intercalaciones de arcillolitas color gris claro con láminas de arenita de grano fino, color blanco, presencia de marcas corriente, laminación cruzada y plano paralela continua, su morfología se ve representada en escarpes que sobresalen topográficamente (ver Figura 9).

Van der Hammen (1957), según estudios palinológicos, indica para la formación Socha inferior, una edad paleocena temprana, intervalo de tiempo en el cual se considera ocurrió la acumulación de la parte superior de la formación Guaduas y, probablemente, la parte inferior de la formación Socha inferior.



**Figura 9.** Escarpe que conforma las arenitas de grano fino a conglomeráticas de la formación Socha Inferior (E1si). Loma El Coque, Vereda Juncal, municipio de Úmbita.

### 2.2.1.9 Formación Socha Superior (e3e4ss)

El nombre Formación Socha Superior fue creado por Alvarado & Sarmiento R. (1944) para designar una sucesión de estratos de arcillas de colores gris, amarillo y verdoso, con bancos gruesos de arenisca y localmente con mantos de lignito y carbón en su parte media inferior. El espesor de la formación varía entre 180 y 400 m., Socha viejo es considerada como localidad tipo.

En el área de estudio se registra un espesor de 400 m. Está conformada por arcillolitas de color gris claro a violeta, presencia de diques de limolita color café oscuro a rojizo, muy meteorizado y concreciones subredondeadas con arenitas de grano muy fino a grueso, color amarillo claro, rosado, blanco con laminación plano paralela continua a discontinua, restos de materia orgánica, micas (ver Figura 10).

Van der Hammen le asigna una edad del Paleoceno medio al Paleoceno superior.



**Figura 10.** Contacto Formación Picacho-Formación Socha Superior. A la izquierda detalle de concreciones subredondeadas en la Formación Socha Superior. Vía Chinavita-Ramiriquí.

### 2.2.1.10 Formación Picacho (E2p)

El nombre de Formación Picacho fue dado por Alvarado & Sarmiento (1944) para designar un conjunto potente de areniscas que descansa sobre la formación

Socha Superior y establece su localidad tipo en el cerro Picacho 1,5 Km al noroeste de Paz de Rio. La formación está constituida por arenisca de color blanco, grano medio a grueso, en general friable que presenta zonas guijosas a través de toda la formación. El contacto superior con la formación Concentración es concordante y neto, y se marca en el techo de una sucesión de arenita de cuarzo media a gruesa.

En el área de estudio se registra un espesor de 400 m. Constituida por arenitas de grano medio a conglomerático en capas delgadas a gruesas de color gris verdoso a gris oscuro, moteado medio, limolitas de color negro, con láminas de arenita de grano fino, de color blanco (ver Figura 11).

Según Van Der Hammen (1957), en esta unidad no se han encontrado muestras con polen; sin embargo, basado en su posición estratigráfica, considera que su edad debe ser Eocena temprana, y establece su coetaneidad con las formaciones La Paz del Valle Medio del Magdalena, el Mirador de la concesión Barco y Hoyón del Valle Medio del Magdalena y la región de la sabana de Bogotá.



**Figura 11.** Escarpes característicos de la Formación Picacho, en la parte superior izquierda se observa el detalle de las arenitas de grano fino a conglomerático, con presencia de niveles de guijos de la formación. Material extraído en la zona de estudio para comercialización. Vereda Uvero, Municipio de Úmbita.

### 2.2.1.11 Formación Concentración (E2E3co)

El nombre y rango de la unidad litoestratigráfica Formación Concentración fueron dados por Alvarado & Sarmiento (1944), para designar una sucesión de arcillolitas comúnmente yesíferas y areniscas de grano fino a grueso, con estratos de hierro oolítico, que descansa sobre la formación Picacho. Su sección tipo está localizada a lo largo del río Soapaga, entre el caserío de Concentración y el puente del Uvo (carretera Santa Rosa – Paz de Río – Socha), donde presenta un espesor que oscila entre 1368 y 1554 m.

La formación Concentración aparece muchas veces formando núcleos de sinclinales, consta en general de arcillas de tintes amarillentos y azulosos con intercalaciones delgadas de arenisca de color amarillento, grano fino, arcilloso y micáceo, en bancos delgados. Como característica muy marcada se puede hablar de la presencia de mantos de hierro oolítico.

En la zona de estudio se constituye de arcillolitas varicoloreadas con láminas de arenita de grano fino, con presencia de niveles concrecionales de limolita y capas delgadas a gruesas de arenita de grano muy fino a medio, color gris claro, gris verdosa, amarillo claro a oscuro, laminación cruzada y plano paralela discontinua, con presencia de micas (ver Figura 12). Según Thomas Van Der Hammen (1958, p. 93), la edad de la formación es Eoceno medio en su parte inferior, Eoceno superior a Oligoceno inferior en la parte media y oligoceno medio en su parte superior.



**Figura 12.** Formación Concentración hacia el núcleo del Sinclinal de Úmbita , donde se aprecian algunos niveles competentes de arenitas, municipio de Tibaná.



### 2.2.1.12 Depósitos Coluviales (Q2c)

Material transportado por gravedad, deshielo o principalmente por agua, de origen local producido por la alteración de las rocas in situ presentes

## 2.2.2 Tectónica

La zona de estudio, se caracteriza por la presencia de una estructura principal como lo es el Sinclinal de Úmbita, cuyos flancos se ven afectados por la presencia de fallas de tipo transversal e inversas, presentando mayor perturbación el flanco Occidental del mismo donde se evidencia los efectos de la Falla de Soapaga, estructura de carácter regional. Los principales rasgos estructurales que modelan el área se describen a continuación:

### 2.2.2.1 Pliegues

Las principales estructuras plegadas existentes en el área de estudio, corresponden a Sinclinales y Anticlinales de tipo local y regional, dentro de los que se destacan los siguientes:

#### 2.2.2.1.1 Sinclinal de Úmbita

Pliegue ubicado a lo largo del área de trabajo, siendo la estructura principal en dicha área, presenta una orientación Suroeste – Noreste, el núcleo de este sinclinal lo conforma la formación Concentración y sus flancos están compuestos por las formaciones Chipaque, Arenisca Dura, Plaeners, Arenisca Labor y Tierna, Guaduas, Socha Inferior, Socha Superior y Picacho, de base a techo respectivamente (ver Figura 13).



**Figura 13.** Sinclinal de Úmbita , donde se aprecia hacia su eje las Formaciones Picacho y Concentración. Vía Tibaná – Úmbita .

#### 2.2.2.1.2 Anticlinal de Quincho

Pliegue ubicado en parte media inferior del área de trabajo, con una orientación Suroeste – Noreste, observándose en su núcleo la formación Une, y en sus flancos las formaciones Chipaque, Arenisca Dura, Plaeners, Arenisca Labor y Tierna, Guaduas, Socha Inferior y Socha Superior, de base a techo respectivamente.

#### 2.2.2.1.3 Sinclinal de Guayabal

Pliegue ubicado en parte media inferior del área de trabajo, con una orientación Suroeste – Noreste, observándose en su núcleo la formación Socha Superior y siendo sus flancos conformados por las formaciones Socha Inferior, Guaduas y el grupo Guadalupe.

#### 2.2.2.1.4 Anticlinal de Rondón

Pliegue con una orientación Suroeste - Noreste, en cercanía al municipio de Rondón, afectado hacia la parte Noreste del polígono de estudio por la falla Quebrada Azul, sufriendo un desplazamiento de aproximadamente 200m.

#### 2.2.2.1.5 Sinclinal de Ricaurte

Pliegue con una orientación Suroeste - Noreste, en cercanía al municipio de Rondón, afectado hacia la parte Noreste del polígono de estudio por la falla Quebrada Azul, sufriendo un desplazamiento de aproximadamente 110 m.

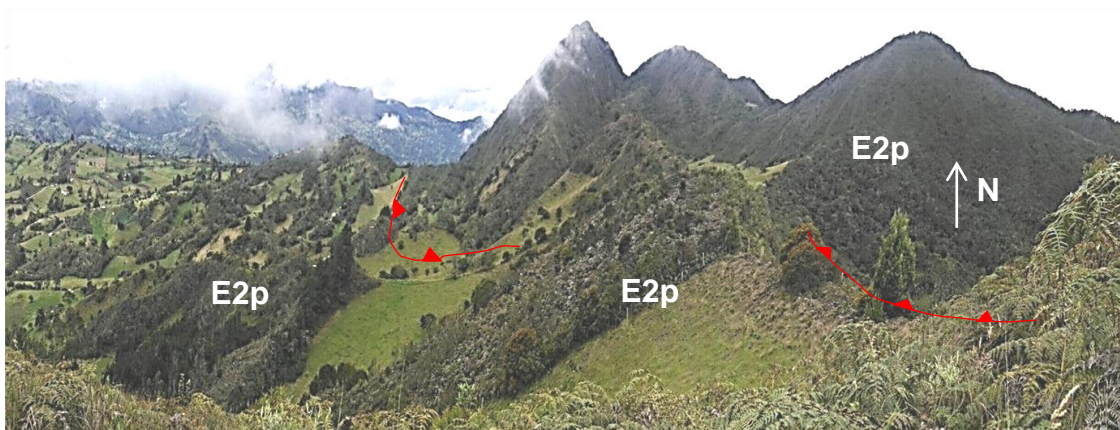
### 2.2.2.2 Fallas

La zona de estudio, se caracteriza por una fuerte actividad tectónica, principalmente hacia la parte media y norte del polígono de estudio, originada por la presencia de fallas de diferente tipo como de cabalgamiento y de rumbo, presentándose a continuación las principales:

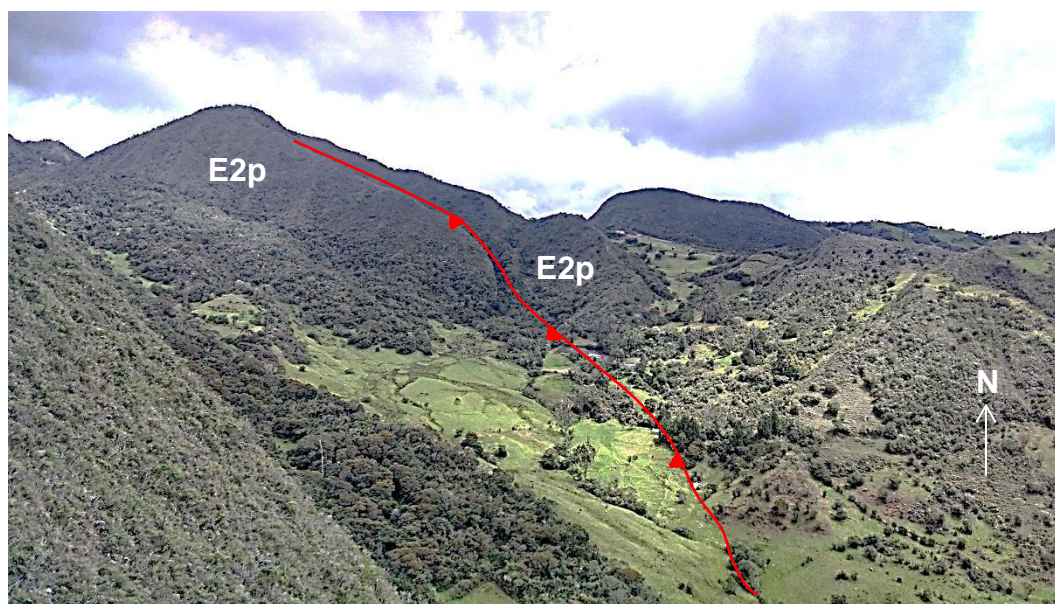
#### 2.2.2.2.1 Falla San José

Falla de tipo inverso, que inicia sus primeros 3 km con el bloque occidental levantado hasta la Falla Peña Negra, donde el bloque oriental se levanta respecto al occidental; presenta una extensión de 14 Km aproximadamente, y un desplazamiento de aproximadamente 100 m, su trazo va desde el suroeste de la zona de estudio hasta la parte Noreste de la misma, cerca de los municipios de Úmbita y Chinavita, a lo largo de su trazo en la zona de estudio esta falla atraviesa la formación Picacho, hasta encontrarse con la falla del Rio Garagoa, y así seguir

su camino hacia el norte en donde pone en contacto la formación arenisca Labor y Tierna y Plaeners respecto a la formación Guaduas, esto en el flanco occidental del sinclinal de Úmbita (ver Figuras 14 y 15).



**Figura 14.** Se aprecia el efecto que la Falla de San José causa sobre la Formación Picacho, disectándola y originando un movimiento en la componente vertical hacia abajo del bloque oriental, al inicio de su trazo. Vereda Uvero, municipio de Úmbita.



**Figura 15.** Falla de San José hacia el nor-oriente, donde se evidencia el cambio en el movimiento de sus bloques en relación al comportamiento inicial de la misma. Vereda Uvero, municipio de Úmbita.

#### 2.2.2.2.2 Falla Peña Negra

Falla de tipo inverso con el bloque oriental levantado respecto al occidental, presenta una extensión de 1.5 km aproximadamente, y un desplazamiento de aproximadamente 125 m, la cual choca contra la falla San José en la parte media de esta última.

#### 2.2.2.2.3 Falla Castillejo

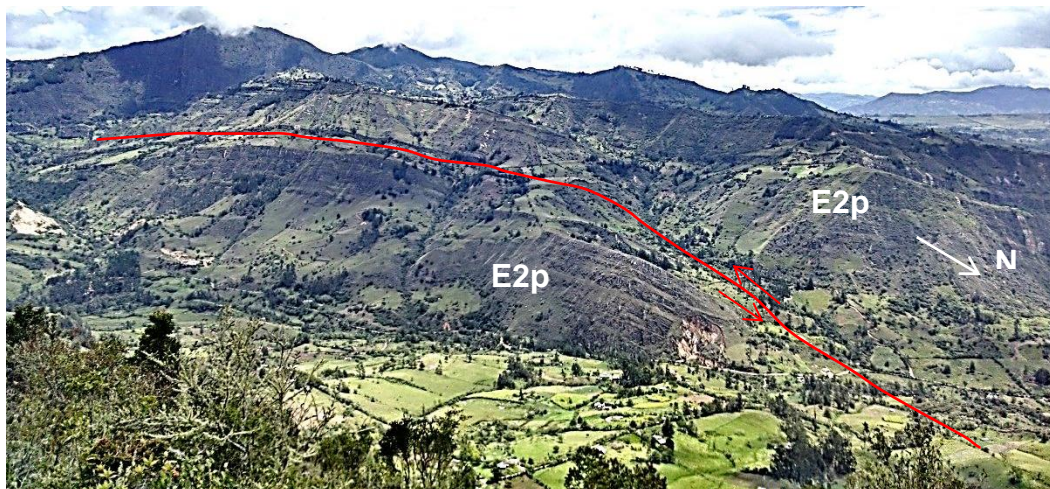
Falla de tipo inverso con su bloque oriental levantado respecto al occidental, presenta una extensión de aproximadamente 3.5 Km, presenta un trazo que va de Oeste a Este, desde la falla San José hasta la falla Sisa, atravesando así el eje del sinclinal de Úmbita en la parte sur del polígono de estudio.

#### 2.2.2.2.4 Falla Sisa

Falla de rumbo de tipo sinistral de aproximadamente 1.7 Km de extensión, la cual choca en el norte con la falla el Uvero, pone en contacto la formación concentración con la formación picacho hacia el norte, hacia el sur pone en contacto la formación Picacho con la formación Socha Superior, esto en el flanco oriental del sinclinal de Úmbita.

#### 2.2.2.2.5 Falla el Uvero

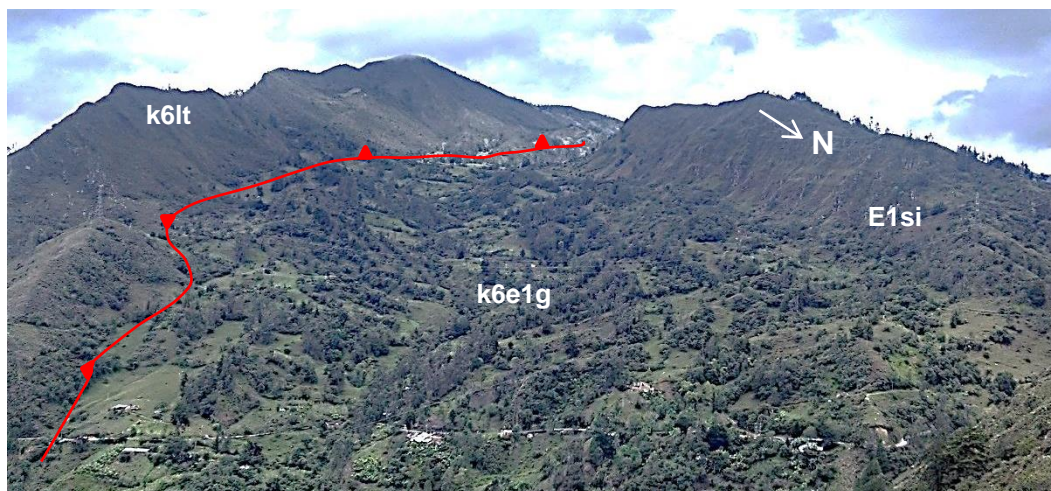
Falla de rumbo de tipo sinistral de aproximadamente 6 Km de extensión, con un desplazamiento aproximado de 140 m, presenta un trazo que va de Oeste a Este, chocando hacia la parte NW con la falla Sisa y hacia la parte SE atravesando la Falla Ramiriquí, esto en el flanco oriental del sinclinal de Úmbita (ver Figura 16).



**Figura 16.** Desplazamiento en la componente horizontal de la Falla El Uvero, que se aprecia en la Formación Picacho. Vía Tibaná-Úmbita

#### 2.2.2.2.6 Falla Ramiriquí

Falla de tipo inverso con su bloque oriental levantado respecto al occidental, presenta un trazo que va de Suroeste a Noreste con una extensión de aproximadamente 10 Km, y un desplazamiento de 150 m, la cual pone en contacto la formación Guaduas con la formación Arenisca Labor Tierna, subiendo esta última respecto a la primera, chocando hacia la parte Noreste con la falla el Uvero, esta última afectando el trazo principal de la falla Ramiriquí, hacia el techo de esta se evidencian cambios en la dirección de las capas y replegamientos, esto en el flanco oriental del sinclinal de Úmbita (ver Figura 17).



**Figura 17.** Trazo de la Falla Ramiriquí, donde la formación Arenisca Labor y Tierna sube con respecto a la Formación Guaduas. Municipios de Chinavita y Úmbita.



#### 2.2.2.2.7 Falla Río Garagoa

Falla de rumbo de tipo dextral, presenta un trazo que va de Sur a Norte, con una extensión de aproximadamente 7 km, atravesando así parte del flanco oriental y occidental del sinclinal de Úmbita (ver Figura 18).



**Figura 18.** Efectos de la Falla Río Garagoa, se evidencia verticalización e inversión de estratos.

#### 2.2.2.2.8 Falla El Carmen

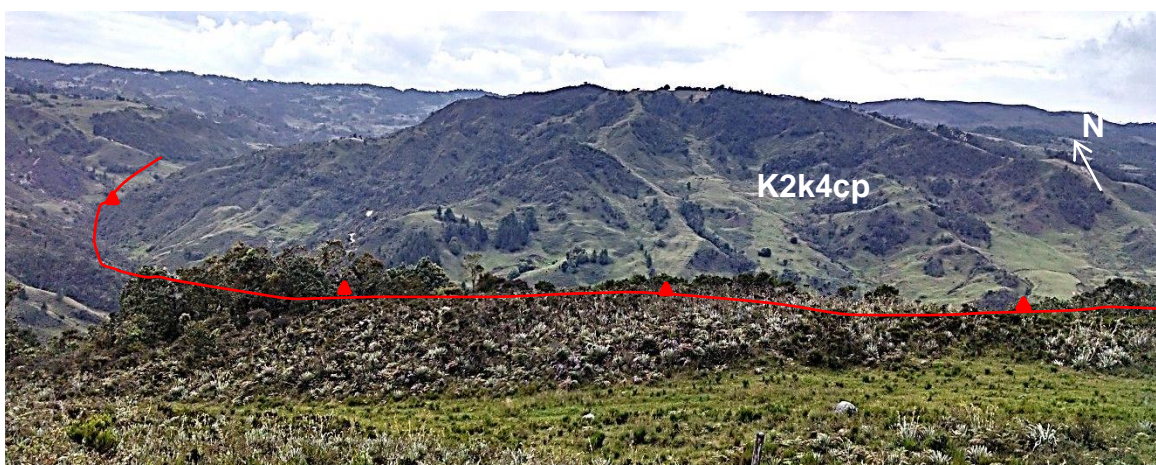
Falla de tipo inverso con su bloque occidental levantado respecto al oriental, presenta un trazo que va de Suroeste a Noreste, con una extensión aproximada de 10 km, y un desplazamiento de aproximadamente 400 m, subiendo la formación Plaeners y poniéndola en contacto con la formación Guaduas, esto en el flanco occidental del sinclinal de Úmbita (ver Figura 19).



**Figura 19.** Falla El Carmen que pone en contacto la Formación Guaduas con la Formación Arenisca Dura, Vereda San José, Tibaná.

#### 2.2.2.2.9 Falla Soapaga

Falla de tipo regional, inversa con su bloque occidental levantado respecto al oriental, presenta una dirección Suroeste - Noreste, en la cual en la parte media superior del polígono de trabajo, se evidencia mediante trabajo de campo como sube la formación Chipaque respecto a la formación Socha Inferior, hacia el norte del polígono de trabajo se observan dos fallas que convergen en esta, entre ellas la falla Quebrada Azul, hacia el norte de Chinavita ocasiona replegamientos sobre la Formación Chipaque, aumentando su espesor. Esta falla presenta un desplazamiento de aproximadamente 1500 m (ver Figura 20).



**Figura 20.** Replegamientos originados por efecto de la Falla de Soapaga en materiales blandos de la Formación Chipaque, que sube con respecto a Formaciones más jóvenes como Socha Inferior y Socha Superior. Vía Ramiriquí-Zetaquirá.

#### 2.2.2.2.10 Falla Hermitaño

Falla de tipo inverso con su bloque oriental levantado respecto al occidental, presenta una dirección Suroeste - Noreste, con una extensión aproximada de 13 km y un desplazamiento de 500 m aproximadamente, esta falla pone en contacto las formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Arenisca Labor y Tierna con la formación Guaduas.

#### 2.2.2.2.11 Falla El Rosal

Falla de tipo inverso con el bloque oriental levantado respecto al occidental, con dirección Suroeste - Noreste, con una extensión aproximada de 6.5 km.

#### 2.2.2.2.12 Falla Quebrada Azul

Falla de rumbo de tipo dextral, presenta una dirección Oeste - Este, con una extensión aproximada de 7 km, y un desplazamiento aproximado de 150 m, chocando hacia el Este con la falla El Rosal.

#### 2.2.2.2.13 Falla Hundida

Falla de rumbo de tipo sinistral, presenta una extensión de 3 km aproximadamente, con orientación Sureste - Noroeste, llegando hasta el eje del sinclinal de Úmbita.

#### 2.2.2.2.14 Falla El Juncal

Falla de tipo inverso con el bloque oriental levantado, su extensión es de 1 km aproximadamente, con orientación Oeste y un desplazamiento aproximado de 100 m.

#### 2.2.2.2.15 Falla Santa Isabel

Falla de rumbo, de tipo sinistral con una extensión de 1.5 km aproximadamente, presenta un desplazamiento de 100 m aproximadamente, esta falla converge con la falla Hermitaño hacia la parte Noreste del polígono.



## 2.3 SECTORES EVALUADOS PARA EXPLORACIÓN DE GMAC

La selección de los sectores más favorables para realizar el estudio de GMAC en el país, tiene como referente el avance en el estudio de las principales zonas carboníferas en el mismo; como se mencionó en los informes anteriores se destaca los estudios y el desarrollo minero alcanzado en las Zonas carboníferas de Cundinamarca y Boyacá.

En esta ocasión los estudios se orientaron hacia la estructura Sinclinal de Úmbita, en Boyacá, para finalizar el estudio de las principales estructuras geológicas en estas áreas carboníferas. Este sinclinal, no tiene las mismas dimensiones y condiciones del Sinclinal Checua Lenguaque, pero ofrece la posibilidad de su estudio enfocado hacia la exploración de GMAC. Allí, el desarrollo minero no ha alcanzado niveles significativos, básicamente se ha realizado a nivel artesanal y de pequeña minería.

La unidad geológica de interés en la zona de estudio definida, la constituye la formación Guaduas (K6e1g); allí, Ingeominas en el año 2008 adelantó el estudio de Recursos carboníferos Área Úmbita – Laguna de Tota, donde el área se dividió en seis sectores: Úmbita – Rondón, Úmbita – Tibaná, Tibaná – Jenesano, Nuevo Colón – Boyacá, Rondón – Tota y Pesca – Tota, estos sectores a su vez se subdividieron en bloques carboníferos. En el primer sector carbonífero definido se adelantó el proyecto GMAC\_2014.

Este sector carbonífero, se caracteriza por la identificación de 5 bloques carboníferos, de los cuales se destacan para el estudio los bloques: Sisa Sur, Sisa Norte. En estos, se logró obtener información de hasta 7 mantos de carbón, con espesores entre 0,60m a 3,90m y calidades correspondientes a carbones tipo Bituminosos Alto volátiles (bav) A, B, C, Sub Bituminoso C.

Partiendo de esta información, los trabajos en superficie fueron orientados a recopilar datos sobre las características de los mantos que trabajaban las diferentes minas del área de estudio, junto con la revisión de la geología existente, lo cual permitió identificar algunos mantos, en cuyos trabajos se ha detectado una concentración importante de gas metano y se conoció sobre la ocurrencia de accidentes e incluso de muertes por explosiones. Los mantos que mayor información referente al objeto del estudio presentaron corresponden a: M1, M2, M3, M4, M6, M11, M12 de la Formación Guaduas.

Del área de estudio, objeto de revisión cartográfica, se definieron 2 sectores GMAC con el fin de puntualizar los aspectos geológicos y estructurales de los mismos y así definir los sitios donde se adelantaron las perforaciones, teniendo en

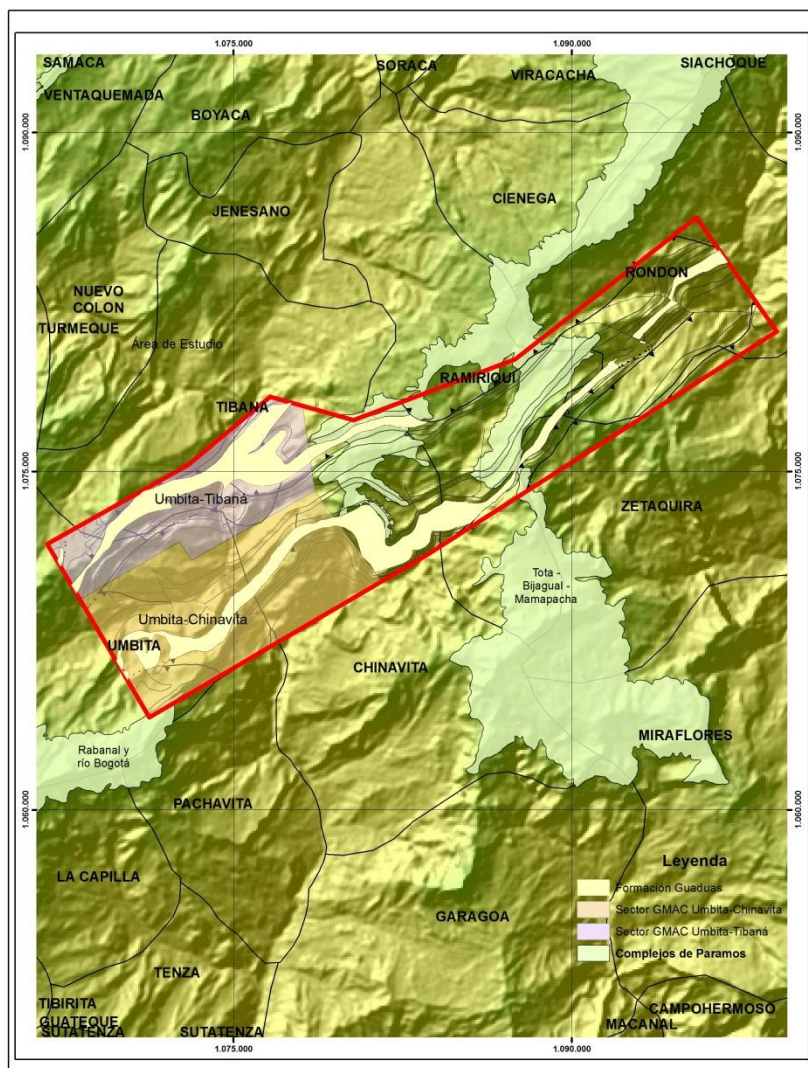
---

cuenta como se mencionó anteriormente los bloques carboníferos identificados en la zona de estudio.

Estos sectores se denominaron de sur a norte: Úmbita - Chinavita y Úmbita - Tibaná, (Ver Figura 21) y se caracterizaron por presentar información de mediciones de metano en frente de mina de acuerdo a la información suministrada por trabajadores, encargados e Ingenieros de las minas objeto de referencia para el presente estudio. Además de la información anterior, en los sectores se evaluó las características topográficas, de vías de acceso, fuentes hídricas presentes, ángulos de inclinación de las capas. La delimitación de los mismos, comprende el área de influencia en donde se localizaron minas y la información sobre zonas de Páramo del Instituto Von Humboldt <sup>7</sup>, de tal manera que las áreas definidas estuvieran fuera de la influencia de estas zonas.

---

<sup>7</sup> <http://www.humboldt.org.co>. Cartografía 2013 de los Páramos de Colombia: Diversidad, territorio e historia



**Figura 21.** Localización sectores analizados para exploración de GMAC en la zona de estudio.

Del análisis realizado en cada sector GMAC, se seleccionó como mejor alternativa para el desarrollo de las perforaciones, el sector: Úmbita -Chinavita ya que en el sector Úmbita -Tibaná, por inconvenientes de tipo social no se pudo adelantar estos trabajos. Sin embargo, para futuras actividades de exploración, se hace mención de las características de los dos sectores evaluados en el estudio.

### 2.3.1 Sector Úmbita - Tibaná (Flanco Occidental)

**Localización.** Este sector se encuentra localizado entre los municipios de Úmbita y Tibaná, en el departamento de Boyacá, al suroccidente de la zona de estudio (Ver Figura 22).

**Vías de acceso.** Para acceder a este sector, se toma la vía que desde Bogotá conduce a Tibaná, en el departamento de Boyacá, de allí se toma los carreteables que conducen a las veredas El Carmen y San José. Hacia la zona que se ubica en el municipio de Úmbita, se continúa desde Tibaná por la vía a Úmbita y de allí por carreteable a la Vereda Chuscal.



**Figura 22.** Sector GMAC Úmbita - Tibaná. Ubicado al suroccidente de la zona de estudio.

**Características de los mantos.** En este sector, se adelantan trabajos en 2 mantos (conocidos en las minas como 7 Bancos y Veta Grande), en algunos títulos mineros que están en actividad, siendo identificados en la mayor parte del área en una secuencia de base a techo, que de acuerdo a la secuencia estratigráfica para el estudio serían los mantos M6 y M9 con espesores de 2,0 m y 3,0m (con 2 intercalaciones) respectivamente. En general existen mantos de carbón de espesores entre 0,50 y 3,0 m.

Los respaldos de los mantos de interés son principalmente arcillolitas y limolitas de color gris.

El sistema de fracturamiento natural (SFN) se ha identificado como poco definido a sin definir, sobresaliendo los face cleats hacia techo, con fracturas sin relleno.

**Información minera.** De acuerdo al recorrido, reconocimiento y socialización realizada en el sector, se tiene información de minería activa hacia la parte media del mismo en la vereda San José (en dos minas), se menciona por parte de la comunidad algunas actividades de extracción minera artesanal de hace mucho tiempo atrás, por tanto no se contó con suficiente información sobre mediciones de Metano en frente de mina, ni la relación de los mantos existentes.

**Geología.** Los carbones de interés se localizan en la formación Guaduas (k6e1g), que reduce su espesor hacia el sur del sector GMAC, este se caracteriza por su gran complejidad estructural, evidenciada en la presencia de fallas de tipo inverso, normal, de rumbo, las cuales causan interrupción en la continuidad de los mantos existentes. Es de interés la existencia entre otras de la Falla El Carmen y San José, rasgos estructurales principales en el sector, además de las fallas Peña Negra, Río Garagoa que originan hacia el norte del mismo la presencia de pliegues tipo anticlinal y sinclinal.

La inclinación de las capas posee un rumbo entre N 10° a 85° E con buzamientos entre 3° y 80° al NW, con algunas zonas de inversión cercanas a las principales fallas. (Ver Mapa Geológico 1 y 4).

**Análisis del sector.** De acuerdo a los factores anteriormente mencionados, se concluye que es un sector en el cual se podría adelantar estudios de GMAC en un futuro, teniendo en cuenta la cercanía con las principales ciudades del departamento como Tunja, realizando un análisis estructural detallado y contando con el aval social.

### 2.3.2 Sector Úmbita – Chinavita (Flanco Oriental)

**Localización.** Este sector se encuentra localizado hacia la zona sur –oriental del área de estudio, entre los municipios que lleva su nombre (Ver figura 23).



**Figura 23.** Sector GMAC Úmbita - Chinavita. Ubicado al suroriente de la zona de estudio.

**Vías de acceso.** Para acceder a este sector se toma la vía que desde Bogotá conduce a Villapinzón y de allí la que lleva a Úmbita, en donde se toma el carreteable hacia la vereda Sisa Abajo, también desde Úmbita se puede tomar la vía hacia Chinavita y luego dirigirse hacia la vereda El Usillo (Chinavita) y Juncal (Úmbita).

**Características de los mantos.** En este sector se han identificado hasta 13 mantos de carbón, denominados (base a techo): M1 a M13, con espesores entre 0,40 a 3,00 m (Ver Columnas 1 a 5). Los respaldos de los mantos son principalmente limolitas arcillosas, hacia el techo de la formación, se identifican mantos con algunos niveles de arenita de grano fino como respaldos superiores.

El sistema de fracturamiento natural de los carbones, es poco definido, sobresaliendo los face cleats hacia techo, con fracturas sin relleno.

**Información minera.** De acuerdo a la información suministrada en las minas de este sector, se tiene que se han registrado avances en las labores mineras de hasta 300m; en la zona de Chinavita, se registran algunas medición de metano de relevancia por multidetector en el Manto M5 (acorde a clasificación de la Mina Proyecto San Antonio). De acuerdo a información de la comunidad en el pasado se han adelantado trabajos de extracción de carbón de manera artesanal, a nivel, con avances alrededor del kilómetro; en algunos sectores en especial hacia la Quebrada Roboemecha, en Úmbita se registraron accidentes por metano.

**Geología.** Los carbones de interés se encuentran en la formación Guaduas. Este sector, se caracteriza por la presencia de fallas de tipo inverso y de rumbo y algunos pliegues menores. Los ángulos de inclinación de las capas de la secuencia carbonífera varían entre 8° y 85°, se identifican algunas zonas de inversión hacia el trazo de la falla del Río Garagoa y hacia la zona del Proyecto minero San Antonio en Chinavita.

Se destacan las fallas de tipo inverso: Ramiriquí, El Volador, El Juncal y de rumbo, Río Garagoa, Falla Sisa, El Uvero, Castillejo, que afectan la continuidad de los mantos. Igualmente se identifica adelgazamiento de los mantos hacia el sur de la zona de estudio por efectos estructurales y hacia el norte por cambios en la depositación de las capas de carbón en la cuenca, donde existe también pinchamiento de los mismos.

**Análisis del sector.** De acuerdo a las características descritas en este sector, se tiene una topografía suave a inclinada, el desarrollo de las labores mineras a pequeña escala, lo cual permite deducir que la zona no ha sufrido una intervención intensa, los mantos de carbón pueden identificarse en afloramientos y en las escasas minas, lo cual hace muy probable la ubicación de trabajos de perforación en este.

---

Los primeros mantos presentes hacia el techo en la Formación Guaduas, se encuentran a distancias muy cortas al contacto con la formación Socha Inferior (E1si), lo cual define la necesidad de ubicar las perforaciones por encima de la misma, hecho que contribuye a obtener una mejor cobertera en el muestreo esperado y por ende mayores concentraciones del gas a medida que se cubre la secuencia carbonífera.

Por las anteriores razones, se seleccionó este sector para adelantar los dos pozos estratigráficos para el estudio, denominados Pozo Úmbita -1 y Pozo Chinavita -1.

### 3. GEOLOGÍA DEL SUBSUELO

Como una de las fases en la metodología empleada para determinar el potencial de GMAC en un sector de interés, se tiene la fase de Geología del Subsuelo, mediante la cual, se desarrollan actividades encaminadas a conocer las características físicas de los materiales presentes en el mismo; en este caso se hace especial énfasis en determinar el comportamiento de las diferentes capas de carbón presentes en los sectores con mejores perspectivas para adelantar proyectos de este tipo. La información obtenida se basó en la realización de dos perforaciones en los sectores determinados, donde además se corrieron registros eléctricos y de Temperatura; esta información fue complementada con los datos adquiridos en las diferentes minas, lo cual permitió definir de forma más acertada la secuencia carbonífera en la zona.

#### 3.1 DESARROLLO DE PERFORACIONES

Con el fin de conocer las características de los mantos y realizar las mediciones de contenidos de gas en los mismos, se llevaron a cabo dos perforaciones inclinadas (30° con respecto a la vertical), una con una profundidad de 520,0 m y otra de 580,0 m. Los pozos perforados se denominaron, de acuerdo al municipio donde se localizaron como Pozo Úmbita -1 y Chinavita - 1 (ver Figura 24), con profundidades acordes a las mencionadas respectivamente, en cada uno de ellos, se realizó la descripción de núcleos y se corrieron registros eléctricos tales como: Resistividad, Densidad, Gamma Ray, Temperatura. A continuación, se describen los principales aspectos técnicos de los pozos realizados.



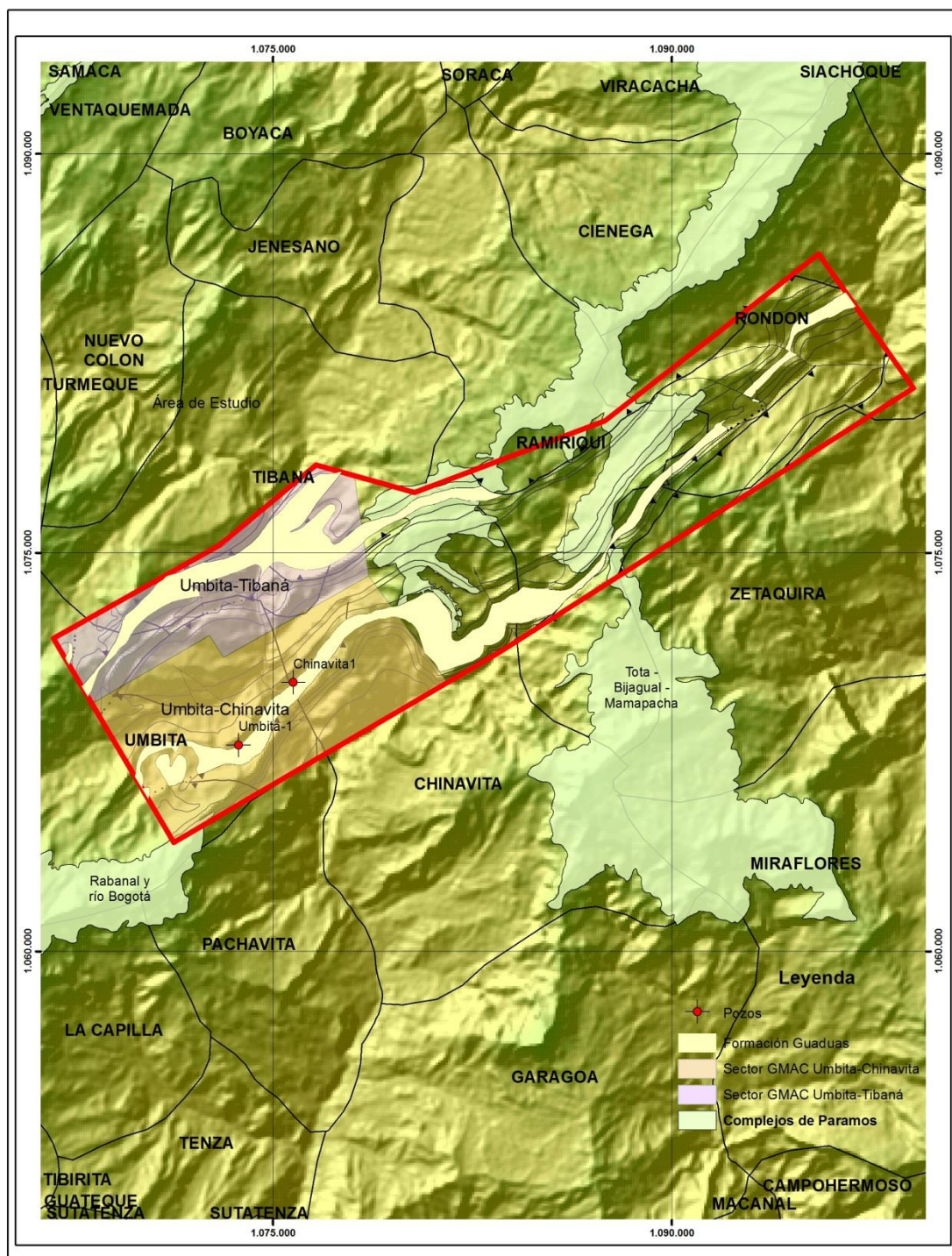


Figura 24. Localización perforaciones realizadas en la exploración de GMAC.

### 3.1.1 Pozo Úmbita -1

**Localización.** Este pozo se ubicó en la vereda Juncal, localizada en el municipio de Úmbita (ver Figura 25) en las siguientes coordenadas:

Norte	Este	Altura (msnm)
1.067.766	1.073.706	2.336



**Figura 25.** Localización Pozo Úmbita -1, municipio de Úmbita.

**Estratigrafía.** El material que se cortó en la parte superior de la perforación fue limolitas arcillosas abigarradas entre las que se evidencian colores grisáceos y rojizos, también niveles de arenitas limosas de grano muy fino, hacia la parte media se atraviesan limolitas arcillosas con laminaciones de arenita blanca de grano muy fino, limolitas carbonosas, cintas de carbón que oscilan entre 0,20 m, a 0,40 m y mantos de carbón entre 0,40 m y 2,70 m; hacia la parte inferior de la perforación se atraviesan arenitas cuarzosas blancas de grano fino con contenido de glauconita, limolitas arcillosas de color gris con laminación plano paralela, limolitas de color gris con arenitas de grano muy fino.

Los ángulos de buzamiento se encontraron entre 20° y 50 °.

**Desarrollo.** Se empleó para el desarrollo de la perforación un taladro KDHT1700-2, 4 KUBOTA 2403T Turbo diésel 59 HP, para un total de 236 HP en la máquina; drill head de 3100 RPM, con una capacidad de perforación de 300 m en PQ, 600



m en HTW, 1000 m en NTW, 1500 m en BTW, con un peso total de 1827 Kg. (Ver Anexo A y Figura 26).

Se instaló revestimiento (CASING) hasta los 272 m. diámetro HTW que al final de la perforación fue recuperado de manera parcial.



**Figura 26.** Montaje del Pozo Úmbita -1, Vereda Juncal, municipio de Úmbita.

El almacenamiento de los núcleos se realizó desde el inicio de perforación, con la respectiva descripción litológica, estos núcleos reposan en la Litoteca del Servicio Geológico Colombiano. La recuperación de los núcleos en general fue del 97% (Figura 27).



**Figura 27.** Manejo de los núcleos recuperados para el traslado a la Litoteca del SGC.

### 3.1.2 Pozo Chinavita-1

**Localización.** Este pozo se ubicó en la vereda Usillo, localizado en el municipio de Chinavita (Ver Figura 28) en las siguientes coordenadas:

Norte	Este	Altura (msnm)
1.070.126	1.075.775	1.984



**Figura 28.** Ubicación del pozo Chinavita-1, municipio de Chinavita-1.

**Estratigrafía.** El material que se atraviesa en la perforación en la parte superior está compuesto por limolitas arcillosas abigarradas entre las que se evidencian colores grisáceos, rojizos y verdosos, en sectores se evidencia laminaciones de arenita blanca de grano muy fino, luego en la parte media de la perforación se atraviesan sucesiones heterolíticas de limolitas arcillosas con laminaciones de arenita blanca de grano muy fino, variando en sucesiones granocrecientes y decrecientes de contactos gradacionales desde limolitas de color gris a arenitas de grano fino, limolitas carbonosas, cintas de carbón que oscilan entre 0,20 m a 0,35 m y mantos de carbón que oscilan entre 0,4 m a 1,61 m de espesor.

Los ángulos de buzamiento oscilan entre 20° y 80°

**Desarrollo.** Se empleó para el desarrollo de la perforación un taladro KDHT1700-3, 4 KUBOTA 2403T Turbo diésel 59 HP, para un total de 236 HP en la máquina; drill head de 3100 RPM, con una capacidad de perforación de 300 m en PQ, 600 m en HTW, 1000 m en NTW, 1500 m en BTW, con un peso total de 1827 Kg / (Ver Figura 29).

Se instaló revestimiento (CASING) hasta los 308,48 m. en diámetro HTW que al final de la perforación fue recuperado de manera parcial.

El almacenamiento de los núcleos se realizó desde el inicio de perforación, con la respectiva descripción litológica, estos núcleos reposan en la litoteca del Servicio Geológico Colombiano. La recuperación de los núcleos en general fue del 98%.



**Figura 29.** Montaje del pozo Chinavita-1.

### 3.2 INCONVENIENTES REGISTRADOS DURANTE LAS PERFORACIONES

En el desarrollo de los pozos para el proyecto de exploración, se presentaron los siguientes inconvenientes (Ver Anexo A):

**Pozo Úmbita -1**, se tiene que cambiar de taladro de perforación debido a problemas mecánicos, esto a los 73,0 m aproximadamente, también se presenta ruptura de tubería debido al alto torque que se presenta, se atraviesa un acuífero con un caudal aproximado de 15 litros por segundo, el cual no deja avanzar la tubería de perforación, para ello es necesario aplicar aditivos y así ejercer sobrepresión, para pasar dicho acuífero.

**Pozo Chinavita-1**, en varias ocasiones se pega la tubería debido a la presencia de arcillas plásticas, generando un alto torque y por ende dificultando el avance de perforación. Se registran también, pérdidas de circulación por las fracturas generadas en capas de areniscas y de carbón, situación que es estabilizada con la utilización de polímeros y se presenta ruptura de tubería debido al alto torque que se presenta en el pozo.

### 3.3 ANÁLISIS GEOLÓGICO DE LOS POZOS PERFORADOS

A partir de registros de pozo se ha podido definir en forma más precisa la secuencia carbonífera presente en el sector de interés, donde además se ha podido conocer información importante en el proceso de cálculo del potencial de GMAC, como espesor de los mantos, inclinación de las capas, rocas adyacentes a los mantos de carbón. A continuación se describe los registros corridos en los pozos y el comportamiento de los mismos principalmente en las capas de carbón identificadas.

#### 3.3.1 Registros de Pozo

Los registros eléctricos se constituyen en una herramienta importante en la exploración de recursos minerales en general; en el caso de los mantos de carbón, permiten determinar tanto propiedades físicas como algunas características de los mismos en contraste con las rocas que infrayacen y suprayacen estas capas, tales como baja radioactividad natural, baja densidad, alta resistencia a la corriente eléctrica, espesor de las capas, características litológicas, contenido de fluidos, profundidad de los diferentes estratos. A continuación, se hace una breve descripción sobre su importancia y uso para posteriormente presentar los resultados obtenidos en las perforaciones adelantadas (Ver Anexo A).

### 3.3.1.1 Registro de Rayos Gamma

Este registro mide la radioactividad natural del carbón proveniente de la desintegración de tres elementos Uranio, Torio, Potasio. Se emplea en la determinación de la arcillosidad en las formaciones permeables, puede contribuir a detectar los mantos de carbón a través del revestimiento, ya que el carbón tiene una radioactividad natural baja en comparación con otros tipos de roca (Wood et al, 2003).

### 3.3.1.2 Registro de Densidad

El registro de densidad en un pozo, permite identificar la densidad media de las capas presentes a través de una fuente radioactiva dispuesta en una sonda, que detecta el número de rayos gamma emitidos por las rocas. A mayor densidad de las rocas más rayos gamma son absorbidos y menos retornan al detector (Wood et ál., 2003). Las unidades empleadas para expresar el valor de densidad son gramos/cm<sup>3</sup>. La mayoría de capas de carbón poseen una densidad baja entre 0.7 a 1.8 gramos/cm<sup>3</sup>, por tanto este registro se considera importante en la determinación de los espesores de estas capas. De acuerdo a Wood et ál. (2003), el registro de Densidad, puede también aportar información referente a composición y rango del carbón, ya que carbones con altos contenidos de cenizas poseen un valor mayor de densidad comparado con capas de carbón con bajos porcentajes en cenizas.

### 3.3.1.3 Registro Temperatura

El registro de Temperatura, permite determinar un perfil a lo largo del pozo con el fin de identificar las variaciones de la misma con respecto a la profundidad y a los materiales que atraviesa. Con este registro se pretende establecer una referencia sobre la temperatura de cada manto de carbón in situ, de tal manera que esta información permita simular luego en el laboratorio las condiciones propias del yacimiento para la realización de las mediciones de contenidos de gas metano.

### 3.3.1.4 Registros de Resistividad

A través de este registro, se mide la resistividad eléctrica o capacidad que presentan las rocas de conducir la electricidad cuando están saturadas por agua. Las unidades en que se expresa estas medidas corresponden a Ohm-m. Este registro se emplea entre otras, para determinar espesores de capas, teniendo en cuenta que la resistividad en una roca varía según su dureza y el fluido que contiene. Las arcillolitas presentan resistividades bajas y constantes, comparadas con el carbón, que posee resistividades altas.

Basados en estos principios, se corrieron los registros en mención, obteniéndose variaciones en los valores reportados de acuerdo al tipo de material que compone la litología de cada pozo. Los resultados se expresan para cada pozo así:

### 3.3.2 Interpretación de Registros

Con el fin de determinar las características de las rocas presentes en cada uno de los pozos realizados, en especial la de los mantos de carbón, se adelantaron registros eléctricos y de Temperatura. Antes de tomar cada uno de los registros se realiza la preparación del pozo, lavándolo, con el fin que la sonda baje libremente.

Debido a la inestabilidad de los pozos durante la perforación, se dificultó correr los registros sin tubería por tanto la información obtenida es aquella registrada con tubería. Los registros no se llevan a cabo en su totalidad, debido a complicaciones técnicas y del terreno. Los datos obtenidos de los registros corridos se describen a continuación (Ver Anexo A).

#### 3.3.2.1 Pozo Úmbita -1

Los registros corridos en este pozo fueron Densidad y Gamma Ray (ver Figura 30) hasta 519,0 m de profundidad y dentro de tubería, la resistividad se hizo por intervalos como: (0 – 120) m y (270 – 315), el de temperatura entre 0 – 120 m.



**Figura 30.** Realización de Registros en el Pozo Úmbita -1.

*Registro Gamma Ray.* Los intervalos del registro presenta valores que varían entre 0 y 200 unidades API, los valores promedios presentes en el registro son medios altos debido a la presencia de material tipo arcillolitas y limolitas. Las capas de carbón, presentan valores medios de radioactividad con valores entre 17 y 40 API.



*Registro de Densidad.* La escala empleada para este registro esta entre 1 a 3 g/cm<sup>3</sup>., registrándose en el caso de las capas de carbón valores entre 1,15 g/cm<sup>3</sup> a 1,35 g/cm<sup>3</sup>, para los materiales como limolitas y areniscas se registran valores entre 1,5 g/cm<sup>3</sup> a 2,75 g/cm<sup>3</sup>. Siendo este último valor de los más altos para las areniscas.

*Registro de Temperatura.* La escala de valores empleada en este registro esta entre 5 y 25°C, en el tramo que se registra entre 0 a 120,0 m, la curva obtenida permite identificar un aumento de temperatura con la profundidad, teniendo en cuenta el valor registrado en superficie de 17 °C. Infortunadamente el registro solo llega hasta una profundidad de 120,0 m, sin poder registrar y correlacionar respecto a la profundidad las capas de carbón y demás litología presente en el pozo.

*Resistividad.* Los valores obtenidos están expresados en unidades de Ohm- m, en los tramos que se presenta el carbón no se puede correr este registro, aun así las arcillolitas carbonosas y areniscas presentan los más altos valores de resistividad en comparación con las limolitas las cuales según la escala de medición (0.2 – 100) ohm-m, presentan valores medios bajos.

### 3.3.2.2 Pozo Chinavita-1

En este pozo no se hizo ningún tipo de registro de 428, 0 m hacia abajo ya que la ruptura de la tubería y no poder rescatarla impidió el desarrollo del mismo. Se realiza densidad hasta 408,0 m y Gamma hasta 415,0 m; la lectura de temperatura con tubería se hace de 0 a 415,0 m y sin tubería solo se hace en el tramo entre 408,0 – 420,0 m.

*Registro Gamma Ray.* Los intervalos del registro presentan valores que varían entre 0 y 200 unidades API, los valores promedios presentes en el registro son medios altos en razón a la predominancia de capas de limolitas y arenitas, los niveles de carbón presentan valores de radiactividad entre 23 y 40 API.

*Registro de Densidad.* Respecto a este registro, se toma como referencia una escala entre 1,0 a 3,0 g/cm<sup>3</sup>. La sonda indica valores entre 1,10 a 1,30 g/cm<sup>3</sup> para las capas de carbón y valores de 2,75 a 2,90 g/cm<sup>3</sup> para las capas de areniscas.

*Registro de Temperatura.* Para este registro, se empleó una escala entre 20 y 40 °C, con un valor cerca de la superficie de 21 °C; vale la pena mencionar que este registro se toma dentro de la tubería, en el tramo que va de 0 a 415,0 m, la curva obtenida permite identificar un aumento de temperatura con la profundidad, llegando a una temperatura de 32 °C a los 415,0 m.

### 3.4 SELLAMIENTO

Una vez terminado los pozos con sus respectivos registros eléctricos se procedió al sellado de los mismos, para lo cual se construyó un mojón con una placa en cemento, en la cual se registró la información sobre: nombre del pozo, las coordenadas, Entidad contratante, Contratista, profundidad alcanzada y año (Figura 31).



**Figura 31.** Sellado del Pozo Úmbita -1, municipio de Úmbita .

## 4. TERMOCRONOLOGÍA Y GEOLOGÍA ISOTÓPICA

En este capítulo se describe y se compila la información relacionada con aspectos técnicos y geológicos, para el desarrollo del estudio de evolución térmica de la cuenca carbonífera del Cretácico tardío al Paleoceno temprano, en el área de estudio Úmbita – Rondón. Basados en los antecedentes se presentan las hipótesis de trabajo, metodología implementada para las técnicas analíticas utilizadas y complementarias; así como los resultados obtenidos por los métodos termométricos y termocronológicos.

### 4.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO

#### 4.1.1 Selección Área de Estudio

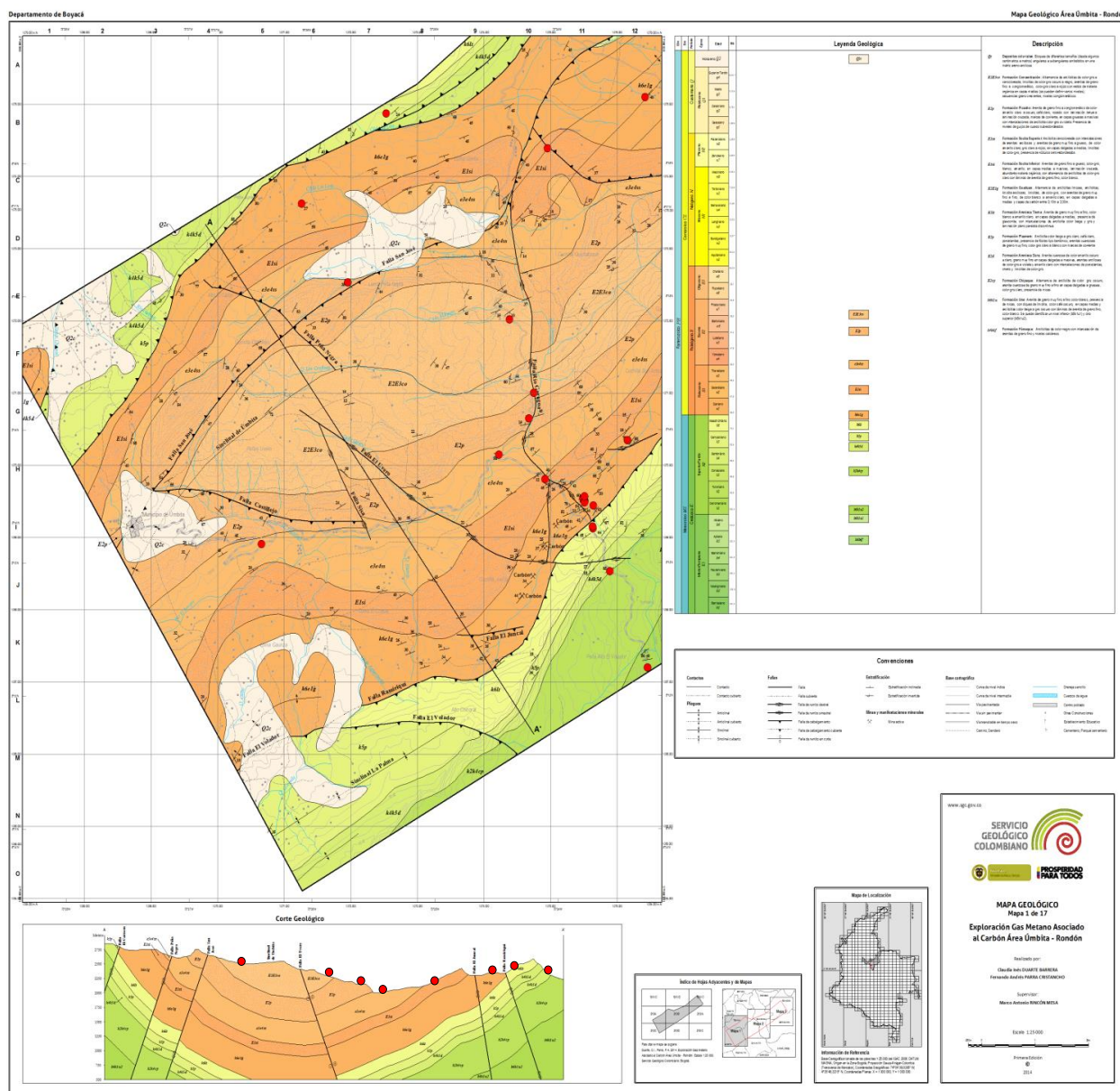
El área de estudio se enfocó en sinclinal de Úmbita. Para el desarrollo de los estudios correspondientes a termocronología y geología isotópica se desarrolló la fase de campo principalmente en el flanco oriental del sinclinal (ver Figura 32), en el sector suroccidental, al este del municipio de Úmbita, y con algunos puntos de control litológico en el flanco Occidental, en donde hay repetición de secuencia por influencia de fallas.

#### 4.1.2 Estrategia de Muestreo

El muestreo estuvo orientado a la recolección de rocas sedimentarias clásticas de la sección estratigráfica del sinclinal de Úmbita, el cual incluyó rocas desde el Cretáceo tardío hasta el Mioceno medio. Adicionalmente, se tomaron rocas con materia orgánica y carbones para los análisis de reflectancia en vitrinita e isotopos estables y de intercalaciones de arcillolitas para posibles análisis de difracción de rayos X.

Teniendo en cuenta que para la realización de análisis de huellas de fisión en apatitos (AFT) requiere obtener una serie de seis a diez muestras del Grupo Guadalupe a la Formación Concentración (al menos una muestra por cada unidad estratigráfica, y al menos tres de la Formación Guaduas en la parte inferior, media

y superior), las cuales son tomadas en función de las litologías disponibles y de las condiciones de los afloramientos (Figura 33 y 34).



**Figura 32.** Mapa y perfil geológico del área de interés en el Sinclinal de Úmbita con los puntos previstos de acuerdo con la estrategia de muestreo planteada para el desarrollo del estudio (tomado de SGC, 2014).



**Figura 33.** Muestreo realizado en arenitas de la formación Guaduas, municipio de Tibaná.



**Figura 34.** Muestreo realizado en carbones para análisis de Isótopos Estables. Vereda Quichatoque, municipio de Tibaná.

El propósito del muestreo se basa en obtener suficientes cristales de apatito (alrededor de 30-50) en todas las muestras para datación con el método de huellas de fisión y tener material adicional en caso de realizar medición de la longitud de huellas. En el caso de circones sólo se requiere una muestra por formación con el fin de evaluar condiciones de reseteo de las huellas de fisión y realizar algunas dataciones U/Pb.

En la etapa de campo se obtuvieron un total de 27 muestras, de las cuales algunas se tomaron para determinar la incidencia de fallas geológicas en el control de la evolución térmica que pudo haber tenido la cuenca en el tiempo de exhumación de la misma y se tomaron 14 muestras para análisis de isotopos estables. Las muestras fueron procesadas en los laboratorios del Grupo de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares y Geocronológicas del SGC (Termocronología Huellas de fisión, Ablación Laser y Geología Isotópica, Isótopos estables Sólidos). Tras la etapa de procesamiento se obtuvieron: 1 montaje para huellas de fisión en apatitos, 6 montajes para datación U/Pb en circones y 11 muestras preparadas para análisis de isotopos estables sólidos (de acuerdo a la relación en la Tabla 4).

**Tabla 4.** Relación de muestras tomadas en campo y análisis realizados de acuerdo con la disponibilidad de minerales tras la preparación de la muestra.

MUESTRA	E	N	H	UNIDAD LITOLÓGICA	ANÁLISIS
14-HF-001	1074754	1071004	1951	Fm. Picacho	DD-Zr
14-HF-002	1074675	1070648	1929	Fm. Picacho	U/Pb
14-HF-003	1074228	1070143	1904	Fm. Socha superior	AFT DD-Zr
14-HF-004	1074920	1069807	1911	Fm. Socha inferior	U/Pb
14-HF-005	1076158	1070348	2079	Fm. Guaduas	U/Pb
14-HF-006	1070661	1068906	2181	Fm. Picacho (base)	DD-Zr
14-HF-007	1075635	1069153	1858	Fm. Guaduas (base)	-----
14-HF-008	1076463	1067200	1740	Fm. Chipaque	DD-Zr
14-HF-009	1076817	1066750	1717	Fm. Une	DD-Zr
14-HF-010	1075513	1069509	1809	Fm. Guaduas	U/Pb
14-HF-011	1075644	1069443	1804	Fm. Guaduas (tope)	DD-Zr
14-HF-012	1071265	1073620	2499	Fm. Guaduas (tope)	U/Pb
14-HF-013	1071956	1072532	2343	Fm. Picacho	U/Pb
14-HF-014	1071956	1072532	2343	Fm. Picacho	DD-Zr
14-HF-015	1071956	1072532	2343	Fm. Picacho	U/Pb
14-HF-016	1074387	1072021	2037	Fm. Concentración	DD-Zr
14-HF-017	1076950	1074390	2327		DD-Zr

MUESTRA	E	N	H	UNIDAD LITOLÓGICA	ANÁLISIS
14-HF-018	1076422	1075098	2036		DD-Zr
14-HF-019	1072532	1074870	1996		ZFT
14-HF-020	1074959	1074389	1560		ZFT
14-HF-021	1078138	1084451	1760		U/Pb
14-HF-022	1077985	1085590	2540		DD-Zr
14-HF-023	1077810	1085608	2150		DD-Zr
14-HF-024	1081394	1090242	2512		ZFT
14-HF-025	1081749	1089407	2260		ZFT
14-HF-026	1075641	1069126	1845	Fm. Tierna (tope)	-----
14-HF-027	1076803	1066795	1702	Fm. Une	-----
14-IE-001	1076158	1070348	2079	Fm. Guaduas	<sup>13</sup> C/ <sup>12</sup> C Ro%
14-IE-002	1075635	1069153	1858	Fm. Guaduas (base)	<sup>13</sup> C/ <sup>12</sup> C
14-IE-003	1075896	1068531	1841	Fm. Plaeners	-----
14-IE-004	1076463	1067200	1740	Fm. Une	<sup>13</sup> C/ <sup>12</sup> C
14-IE-005	1076817	1066750	1717	Fm. Une	-----
14-IE-006	1075494	1069549	1814	Fm. Guaduas	<sup>13</sup> C/ <sup>12</sup> C Ro%
14-IE-007	1075494	1069540	1814	Fm. Guaduas	Ro%
14-IE-008	1075494	1069534	1814	Fm. Guaduas	<sup>13</sup> C/ <sup>12</sup> C Ro%
14-IE-009	1075513	1069509	1809	Fm. Guaduas	<sup>13</sup> C/ <sup>12</sup> C
14-IE-010	1075513	1069506	1809	Fm. Guaduas	<sup>13</sup> C/ <sup>12</sup> C Ro%
14-IE-011	1075513	1069498	1807	Fm. Guaduas	<sup>13</sup> C/ <sup>12</sup> C Ro%
14-IE-012	1075513	1069493	1807	Fm. Guaduas	<sup>13</sup> C/ <sup>12</sup> C Ro%
14-IE-013	1075513	1069485	1805	Fm. Guaduas	<sup>13</sup> C/ <sup>12</sup> C Ro%
14-IE-014	1075513	1069570	1805	Fm. Guaduas	<sup>13</sup> C/ <sup>12</sup> C

(AFT: análisis de huellas de fisión en apatitos, DD-Zr: montaje para doble datación, U/Pb: datación mediante LA-ICP-MS, <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C: análisis de isótopos de carbono, Ro%: Reflectancia en vitrinita, ---: No fue posible ningún análisis).

Fuente: Datos del estudio

#### 4.1.3 Preparación de muestras

Para análisis mediante Huellas de Fisión y dataciones U/Pb, las 27 muestras fueron procesadas adecuadamente para la separación y montaje de apatitos y circones; sin embargo, no se obtuvo un número óptimo de apatitos para realizar estos análisis tal como se define en la Tabla 4. De acuerdo con el procedimiento descrito en el método de ensayo del laboratorio: la preparación de muestras consiste en trituración, molienda, tamizaje, separación magnética e isomagnética

por “Frantz” con voltajes de 0.3, 0.8 y 1.2 (ángulo de inclinación de 20° en la horizontal y 30° en la vertical) y concentración de minerales pesados mediante el uso líquidos densos. Una vez separadas las fases minerales, se prepararon montajes de circones para análisis de U/Pb y apatitos para huellas de fisión en una resina epóxica (a temperatura ambiente); los circones para análisis de huellas de fisión, fueron montados en porta muestras de teflón a una temperatura de 320°C, posteriormente, los cristales son pulidos con papel lija y pasta de diamante. Para las muestras que son analizadas mediante huellas de fisión, finalmente, se realiza un ataque químico para el revelado de huellas espontáneas (naturales): en los circones mediante una solución eutéctica KOH-NaOH a 220°C durante periodos de tiempo comprendidos entre 7 y 24 horas; los apatitos fueron tratados con una solución de HNO<sub>3</sub> 5.5 M a 21°C durante 20 segundos. Las muestras se irradiaron en el reactor nuclear de Múnich (Alemania).

Con respecto a las muestras para isotopos estables de carbono, se analizaron 11 muestras de las cuales 9 eran de carbones y 2 de lodolitas ricas en materia orgánica. Las muestras fueron pulverizadas y se tomaron 500mg de cada una, estas fueron dejadas en ácido clorhídrico 6N durante 2 horas, posteriormente fueron lavadas con agua. Se realizaron 2 lavados más con HCl 6N y sus posteriores lavados con agua. Las muestras ya sin HCl se dejaron secar a temperatura ambiente durante 2 días. Aproximadamente 200µg de las muestras secadas al aire fueron pesadas y encapsuladas en crisoles de estaño los cuales fueron depositados en el automuestreador y posteriormente fueron pasados al horno de combustión el cual estaba a 1020°C, en donde se produjo el CO<sub>2</sub>.

Las muestras para determinar la reflectancia de la vitrinita se prepararon bajo Norma ASTM D 2013/D2013M-12.

#### 4.1.4 Técnicas analíticas utilizadas

A continuación se describe brevemente las técnicas utilizadas en termocronología y aquellas que permiten complementar este estudio:

Termocronología – Huellas de fisión: El método se basa en la acumulación de fisuras desarrolladas en minerales ricos en uranio generadas como resultado de fisión nuclear espontánea de <sup>238</sup>U (Fleischer et al., 1975). Éste método consiste entonces en la medida de la densidad de las trazas debidas a la fisión natural (fósiles o espontáneas) que es proporcional a la concentración de uranio en el cristal y representa la edad a la cual se formaron las trazas. La temperatura de borrado total de las trazas en apatito es cercana a 120°C y permanecen estables por debajo de 60°C, el rango de estas temperaturas se denomina zona de borrado parcial; en el caso de los circones las temperaturas se encuentran a 250 y 170°C, respectivamente. El grado de borrado que alcanza una traza en la zona de borrado parcial es determinado por la longitud de las trazas preservadas. La técnica de trazas de fisión en apatitos y circones permiten hacer reconstrucciones



de la historia termal de las rocas a través del tiempo geológico (Tagami & O'Sullivan, 2005).

El conteo de las trazas se realizó en el Laboratorio de Trazas de Fisión del Servicio Geológico Colombiano, que cuenta con un Microscopio Olympus BX-51, acoplado con la unidad de magnificación U-CA, intercambiable y lente óptico con aumentos de 1X, 1.25X, 1.6X, y 2X, y dispositivo de dibujo de referencia U-DA. El sistema está adaptado al sistema FTStage desarrollado por Trevor Dimitru, que cuenta con una platina motorizada en X y Y con soporte para secciones 4"x3 y una tabla digitalizadora marca CAIcomp DrawingBoard IV (DBIV) de 12 x 12 pulgadas con un cursor de 16 botones con luz LED. Todo el sistema es manejado por el software FTStage 4. El análisis se hace a una magnificación de 1250 aumentos.

Reflectancia en Vitrinita: Los macerales (e.g. vitrinita) son los principales componentes del carbón y de la materia orgánica presente en rocas sedimentarias (Bustin *et al.*, 1990). Estos macerales incrementan su reflectancia con el incremento de la temperatura. La reflectancia de la vitrinita ( $R_o$ ) es la medida más precisa para relacionar la madurez de la materia orgánica con el calentamiento, comúnmente asociado al enterramiento. Por lo tanto, los análisis de reflectancia en vitrinita proveen información sobre la máxima paleo-temperatura alcanzada por las rocas sedimentarias durante el enterramiento y proceso diagenético. Los valores de reflectancia de vitrinita en materia orgánica, típicamente se encuentran en un rango entre  $0.2R_o\%$  para paleo-temperaturas máximas  $< 30^\circ\text{C}$  y  $6R_o\%$  para rocas que han experimentado paleo-temperaturas  $> 250^\circ\text{C}$  (Barker & Pawlewicz, 1994).

Isótopos Estables: El carbono tiene tres isótopos, de los cuales dos son estables  $^{12}\text{C}$  (normal) y  $^{13}\text{C}$  (pesado), y uno inestable o radioactivo  $^{14}\text{C}$ . El isótopo más abundante es  $^{12}\text{C} = 98.89\%$ , seguido por el  $^{13}\text{C} = 1.109\%$  y el  $^{14}\text{C} 10^{-10}\%$  (Rollinson, 1993). Los isótopos de carbono, se van acumulando en las células de los organismos durante toda su vida, en el caso de las plantas éstas toman el carbono a partir del  $\text{CO}_2$  durante la fotosíntesis. La concentración de  $^{12}\text{C}$  y  $^{13}\text{C}$  es constante durante el tiempo geológico, sin embargo puede verse afectada si la sustancia, en este caso el carbón se somete a temperaturas superiores a  $200^\circ\text{C}$  (Kandel, 1964; Koepp, 1979, *en Singh et al.*, 2012). El fraccionamiento isotópico ( $\delta^{13}\text{C}\%$ ) del  $^{13}\text{C}$  se calcula con respecto a la concentración de  $^{12}\text{C}$  en la muestra y en un estándar determinado.

El análisis del fraccionamiento isotópico de carbono ( $\delta^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) se realizó con el uso de analizador elemental Flash 2000 el cual cuenta con dos modos de operación (Combustión y pirólisis) y una columna cromatográfica para la separación de las sustancias generadas en los reactores. Éste analizador se encuentra acoplado, por medio de la interfase ConFlo IV, al espectrómetro de masas de relaciones isotópicas Delta V advantage en donde se realiza la separación por masas de los isótopos presentes en las muestras analizadas.

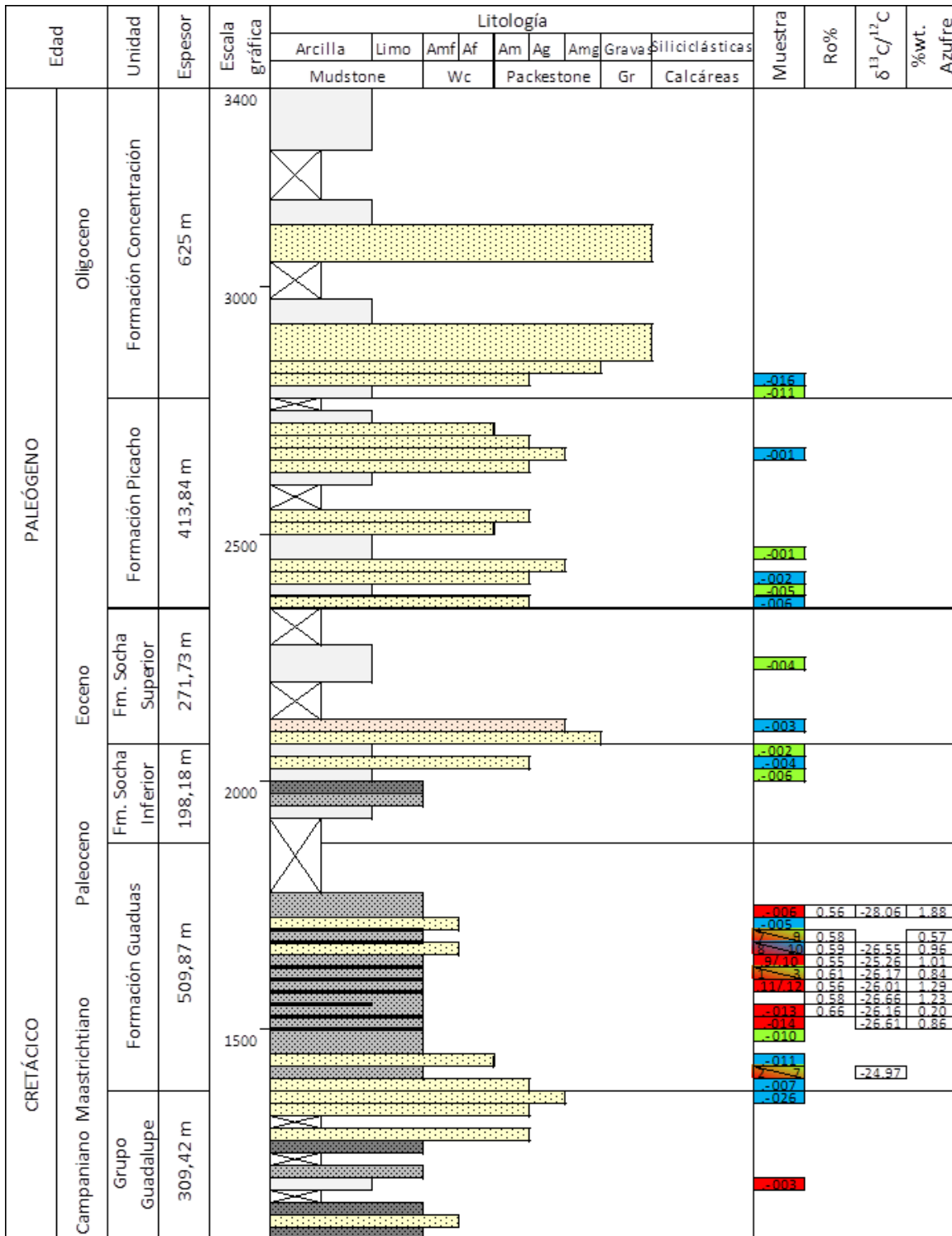
Geocronología – U/Pb: Las dataciones fueron llevadas a cabo usando la técnica de ablación láser acoplados a espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (LA-ICPMS) *in situ*; consiste en realizar directamente en la medición isotópica en circones sólidos. Los fotones del sistema láser son enfocados dentro de un pulso energético de alto poder que interactúa con la superficie de la muestra, removiendo pequeñas partículas, átomos, iones formando un aerosol que es transportado al ICP por medio de un gas inerte (He); allí, se ionizan las partículas y cada isótopo (U, Pb, Th) es separado por un magneto en función de su masa nominal y carga, finalmente son cuantificados de acuerdo a estándares de referencia (e. g. *Plešovice*). Este método radiométrico se basa en el decaimiento radioactivo de  $^{238}\text{U}$ , cuyos átomos en el transcurso del tiempo son transformados a  $^{206}\text{Pb}$ , por tanto la relación isotópica entre ellos es correspondiente a una edad (de proveniencia) asociada a eventos de formación o alta temperatura; aunque no se obtienen edades de enfriamiento, permite realizar la reconstrucciones de la historia térmica de una roca.

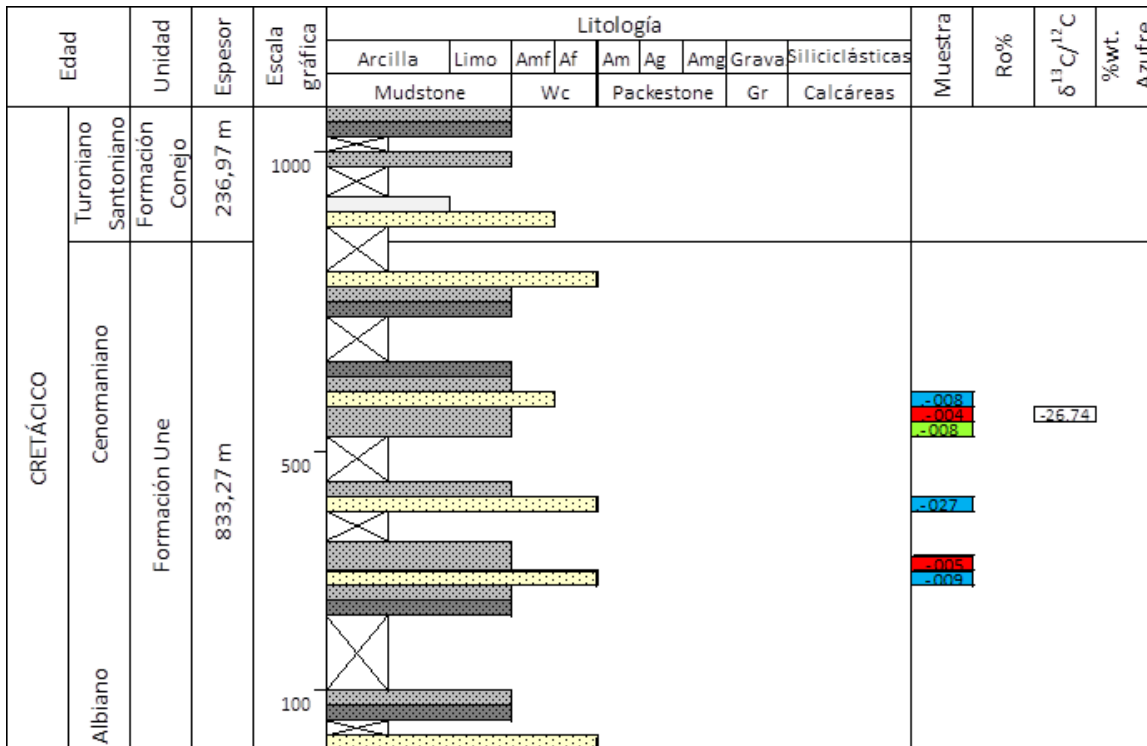
## 4.2 RESULTADOS

### 4.2.1 Sección Estratigráfica

La sección estratigráfica de interés se encuentra aflorando en el Sinclinal de Úmbita (Figura 35). En este estudio la sucesión se tomó a partir del Cretácico inferior hasta el Paleógeno, dado que el interés se enfoca en la Formación Guaduas; es necesario identificar toda la secuencia de rocas, que suprayacen y que hacen parte de la cuenca, con el fin de llevar a cabo los análisis de exhumación y evolución térmica.

La columna se inició hacia el tope de la Formación Une (incompleta), correspondiendo a los cerca de 800 metros superiores de la unidad rocosa y se extendió hasta el núcleo del sinclinal, lo que correspondería al techo de la Formación Concentración (sin tener en cuenta los efectos de la erosión); completando 3400m de sección estratigráfica, de los cuales se considera que 1525m suprayacen actualmente a las rocas de la Formación Guaduas en este sector.





Convenciones		Muestras	
[Símbolo]	Carbón	[Símbolo]	HF 14-HF-xxx
[Símbolo]	Arcillolita	[Símbolo]	DRX 14-DRX-xxx
[Símbolo]	Lodolita (Shale)	[Símbolo]	IE 14-IE-xxx
[Símbolo]	Limolita		Ro% Reflectancia vitrinita
[Símbolo]	Cuarzoarenita		Isótopos de carbono $\delta^{13}C/^{12}C$
[Símbolo]	Litoarenita		
[Símbolo]	Cubierto		

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO	
Sección estratigráfica Sinclinal de Úmbita Flanco Oriental. Plancha 191- Tunja	
Grupo Laboratorio Huellas de Fisión	Coordenadas (Origen Bogotá): N: 1066071, E: 1077089
Escala gráfica: 1:10000	Fecha: Abril de 2014

Fuente: Datos del estudio

**Figura 35.** Sección estratigráfica del Sinclinal de Úmbita (Flanco oriental).  
Medición de espesores y posicionamiento de muestras.

#### 4.2.2 Dataciones U/Pb

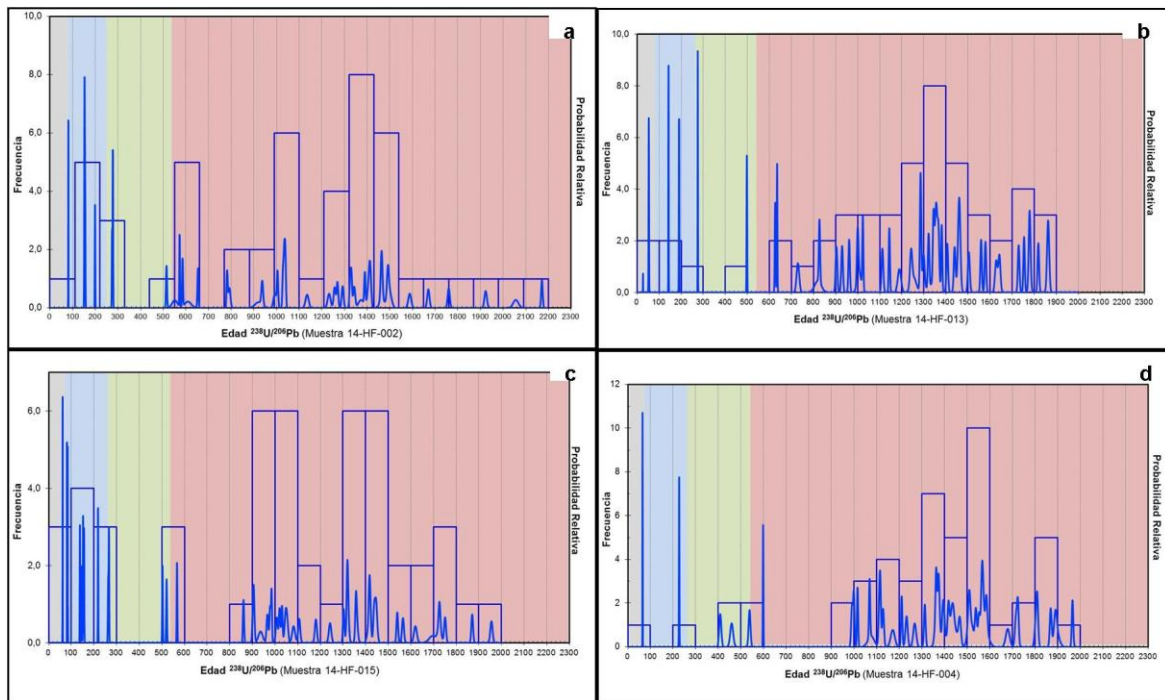
Los análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de Geocronología del Servicio Geológico Colombiano, que cuenta con un espectrómetro de masas con plasma de acoplamiento inductivo (Element2, monolector) con sistema de ablación laser (Photon Machine de 193 nm) LA-ICP-MS. La rutina de análisis se realizaron bajo condiciones de frecuencia y energía del láser de 10Hz y 35%, spot de 35 $\mu$  y los

patrones de referencia utilizados: Plesovice (337 M. a), Fisch Canyon Tuff (28.4 M. a) y FC5 (1099 M. a) analizados por cada 5 análisis de muestra desconocida.

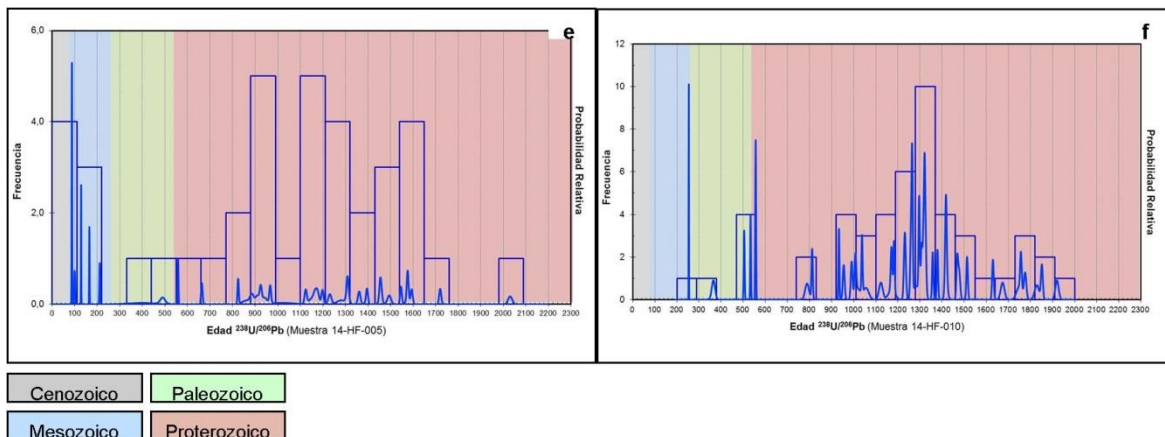
La reducción de datos se realizó utilizando el programa Iolite en IGROpro, se utilizó como tiempos de integración para la línea base 0 s - 30 s y para las muestras y patrones de referencia 31 s - 8 s, tiempos que concuerdan con el tiempo de corrida de los análisis. Los isotopos utilizados para la integración manual son  $^{238}\text{U}$ ,  $^{206}\text{Pb}$  y  $^{204}\text{Pb}$ . Los resultados finales, corresponden a la media de los datos obtenidos luego de aplicar una discriminación de datos a 2 desviaciones estándar.

Las muestras datadas por este método corresponden a las formaciones Picacho (3), Socha Inferior (1) y Guaduas (2). Las Figura 36 y 37 muestra la distribución de edades obtenidas a partir de la relación isotópica  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ , para cada muestra analizada. Los resultados permiten establecer interpretaciones sobre la proveniencia de los sedimentos, como es de esperarse la mayoría de poblaciones de circones corresponden a fuentes de edad Proterozoica y en su mayoría >1000 Ma., como lo son los basamentos cristalinos de la Cordillera Oriental y del Cratón Amazónico; mientras que hay una evidente disminución de cristales provenientes de fuentes de edad Paleozoica.

Por otra parte, hay un contraste entre la Formación Guaduas y Socha Inferior con respecto a la Formación Picacho, ya que esta última presenta con mayor frecuencia poblaciones de circones provenientes de rocas de edad del Mesozoico y Cenozoico, no evidenciadas de forma muy contundente en las Formaciones más antiguas.



**Figura 36.** Histogramas de distribución de edades U/Pb para la Formación Picacho (a - b - c), Formación Socha Inferior (d).



**Figura 37.** Histogramas de distribución de edades U/Pb para la Formación Guaduas (e - f).

#### 4.2.3 Reflectancia en Vitrinita

Por parte del laboratorio de carbones del Servicio Geológico Colombiano, se obtuvo la caracterización de 14 muestras de superficie, las cuales arrojan valores

de reflectancia en vitrinita entre 0.47 – 0.66%Ro (ver Tabla 5, e indicados en la sección estratigráfica). En un rango similar se encuentran un total de 24 muestras tomadas de pozo a diferentes profundidades distribuidas en las dos perforaciones realizadas en el marco de este proyecto (ver Tabla 6). Los valores de reflectancia fueron utilizados para calcular la paleotemperatura, usando la calibración Easy Ro de Sweeney & Burnham (1990); asumiendo una tasa de calentamiento de 1°C por millón de años (1°C/My), se determina que los carbones y el material orgánico alcanzaron una temperatura entre 80 y 110°C, en un aumento progresivo con la profundidad.

La variación de las paleotemperaturas y el registro actual de temperatura medida en pozo permite asumir un gradiente térmico de ~25°C/Km, cuyo valor permite complementar el modelamiento de la historia térmica para la cuenca en el área del Sinclinal de Úmbita.

**Tabla 5.** Reflectancia de vitrinita y paleotemperatura calculada para muestras de carbón de la Formación Guaduas tomadas en superficie.

No de campo/ Referencia	Norte	Este	Localización	Ro(%)	Paleotemperatura (°C) a tasa de 1 °C/My
14-IE-001	1076158	1070348	Mina San Antonio	0,61	101
14-IE-006	1075494	1069549	Fm Guaduas Río Garagoa Manto M1	0,56	95
14-IE-007	1075494	1069540	Fm Guaduas Río Garagoa Manto M2	0,58	97
14-IE-008	1075494	1069534	Fm Guaduas Río Garagoa Manto M3	0,59	98
14-IE-010	1075513	1069506	Fm Guaduas Río Garagoa Manto M4	0,55	94
14-IE-011	1075513	1069498	Fm Guaduas Río Garagoa Manto M6	0,56	95
14-IE-012	1075513	1069493	Fm Guaduas Río Garagoa Manto M6	0,58	97
14-IE-013	1075513	1069485	Fm Guaduas Río Garagoa Manto M8	0,66	109
15804807001	1074474	1073474	Mina La Rosa. Nivel1 sur a 30,0m del nivel principal	0,47	81
15842807002	1068833	1074872	Mina El Sol. Nivel1 sur Manto M6	0,60	99
15842807003	1069694	1074976	Mina Carsol. Nivel1 sur Manto M6	0,63	104
15172807004	1070419	1076352	Mina San Antonio. Manto M4	0,60	99
15172807005	1070415	1076266	Mina San Antonio. Manto M7	0,65	107
15172807006	1070412	1076251	Mina San Antonio. Manto M8	0,55	94

Fuente: Datos del estudio

**Tabla 6.** Reflectancia de vitrinita y paleotemperatura calculada para muestras de carbón de la Formación Guaduas tomadas en pozo Úmbita-1 y Chinavita-1.

No de campo/ Referencia	Norte	Este	Localización	Profundidad (m)	Ro(%)	Paleotemperatura (°C) a tasa de 1 °C/My
15842807026	1067766	1073706	Pozo Umbita1. M13	185,25	0,55	94
15842807027	1067766	1073706	Pozo Umbita1. M12	189,15	0,58	97
15842807028	1067766	1073706	Pozo Umbita1. M11	190,65	0,53	91
15842807029	1067766	1073706	Pozo Umbita1. M8	192,10	0,56	95
15842807007	1067766	1073706	Pozo Umbita1. M10	203,57	0,54	92
15842807008	1067766	1073706	Pozo Umbita1. M9	205,50	0,53	91
15842807009	1067766	1073706	Pozo Umbita1. M6	250,60	0,56	95
15842807010	1067766	1073706	Pozo Umbita1. M5	259,19	0,48	83
15842807011	1067766	1073706	Pozo Umbita1. M3	288,15	0,55	94
15842807030	1067766	1073706	Pozo Umbita1. M2	322,40	0,65	107
15172807023	1070126	1075775	Chinavita-1. Cinta	103,34	0,44	76
15172807012	1070126	1075775	Chinavita-1. M13	233,30	0,49	84
15172807013	1070126	1075775	Chinavita-1. M11	239,93	0,56	95
15172807024	1070126	1075775	Chinavita-1. M10	254,31	0,59	98
15172807014	1070126	1075775	Chinavita-1. M9	282,40	0,59	98
15172807015	1070126	1075775	Chinavita-1. M8	300,00	0,59	98
15172807016	1070126	1075775	Chinavita-1. M7	334,66	0,59	98
15172807017	1070126	1075775	Chinavita-1. M6	412,17	0,61	101
15172807025	1070126	1075775	Chinavita-1. M5	417,09	0,66	109
15172807018	1070126	1075775	Chinavita-1. M4	422,67	0,60	99
15172807019	1070126	1075775	Chinavita-1. Cinta	471,85	0,67	110
15172807020	1070126	1075775	Chinavita-1. M3	477,50	0,60	99
15172807021	1070126	1075775	Chinavita-1. M2	514,50	0,62	102
15172807022	1070126	1075775	Chinavita-1. M1	527,45	0,67	110

Fuente: Datos del estudio

#### 4.2.4 Huellas de fisión en Apatitos

Los cálculos de edad se realizaron con el programa MS-DOS- Zetage (Brandon, 2005), este algoritmo calcula las edades e incertidumbres de distribuciones de edades concordantes y mixtas. Para la determinación de la densidad de trazas espontáneas e inducidas el valor de zeta usado fue  $283.86 \pm 10.47$ .

Adicionalmente, se realizaron medidas de la longitud de trazas de fisión y debido a que el borrado de las trazas de fisión en un apatito no solo depende del aumento de la temperatura y orientación cristalográfica, sino también de la composición química del apatito, las características de corrosión del cristal y en menor grado la presión de confinamiento, se estableció otro parámetro cinético de borrado de trazas de fisión en apatitos, el  $D_{Par}$ . (Donelick *et al*, 2005); éste parámetro se refiere al diámetro máximo de la figura formada por la intersección de una traza con la superficie pulida, denominada figura de corrosión. Generalmente en el caso de tener valores bajos de  $D_{Par}$  ( $\leq 1.75 \mu m$ ) el borrado de las trazas de fisión es



rápido, mientras que en el caso contrario (valores  $\geq 1.75 \mu\text{m}$ ) el borrado de las trazas es lento.

En la Tabla 7 se presenta en resumen las edades obtenidas, longitudes determinadas y demás parámetros calculados a partir del conteo de huellas espontáneas e inducidas; además de diferenciar poblaciones de acuerdo con la distribución de edades.

**Tabla 7.** Edades obtenidas por análisis de trazas de fisión en apatitos para la Formación Socha Superior

UNIDAD	ESTE	NORTE	ELEVACION	EDAD ESTRATIGRAFICA	NUMERO DE GRANOS	Ns	Rhos	Rhol	Ni	U (ppm)	P $\chi^2$	Edad (Ma)	$\pm$ (Ma)	Dpar ( $\mu\text{m}$ )	Numero de Dpar medidos	Longitudes de huellas	Error	Numero de longitudes medidas
Socha superior	1074228	1070143	1904	54 $\pm$ 5	40	243	1.40E+05	4.23E+05	735	5.6	8%	55.9	10.8	2,30	41	9.93	1.14	9

Fuente: Datos del estudio

(Rhos: densidad de trazas espontáneas por  $\text{cm}^2$ , Ns: trazas espontáneas, Rhol: densidad de trazas inducidas por  $\text{cm}^2$ , Ni: trazas inducidas, U: concentración de uranio,  $P\chi^2$ : probabilidad del test chi cuadrado con un intervalo de confianza del 95%.)

#### 4.2.5 Isótopos Estables $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$

El estudio de isótopos de estables de carbono se desarrolló en el laboratorio de isótopos estables en muestras sólidas (LIES) del Servicio Geológico Colombiano, se analizaron 11 muestras de las cuales 10 corresponden a carbones de la Formación Guaduas y 1 de shales ricos en materia orgánica de la Formación Une; aunque fue posible realizar análisis de reflectancia en vitrinita para algunas de estas mismas muestras, no todas cuentan con un valor  $R_o$  y una paleotemperatura asignada.

Los valores de fraccionamiento isotópico reportados fueron calculados con base a la curva de calibración realizada con materiales de referencia certificados adquiridos de la IAEA. Los estándares utilizados fueron: IAEA – LSVEC ( $\delta^{13}\text{C}$ : -46.6%), EMA – P1 ( $\delta^{13}\text{C}$ : -27.85%), NBS – 18 ( $\delta^{13}\text{C}$ : -5.014%), cada estándar se corrió por triplicado (ver Tabla 8).

**Tabla 8.** Resultados de isótopos estables de carbono (Fraccionamiento  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) y su relación con los valores de reflectancia en vitrinita y paleotemperatura calculada.

No Muestra	Resultados $\delta^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (‰)	Ro (%)	Paleotemperatura (°C) a tasa de 1 °C/My
14-IE-001	-26,17 ± 0,12	0,61	101
14-IE-002	-24,97 ± 0,02		
14-IE-004	-27,24 ± 0,09		
14-IE-006	-28,06 ± 0,20	0,56	95
14-IE-008	-26,55 ± 0,17	0,59	98
14-IE-009	-25,26 ± 0,16		
14-IE-010	-26,29 ± 0,01	0,55	94
14-IE-011	-26,01 ± 0,06	0,56	95
14-IE-012	-26,66 ± 0,28	0,58	97
14-IE-013	-26,16 ± 0,07	0,66	109
14-IE-014	-26,61 ± 0,21		

Fuente: Datos del estudio

Los resultados de fraccionamiento isotópico  $\delta^{13}\text{C}$ , varían entre -24‰ y -28.06‰ (ver Tabla 8), donde el valor más negativo se encuentra en el manto más reciente; a medida que se va profundizando en la columna los valores se van haciendo cada vez menos negativos, es decir, va aumentando la concentración del isótopo pesado, esto sucede hasta la mitad de la unidad estratigráfica. A partir de allí, se observan una serie de fluctuaciones que indican mayor concentración del isótopo pesado; siendo para el límite inferior un fraccionamiento isotópico de -24.97.

Por otro lado, la muestra tomada en los shales carbonosos tiene un valor de -26.74; esto podría estar relacionado con aumento en la madurez del carbón, siendo coherente con los resultados de reflectancia de vitrinita y/o con cambios en los ambientes deposicionales.

En cuanto a la formación de metano, los valores no muestran ningún cambio significativo en el valor de  $\delta^{13}\text{C}$  en profundidad relacionado con la producción del gas, si se tiene en cuenta que los valores varían por debajo del 5‰ (Sackett, 1978).

### 4.3 EVOLUCIÓN TÉRMICA

Inicialmente para establecer los procesos que pudieron dar origen al gas metano asociado a los carbones de la Formación Guaduas en este sector se plantean tres hipótesis:

- El carbón en la Formación Guaduas alcanzó su rango actual durante la fase inicial de enterramiento de sedimentos y calentamiento relacionado con evolución de la cuenca a finales del Mesozoico y principios Cenozoico.
- El carbón en la Formación Guaduas alcanza sus condiciones de madurez durante eventos de deformación relacionados con la formación de la Cordillera Oriental, seguido de la posterior exhumación.
- La formación de carbón en la Formación Guaduas es el resultado de la combinación de calentamiento y enterramiento durante la fase de margen pasivo y la deformación y enterramiento durante la tectónica convergente de la formación de la Cordillera Oriental.

Con el fin de probar estas tres hipótesis en primer lugar, se estima la profundidad máxima de enterramiento de la Formación Guaduas como consecuencia de la sedimentación durante la fase de margen pasivo; a partir del levantamiento de los espesores en la sección estratigráfica y reconstrucciones estratigráficas en la Cordillera Oriental.

#### 4.3.1 Antecedentes

Bayona *et al.* (2013), plantea que la profundidad de enterramiento total de la Formación Guaduas estuvo entre 900 -1100m aproximadamente a 38 Ma. Sin embargo, el enterramiento adicional puede haber ocurrido entre 38 Ma y la formación de la Cordillera Oriental. Asumiendo dicha profundidad de enterramiento de cerca de 1 km, sería insuficiente para generar el calor suficiente para la formación de carbón bituminoso, dado gradientes geotérmicos normales de 20 a 30°C/km.

Estudios realizados por Parra *et al.* (2009), sobre el eje axial de la Cordillera Oriental sobre la Mesa de Bogotá, en los que se analizaron cinco muestras de areniscas de la Formación Socha Superior obtienen edades AFT que oscilan entre los  $73.3 \pm 3.6$  a  $38.0 \pm 3.5$  Ma. Todas las muestras menos una, tienen edades discordantes y todas son cercanas o más viejas que la edad de depositación. Los valores de reflectancia en vitrinita de esta unidad oscilan entre 0.43 – 0.52%Ro (Mayorga & Vargas, 1995), correspondiendo a picos máximos de temperatura de 80 – 95°C, indicando que las edades están parcialmente reseteadas y que la

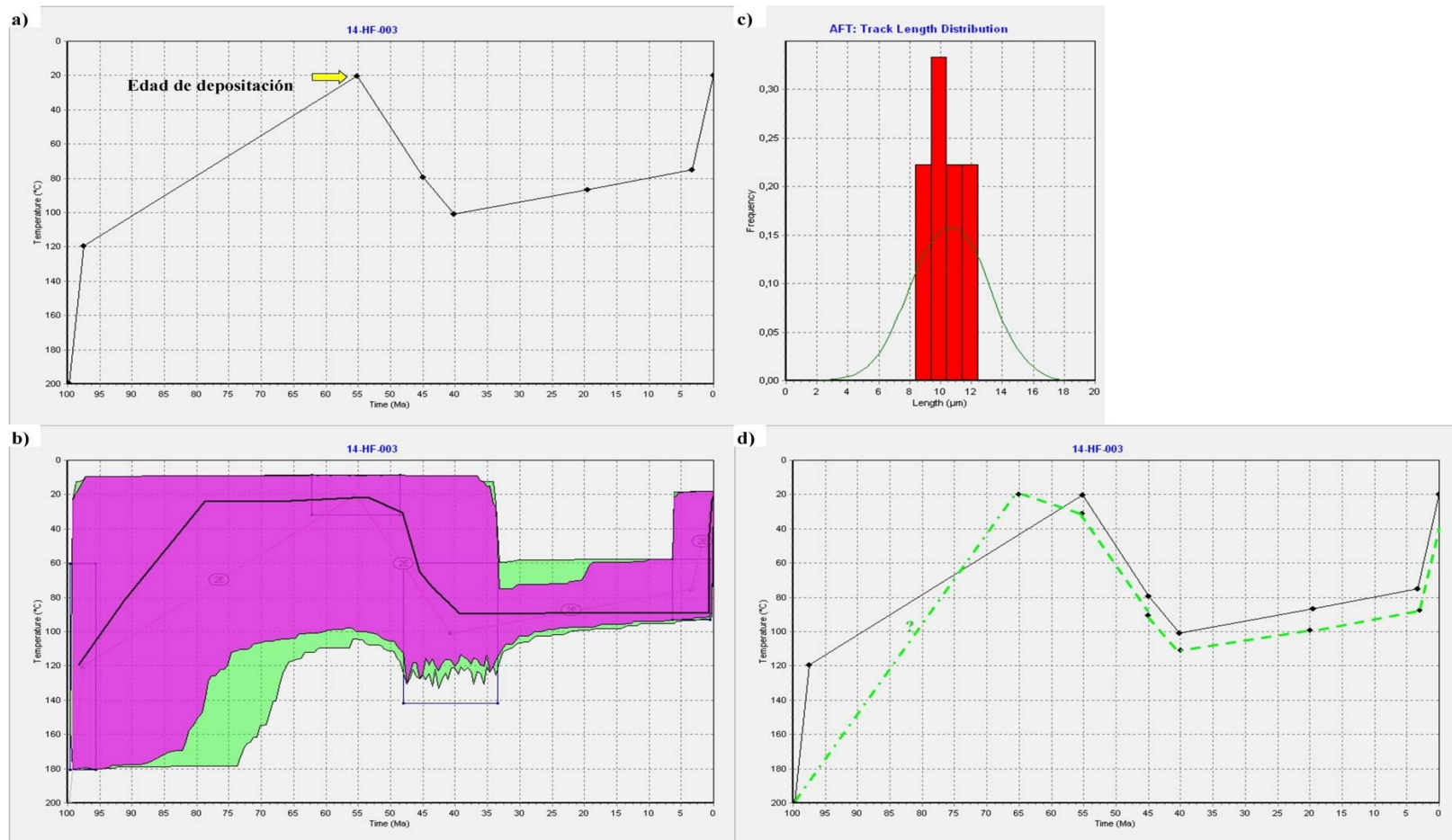
exhumación se produjo desde profundidades por encima de la zona de borrado total.

De la Formación Guaduas no existen estudios antecedentes de huellas de fisión, ya que las litologías que ofrece esta unidad hacen que sea prácticamente imposible obtener muestras con contenidos de apatitos que tengan el tamaño necesario para la aplicación de la técnica. Sin embargo, los análisis térmicos que se reportan de la Formación Guaduas se hacen analizando los valores de reflectancia de vitrinita de los mantos de carbón que hacen parte de la secuencia estratigráfica (e. g. Bayona et al., 2013; Parra et al, 2009a y b); esto se hace insuficiente, ya que el valor de  $R_o$  indica el pico máximo de temperatura alcanzado en el proceso de enterramiento, pero no ofrece información del momento cuando alcanzó dicha temperatura máxima y cuánto tiempo estuvieron las rocas sometidas a esas condiciones.

#### 4.3.2 Modelo Térmico

El modelamiento de la muestra de la Formación Socha Superior (14-HF-003) fue realizado usando el programa de modelamiento HeFTy, versión 1.8.2 por Ketcham, (2005). Este software requiere la combinación de edades de AFT en los granos, longitud de huellas, valores de  $D_{Par}$  y valores de reflectancia de la vitrinita (ver Tabla 7).

Se usaron los límites del modelo basados en el conocimiento de la historia geológica de la región y de acuerdo con las diferentes poblaciones de edades obtenidas (Figura 38a); particularmente fueron usadas cuatro restricciones para el modelo: (1) (60°C – 180°C) entre 100 y 60 Ma que permite un amplio rango de la historia termal pre-deposicional incluyendo la residencia por encima y debajo de la isoterma de borrado total en las áreas fuente que bien pueden ser la Cordillera Central y el Cratón de Guyana; (2) (10°C – 30°C) que refleja el tiempo de depositación para la Formación Socha Superior (Paleoceno – Eoceno temprano, 63 – 48 Ma); (3) (60°C – 140°C) entre la depositación y ~ 15 Ma, que permite el calentamiento debido a la temperatura de enterramiento alcanzada más allá de la temperatura pico de enterramiento estimada; (4) (60°C – 95°C) entre 6 y 3 Ma que es el tiempo estimado en otros estudios (e. g. Parra et al, 2009a y b) en el que se produce un evento de levantamiento rápido para la Cordillera Oriental de Colombia.



**Figura 38.** Modelamiento térmico a partir de análisis de huellas de fisión. (a) Trayectoria T-t para la muestra 14-HF-003 de la Fm. Socha Sup. (b) Modelamiento inverso en HeFTy, el área magenta representa las trayectorias de mejor ajuste. (c) Histograma de distribución de las longitudes de trazas, distribución normal ajustada al modelo. (d) Modelo térmico incluida la trayectoria hipotética (en verde) de la Fm. Guaduas.

#### 4.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La reconstrucción de la evolución térmica de la cuenca del sinclinal de Úmbita involucra aspectos adicionales, determinados con el uso de las técnicas isotópicas complementarias. De esta manera, los resultados de análisis como la datación de circones mediante U/Pb que permiten realizar interpretaciones sobre proveniencia, indican que las rocas circundantes de edades proterozoicas, mesozoicas y cenozoicas se encontraban exhumadas, posiblemente controlando la morfología de la cuenca y definiendo las áreas de aporte; que en general corresponderían a basamentos cristalinos, tanto de la Cordillera Oriental y Central como del Cratón Amazónico. Sin embargo, estas son solo algunas aproximaciones que confirman estudios anteriores y para establecer con certeza que bloques se encontraban exhumados en el momento de depositación de las formaciones que conforman la cuenca en el sinclinal de Úmbita, se requieren análisis enfocados en proveniencia, que incluyan análisis complementarios y permitan realizar este tipo de determinaciones.

Así mismo, la historia previa y posterior a la depositación se ha definido con base en los análisis de huellas de fisión. En el momento en el que los cristales de apatito son depositados en la cuenca tienen un número desconocido de trazas heredadas, que se han generado de acuerdo con la historia de enfriamiento de las rocas de las cuales provienen. Cuando los sedimentos han sido depositados y empiezan a enterrarse, las trazas de fisión en los apatitos comienzan a disminuir su longitud y su densidad, al experimentar temperaturas entre 60°C y 110°C, debido a que cambian las condiciones de temperatura y esto conlleva a que alcancen la zona de borrado parcial (Partial Annealing Zone – PAZ); como resultado del borrado, la edad de trazas de fisión es menor a la de depositación. En ausencia de otros procesos termales como plutonismo o flujo hidrotermal, el enterramiento de la roca a temperaturas menores que las de la zona de borrado parcial resulta en la preservación de la longitud de las trazas y la edad heredada, de forma que la edad de huellas de fisión será más antigua o muy cercana a la edad de depositación de la roca.

En orden a proveer una significativa evaluación del patrón de enterramiento y exhumación de la Formación Guaduas y dado que solo se logró obtener una sola muestra con apatitos, perteneciente a la Formación Socha Superior, que estratigráficamente corresponde a un nivel por encima de la Formación Guaduas; se integraron los datos de AFT de la formación Socha Superior y reflectancia de vitrinita de la Formación Guaduas obtenidos a lo largo de la transecta ilustrada en la Figura 30.

El detalle de los datos para el análisis de AFT obtenidos es presentado en la Tabla 7. Los datos de reflectancia de vitrinita (%Ro) usados para restringir la temperatura pico de enterramiento son mostrados en las Tablas 5 y 6.

Las areniscas de la Formación Socha Superior (Eoceno Temprano), presentan una edad de enfriamiento AFT de  $53.2 \pm 4.4$  M. a, muy cercana a la edad de depositación de  $\sim 54 \pm 5$  M. a. Sin embargo las edades AFT muestran una gran dispersión, los granos tienen un rango de edades de 16.3 a 107.4 M. a; lo cual permite interpretar que las edades AFT están parcialmente reseteadas, reflejando para esta unidad estratigráfica un enterramiento insuficiente para que ocurra borrado total de las huellas de fisión en los apatitos, tras la depositación en el Eoceno. Para establecer el tiempo de inicio de enfriamiento en el Sinclinal de Úmbita, se realizó un modelamiento térmico inverso de la muestra del Eoceno temprano de la Formación Socha Superior, combinando AFT y datos de reflectancia ( $R_o \sim 0.7\%$ ).

En este caso en particular, mientras los datos AFT limitan los patrones de enfriamiento en el rango de temperaturas en el cual las huellas de fisión son preservadas en la porción más joven de la trayectoria  $t - T$  ( $< 120^\circ \text{C}$ ), las temperaturas pico de enterramiento basado en datos de  $\%R_o$  ( $\sim 110^\circ \text{C}$ ) permite la extrapolación de este patrón en lo más antiguo al inicio de la historia de enfriamiento. La trayectoria  $t - T$  que muestra el mejor ajuste a los datos, sugiere una tasa de enfriamiento constante y baja cercana a  $0.7^\circ \text{C/M. a}$ , que va desde la isoterma de  $100^\circ \text{C}$  a 40 M. a; a partir de los  $\sim 3$  M. a se evidencia un enfriamiento rápido a una tasa de  $\sim 18^\circ \text{C/M. a}$  desde la isoterma de  $75^\circ \text{C}$  (Figura 38a y 38b).

Esta información indica que la muestra de la Formación Socha Superior fue exhumada desde profundidades por encima de la isoterma de borrado total y que la edad AFT es parcialmente reseteada; lo cual es coherente con los valores de longitudes de huellas que miden por debajo de las  $13 \mu\text{m}$  y con el valor promedio del DPar de  $2,55 \geq 1,75 \mu\text{m}$  (Figura 38c), indicando que el borrado de las trazas fue lento. La edad más antigua que se observa en el modelo dada por la trayectoria de mejor ajuste, es correspondiente al Campaniano - Paleoceno, sugiriendo una potencial contribución de apatitos debido al levantamiento de la Cordillera Central (Gómez et al., 2003).

El enfriamiento de la muestra analizada de la Formación Socha Superior estuvo precedido por un calentamiento de hasta  $105^\circ \text{C}$ , ya que a partir de la isoterma de los  $100^\circ$  inicia su enfriamiento. Teniendo en cuenta que en la zona de estudio del área del Sinclinal de Úmbita, los carbones de la Formación Guaduas se localizan estratigráficamente  $\sim 600$  metros por debajo de la muestra analizada y dada la evolución geológica regional, relacionada a una secuencia sedimentaria de tipo foreland (ante país) para el Cenozoico, en el área de la Sabana de Bogotá que se extiende hasta Boyacá, se asume que las dos unidades estratigráficas tienen una historia térmica similar relacionada a la deposición, enterramiento y exhumación desde los 60 M. a hasta el presente (Figura 38d).

De la Formación Guaduas no se obtuvieron muestras para datar por AFT, sin embargo los valores de reflectancia de vitrinita obtenidos de las muestras de

carbón se pueden correlacionar al pico máximo de temperatura alcanzada durante el enterramiento (calibración de Sweendey & Brunham, 1990), estimándose que los carbones y el material orgánico alcanzaron una temperatura entre 80 y 110°C, en un aumento progresivo con la profundidad. Estos datos para la Formación Guaduas son coherentes con el modelo térmico de la muestra de la Formación Socha Superior; lo cual permite concluir que los carbones de la Formación Guaduas alcanzaron mayores profundidades de enterramiento y temperaturas hasta 110°C, que corresponde a la zona de catagénesis con una residencia dentro de esta zona de ~30 M. a, favoreciendo la producción de nitrógeno, dióxido de carbón y gas metano, cuya proporción depende de la composición química de las biomoléculas fuente y de las condiciones de cocción.

El tiempo de residencia de los carbones en la zona de catagénesis disminuye la probabilidad de existencia de gas metano de tipo biogénico, el cual se produce en la zona de diagénesis que se localiza por debajo de la isoterma de los 50°C y de acuerdo al modelo térmico, extrapolado a la Formación Guaduas el tiempo de residencia de los carbones se estima que no supera los 5 M.a.

El fraccionamiento isotópico del  $^{13}\text{C}$  junto con los contenidos de azufre en carbones son importantes marcadores ambientales, que dan indicios del ambiente de depositación y del tipo de material parental a partir del cual se formó. El isotopo  $^{13}\text{C}$  del carbono actúa como un biomarcador que aporta información de las condiciones ambientales, climatológicas, tipo y humedad del suelo, además del tipo de vegetación que allí se desarrolló. En el caso de los organismos fotosintetizadores, estos discriminan de manera preferencial las moléculas de  $\text{CO}_2$  con  $^{12}\text{C}$ , por lo que el valor  $\delta^{13}\text{C}$  en la materia orgánica terrestre y en la vegetación es menor que la del aire, con valores que varían dependiendo el tipo de vegetación.

Las plantas del grupo C3, que corresponde a las plantas superiores, cubren el 85% de las plantas del planeta y se caracterizan porque el primer compuesto que fabrican tiene 3 átomos de carbón, con un valor  $\delta^{13}\text{C}$  entre -22 y -33. Las del tipo C4 en su mayoría son hierbas tropicales tienen unos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  mas altos, entre -8‰ y -18‰ (Singh et al, 2012 y Uriarte, 2003). De acuerdo con Uriarte (2003), las concentraciones de  $^{13}\text{C}$  son bajas tanto en el continente como en el mar, pero tienden a ser más bajas en el continente debido a la influencia de las plantas terrestres; cuyos contenidos como ya se mencionó, tienden a ser muy bajos.

Para este estudio, los resultados de fraccionamiento isotópico  $\delta^{13}\text{C}$  están aportando información principalmente del ambiente de depositación en el cual se formaron los carbones de la Formación Guaduas; ya que según estudios realizados por Mass et al. (1978; en Whiticar, 1996) y Redding et al. (1980), la variación de los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  en carbones por debajo del rango de meta-



antracita, no es significativa a medida que aumenta la madurez y se presenta generalmente en el rango entre  $-22\text{‰}$  y  $-27\text{‰}$ ; mientras que para altos rangos metamórficos hay un enriquecimiento del isótopo más pesado. Adicionalmente, de acuerdo con la paleotemperatura estimada a partir de la reflectancia de la vitrinita y en el análisis con trazas de fisión; se determina una temperatura menor a  $200^{\circ}\text{C}$  (Kandel, 1964; Koepp, 1979, en Singh et al., 2012), indicando que el sistema se mantuvo estable.

En general los contenidos de azufre, para los carbones de superficie analizados, son bajos y en su mayoría corresponden a azufre orgánico (Tabla 9); por lo tanto, los carbones de la Formación Guaduas en el sinclinal de Úmbita se clasifican como carbones con bajo a medio contenido de azufre (Chou, 2012); donde la mayor parte se concentra durante la formación de la turbera (Casagrande, 1987; Dai et al., 2002; Hower et al., 1994; Staub, 2002, en Chou, 2012). De acuerdo con Chou (2012), las turberas de agua dulce presentan bajos contenidos de azufre y a medida que hay interacción de aguas saladas, el contenido de azufre aumenta.

**Tabla 9.** Resultados análisis de carbones, concentración de azufre.

Muestra	Azufre (%) masa	Azufre pirítico (%) masa	Azufre sulfato (%) masa	Azufre orgánico (%) masa
<b>Norma ASTM D</b>	<b>4239-08</b>	<b>2492-02(07)</b>	<b>2492-02(07)</b>	<b>2492-02(07)</b>
14-IE-001	0,84	0,00	0,00	0,83
14-IE-006	1,88	0,59	0,05	1,24
14-IE-007	0,57	0,01	0,00	0,55
14-IE-008	0,96	0,04	0,00	0,92
14-IE-010	1,01	0,10	0,11	0,80
14-IE-011	1,29	0,43	0,11	0,76
14-IE-012	1,23	0,05	0,02	1,16
14-IE-013	0,20	0,04	0,04	0,12
14-IE-014	0,86	0,04	0,01	0,81

Fuente: Datos del estudio

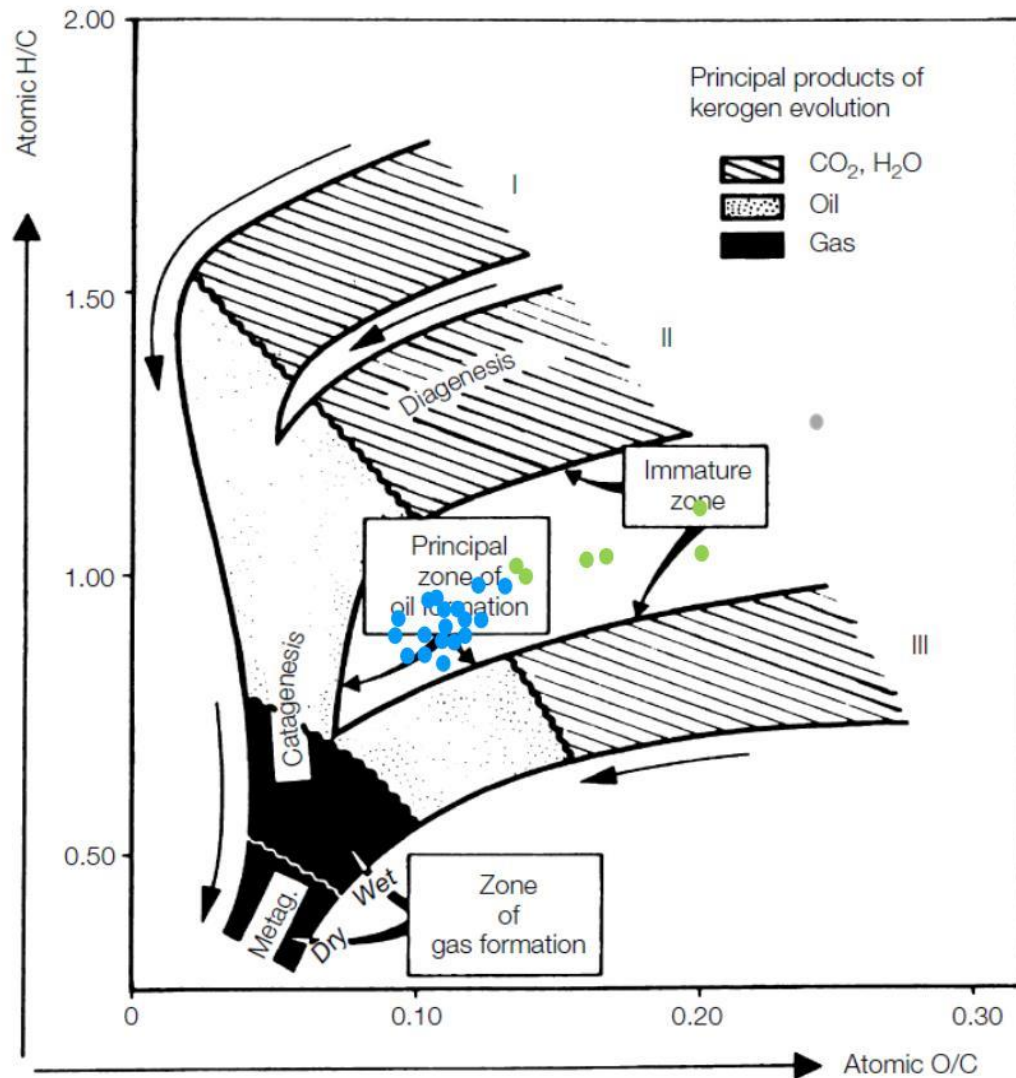
De acuerdo con los resultados fisicoquímicos (Tabla 9, Figura 35), se observa una ligera variabilidad en los datos. El bajo contenido de azufre indica que los carbones podrían haberse depositado en un ambiente de agua dulce, con una muy baja influencia marina, asociados posiblemente a llanuras de inundación aluvial y pantanos. Lo anterior es coincidente con lo concluido en estudios anteriores (e.g. Amaya et al., 2010; Guatame & Sarmiento, 2004). No obstante, los

resultados de análisis llevados a cabo en muestras de pozo contienen valores semejantes a las muestras en superficie y frente de mina, presentando bajas concentraciones tanto en azufre total como en el azufre orgánico, como indicador de la baja actividad orgánica.

Los resultados obtenidos en los análisis de isótopos de carbono y las concentraciones de azufre, definen como principal materia parental para la formación del carbón de la Formación Guaduas en el área del sinclinal de Úmbita, plantas del tipo C3, que corresponden a plantas arbóreas típicamente de ambientes húmedos asociados a zonas de inundación aluvial y pantanos. Así mismo, dicho materia parental de plantas tipo C3, corresponden al kerógeno húmico o tipo III de acuerdo con el diagrama de van Krevelen (Figura 39).

Basados en los análisis de petrografía que arrojan la vitrinita (85%) como mayor componente del carbón y en las relaciones atómicas de H/C y O/C (determinadas en materia orgánica) graficadas en el esquema de evolución del kerógeno de van Krevelen (Figura 39) a partir de los análisis fisicoquímicos de los carbones, se observa que la mayoría de los valores obtenidos se encuentran dentro del rango de formación de carbones y ligeramente por encima de la formación de gases en la fase de catagénesis. Algunas muestras señaladas en círculos verdes presentan relaciones atómicas propias de la etapa de diagénesis, estos valores corresponden a muestras de los mantos más someros localizadas dentro de los primeros 250 metros de la perforación.

Sin embargo, según el reporte de cromatografía realizado por la Universidad UPTC de Sogamoso, donde se describe que en los cromatogramas además de los picos correspondientes al N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, se encuentra un pico a 2.6 min el cual puede corresponder a etano; lo cual contribuye a que no se alcance una suma del 100%; confirmando la existencia de gas húmedo, basados en la definición de gas húmedo como todos los gases que son más pesados que el metano representados a partir del C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>+ (Hunt, 1996). El hecho de que el gas se haya formado ligeramente por encima de la zona de formación de gases, en la fase de catagénesis, se debe probablemente a que los tipos de hidrocarburos generados durante el proceso de maduración, dependen de: la composición química de las biomoléculas del material parental, de las condiciones de cocción y de las condiciones geológicas de la cuenca sedimentaria; las cuales hacen que no siempre los productos generados en el proceso de maduración, se ubiquen dentro de la trayectoria de maduración de los diferentes tipos de kerógeno.

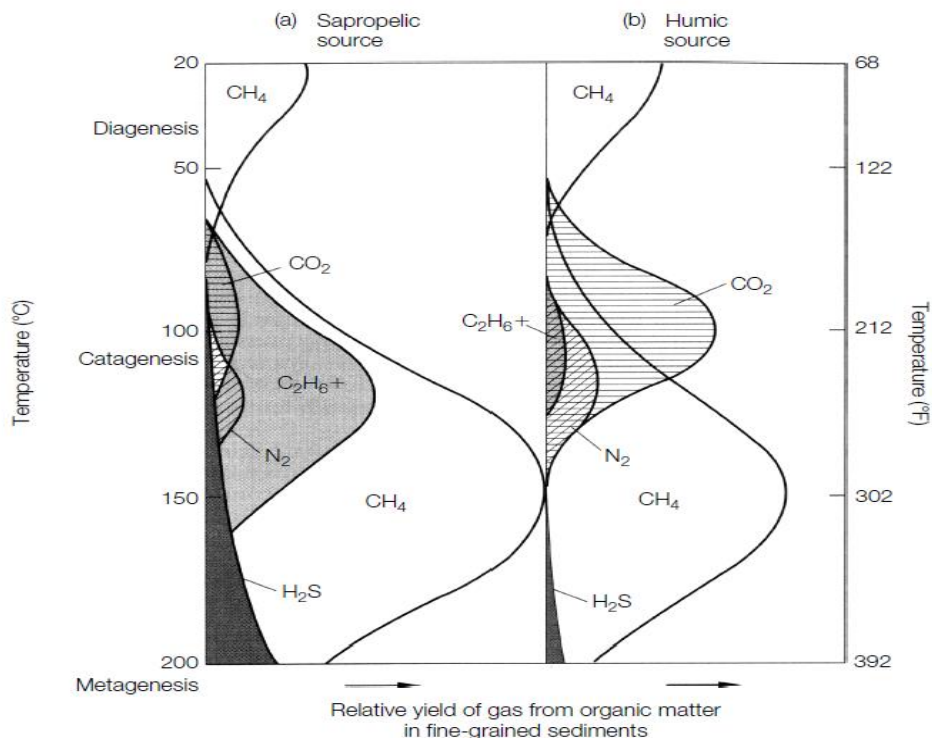


**Figura 39.** Esquema de evolución del kerógeno de los carbonos de la Formación Guaduas en el sinclinal de Úmbita, representado mediante el diagrama de van Krevelen. Se muestran tres tipos de kerógenos, el tipo III corresponde a origen de restos de vegetación continental. Tomado de (Tissot & Welte, 1984).

Al ubicar los valores obtenidos por cromatografía en el laboratorio del Servicio Geológico Colombiano (Ver Tabla 19, Numeral 6.2 Cromatografía), en el diagrama de producción relativa de gas a partir de materia orgánica (Figura 39), asumiendo que la fuente parental para los carbonos de la Formación Guaduas es húmica según los datos de  $\delta^{13}\text{C}$ , se puede observar que los valores que muestran mayor contenido de gas metano (80.9%, 84.2% y 84.9%) corresponde a bajos valores de  $\text{N}_2$ , en el rango entre los 110°C y los 120°C, zona de catagénesis; y que los valores que muestran menor contenido de gas metano (38.9% y 56.7%)

corresponde a valores medios de  $N_2$  (55.1% y 30.2%) en el rango entre los  $90^\circ C$  y los  $100^\circ C$ . No se tiene en cuenta en el análisis de las curvas de producción de gases el contenido de  $CO_2$ , ya que en el aparte de Cromatografía (Numeral 6.2) se reporta que el uso de la columna (Varian CP-Molsieve 5Å, 0.53 mm x 25 m fused silica constituida por un tamiz molecular de 5 Å) no es la apropiada para separar mezclas de gases que contengan dióxido de carbono, lo cual implica que el dióxido de carbono se retuvo en el seno de la columna, generando errores en las determinaciones, conllevando a resultados considerablemente diferentes a los obtenidos por el laboratorio del SGC.

Nótese en la Figura 40 que la producción de gas metano biogénico a partir de fuentes húmicas es producida en la diagénesis, pero es mucho menor que el producido durante la catagénesis. La presencia de gas  $N_2$  asociado con metano, aún sin tener en cuenta el  $CO_2$ , confirma que estos fueron generados en la fase de catagénesis; descartando la existencia de gas metano biogénico, puesto que el  $N_2$  y  $CO_2$  no se producen durante la fase de diagénesis.



**Figura 40.** Producción relativa de gas a partir de materia orgánica enterrada en sedimentos de grano fino como una función de la temperatura. (a) Fuente sapropelica y (b) fuente húmica. El  $C_2H_6+$  representa los gases hidrocarbonados más pesados que el metano y es colectivamente llamado gas húmedo. Tomado de Hunt (1996) .

Este análisis difiere de lo expuesto en el aparte de Cromatografía (Numeral 6.2), que asume una posible contaminación con gas Nitrógeno descrita así: “Se puede observar que 3 de las 5 muestras analizadas en el laboratorio del SGC presentan concentración de metano superior al 80%, mostrando con esto que el compuesto prominente en el gas asociado al carbón corresponde al metano. Los canister 4 de Úmbita-1 y 10 de Chinavita-1, ostentan una cantidad considerable de Nitrógeno 55,1% y 30,2 % (Tabla 19, Capítulo 6), lo cual puede ser consecuencia de la contaminación debida al aire atmosférico, debido a que en el momento del muestreo se recolectó escasa cantidad de gas en estos canister”. Como se puede observar en la curva de producción de gases de metano y nitrógeno (Figura 40), en los procesos de maduración de la materia orgánica, la relación entre estos dos gases se puede generar en la zona de catagénesis, como las reportadas en la Tabla 19, Capítulo 6, descartando de esta manera la posibilidad de contaminación.

## 5. CARACTERIZACIÓN DE CARBONES

En este capítulo se presentan y se discuten la composición y el comportamiento de los carbones de acuerdo con los resultados de los diferentes análisis, para 30 muestras del sector Úmbita – Chinavita del área GMAC Úmbita - Rondón.

Los diferentes análisis se realizaron bajo las metodologías que están documentadas en los métodos de ensayo de la Dirección de laboratorios del Servicio Geológico Colombiano, basados en las normas internacionales ASTM Volumen 05.06, Gaseous Fuels; Coal and Coke. La Tabla 10 presenta la metodología empleada para los análisis de los carbones.

**Tabla 10.** Relación de los métodos de ensayos empleados para los análisis.

DETERMINACION	FUNDAMENTO	EQUIPOS	NORMA
DETERMINACION AUTOMATICA DEL ANALISIS PROXIMO (para carbones)	Se determinan los contenidos de humedad residual, materia volátil, cenizas y carbono fijo mediante la pérdida de peso de las muestras después del calentamiento en un ambiente rigurosamente controlado de temperatura, atmósfera, peso y tipo de muestra con un equipo termogravimétrico	Analizador LECO TGA-601	ASTM D 7582-10
DETERMINACION DE VALOR CALORIFICO BRUTO DE CARBON Y COQUE CON CALORIMETRO ISOPERIBOL	Se quema una muestra de carbón, normalmente 1 gramo en una bomba calorimétrica en condiciones normalizadas; se determina el aumento de temperatura producido en el calorímetro y se calcula el poder calorífico bruto a volumen o presión constante conociendo la capacidad calorífica efectiva del sistema y efectuando las correcciones termoquímicas necesarias.	-Calorímetro Isoperibol PARR 6200. - Calorímetro LECO AC 600.  -Balanza Analítica SARTORIUS.	ASTM D5865-11a
DETERMINACIÓN DE AZUFRE TOTAL EN CARBÓN Y COQUE MÉTODO DE COMBUSTIÓN A ALTA TEMPERATURA Y DETECCIÓN INFRARROJO	La muestra se quema en un horno tubular a una temperatura mínima de 1350 °C, en una corriente de oxígeno para oxidar el azufre. La humedad y las partículas se eliminan del gas por medio de trampas de perclorato de magnesio anhidro. La corriente de gas pasa a través de una celda en la cual el SO <sub>2</sub> formado se mide en un detector de absorción infrarroja	-Analizador de Azufre LECO S-144 Balanza - Analítica SARTORIUS, con interface	ASTM D4239 – 12a

DETERMINACION	FUNDAMENTO	EQUIPOS	NORMA
DETERMINACIÓN DEL INDICE DE HINCHAMIENTO LIBRE DE CARBÓN	Es un ensayo a pequeña escala, para obtener información sobre las propiedades de hinchamiento libre del carbón. El método se emplea como un indicativo preliminar de las características plásticas de un carbón.	-Horno eléctrico -Controlador eléctrico -Balanza analítica. -Cabinas de extracción	ASTM D720 – 91 (REAPROBADA 2010)
DETERMINACION DE INDICE DE MOLIENDA POR MOLINO HARDGROVE	La muestra a analizar, recibe una cantidad definida de energía de molienda en un mini pulverizador y el cambio en tamaño del producto pulverizado se determina por tamizado. La consistencia de tamaño resultante se emplea para producir un índice relacionado con la facilidad de molienda (Índice de molienda Hardgrove, IHG).	-Triturador -Rotap -Molino Hardgrove -Tamices Estándar -Estufa de Secado -Balanza Analítica	ASTM D409 / D409M – 11aε1
DETERMINACIÓN INSTRUMENTAL DE CARBONO, HIDRÓGENO Y NITRÓGENO	La conversión del carbono, hidrógeno y nitrógeno en sus gases correspondientes a (CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, y NO <sub>x</sub> ) se produce durante la combustión de la muestra a una temperatura elevada cercana a 950°C en atmósfera de oxígeno. Los productos de combustión que pueden interferir con el análisis de gases en la posterior se eliminan. Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ) se reducen a N <sub>2</sub> antes de la detección. El carbono dióxido vapor de agua y nitrógeno elemental en la corriente de gas están determinados por los procedimientos de detección instrumentales apropiados. El método de detección para C e H es por absorción infrarroja y para N por conductividad térmica.	-Analizador LECO TruSpec CHN. -Balanza Analítica, con interface integrada al analizador LECO.	ASTM D5378-08
DETERMINACION DE FORMAS DE AZUFRE EN CARBÓN ASTM D2492 – 02(2007) (AZUFRE PIRITICO, AZUFRE SULFATO Y AZUFRE ORGANICO)	Este método provee una separación del azufre asociado al carbón en dos formas comúnmente reconocidas: pirítico y sulfato. Extracción con ácidos y determinación por absorción atómica (azufre pirítico) y gravimetría (azufre sulfato) respectivamente. El azufre orgánico se calcula por diferencia.	-Balanza analítica -Plancha de calentamiento eléctrica, con regulador de temperatura. -Mufla eléctrica, capaz de mantener la temperatura a 800°C ± 25 °C. Para calcinar el BaSO <sub>4</sub> . -Espectrofotómetro de absorción atómica.	ASTM D2492-90 D2492 – 02(2007)
DETERMINACION DE GRAVEDAD ESPECIFICA VERDADERA IN HOUSE	La relación de la masa de un volumen de carbón o coque pulverizado, seco y libre de aire, a la de un volumen igual de agua, corresponde a la gravedad específica verdadera. Se determina, mediante pesadas de un balón aforado con agua y luego, con agua más muestra, desplazando el aire de la muestra mediante ebullición. Es esencial el control de la temperatura,	-Balanza Analítica. -Plancha de calentamiento con agitación	ASTM y D167-93

DETERMINACION	FUNDAMENTO	EQUIPOS	NORMA
DETERMINACION HUMEDAD DE EQUILIBRIO	Equilibrar el carbón con humedad relativa del 96% a 30°C y determinación de la humedad por pérdida de peso. La humedad de equilibrio se considera igual a la humedad de lecho, excepto para algunos carbones de bajo rango, en los cuales la humedad de equilibrio es inferior a la humedad de lecho	-Cuarto termostataado a una temperatura de 30°C. -Bomba de vacío. -Agitador mecánico. -Estufa de Secado - Balanza Analítica	ASTM D1492-93 D1412 - 07
DETERMINACIÓN DE ELEMENTOS MAYORES Y MENORES EN CENIZAS DE CARBÓN Y COQUE POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X	El concepto básico para espectrometría es una fuente, una muestra y sistema de detección. La fuente irradia la muestra y el detector mide la radiación de viene de la muestra. Las fuentes más empleadas son los tubos de Rayos X. Los sistemas de espectrometría de FRX. Las cenizas de carbón o coque se obtienen bajo condiciones estandarizadas de ignición hasta peso constante. Las cenizas son fundidas con tetra borato de litio ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) o con un fundente apropiado para obtener una perla. La perla es irradiada por el haz de rayos X a longitudes de onda corta.	- Espectrómetro de fluorescencia de rayos X. -Balanza Analítica -Perladora -Estufa de secado Muffa	ASTM D4326-11
DETERMINACION DEL CONTENIDO DE MERCURIO TOTAL EN CARBÓN Y RESIDUOS DE COMBUSTIÓN DEL CARBÓN POR COMBUSTIÓN DIRECTA	El calentamiento controlado de una muestra en un medio rico en oxígeno libera el mercurio. La muestra es calentada hasta sequedad en el instrumento y es descompuesta térmica y químicamente. Los productos de descomposición son llevados por una corriente de oxígeno a la sección catalítica del instrumento, en donde la oxidación es completada y los halógenos, los óxidos de azufre y nitrógeno son capturados. El resto de los productos de descomposición son llevados a un amalgamador de oro que atrapa selectivamente el mercurio. La longitud de onda de medición es de 253,7 nm.	- Analizador de Mercurio DMA-80 - Balanza Analítica SARTORIUS	ASTM D6722 - 11
DETERMINACIÓN MICROSCÓPICA DE LA COMPOSICIÓN MACERAL DEL CARBÓN	Reconocimiento de los componentes microscópicos del carbón. Determinación del porcentaje en volumen de los macerales. Las proporciones de estos componentes en una muestra se determinan por observación de un número estadísticamente adecuado de puntos y se reportan como los porcentajes representativos de cada uno.	-Microscopio con platina mecánica e iluminador provisto de un conjunto de objetivos que permitan la resolución de objetos del orden de 1 a 2 $\mu\text{m}$ . -Disco ocular puede tener una retícula en arco o un diseño de cuatro puntos visibles, ubicados en los vértices de un cuadrado que cubre casi todo el campo de visión. -Platina mecánica -	ASTM D2799 - 11



DETERMINACION	FUNDAMENTO	EQUIPOS	NORMA
		Contador capaz de almacenar el conteo de por lo menos seis componentes macérales.	
DETERMINACIÓN MICROSCÓPICA DE REFLECTANCIA DE LA VITRINITA EN ESPÉCIMENES PULIDOS DE CARBÓN SEGÚN NORMA ASTM D2798 – 11a	La reflectancia del maceral vitrinita es determinada por iluminación de una superficie pulida de carbón en aceite de inmersión, usando un sistema microscópico que fotométricamente mide la cantidad de luz reflejada de la superficie	-Microscopio petrográfico Lietz ORTHOPLAN. -Polarizador e Iluminador. -Tubo Fotomultiplicador. -Amplificador del Fotómetro. -Registrador o medidor. -Fuente de Luz. -Filtros. -Diafragma de Apertura -Prensa Niveladora de Muestras	ASTM D2798-11a

## 5.1 ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS

En la zona de estudio se colectaron 33 muestras de diferente tipo de material entre carbones, respaldos e intercalaciones, niveles de arenitas, tanto en frente de mina como en las perforaciones, para realizar tanto análisis físicoquímicos como medición de contenido de gas metano. (Ver Tabla 11); las cuales se discriminan así:

**Tabla 11.** Número y tipo de muestras obtenidas en el área de estudio Úmbita – Rondón.

Sector	Perforaciones						Frente de minas			Total
	Úmbita-1			Chinavita-1			Carbón	Respaldos	Intercalaciones	
	Carbón	Respaldos	Arenitas	Carbón	Respaldos	Arenitas				
Úmbita - Chinavita	10			14	2	1	5			33
Úmbita-Tibaná							1			

Fuente: Datos del estudio

De estas 33 muestras, 30 son de carbón y 3 son respaldos. Las 30 muestras se envían al laboratorio de carbones para su respectivo análisis.

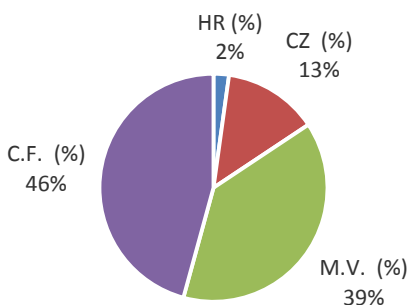
Para la interpretación de las diferencias del comportamiento, origen, utilización y definir su calidad en los procesos de transformación de una área carbonífera, se requiere una caracterización fisicoquímica lo más completa posible.

En el Anexo B, se presentan los resultados de los análisis fisicoquímicos de las diferentes muestras de carbón en base como se analiza (csa) y Anexo C, resultados de los análisis fisicoquímicos de las diferentes muestras de carbón en base seca (bs). Con el fin de dar una mejor interpretación a los resultados de los análisis químicos de los carbones, para la discusión de los resultados y la clasificación por rango es necesario convertirlos de la base como se analiza (c.s.a.) a la base más adecuada. Las fórmulas de conversión se resumen en el Anexo E.

Se promediaron las muestras por manto, siendo el número de muestras para este promedio bajo (máximo 3 muestras y en la mayoría de los casos se representa unas dos muestras por manto), para tratar de realizar una estadística por cada manto, no representa alta confiabilidad de los resultados; aunque este valor no es siempre muy significativo, por la limitación del número de muestras para un mismo manto sí constituye un estimativo de cada variable. Los parámetros de dispersión utilizados en la interpretación de los resultados son: desviación estándar, valores mínimo y máximo, varianza.

### 5.1.1 Análisis Próximo

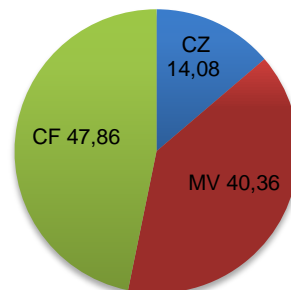
Como se presenta en la Figura 41, se muestra el promedio de las muestras del área de estudio para los parámetros de Cenizas (Cz), Humedad residual (HR), Carbono Fijo (CF), Materia Volátil (MV), correspondientes a los análisis próximos.



**Figura 41.** Variación en la composición porcentual de los parámetros Cz, HR, CF, MV, en base como se analiza de las muestra del estudio.

De acuerdo a esta, se tiene que el contenido de humedad residual promedio es de 2,24%. Al observar los valores de estos parámetros en el Anexo B, más del 80% están por debajo de 2.60%, solamente existe una muestra con contenido de 6,00%, indicando posiblemente un grado de oxidación. Hay una relación entre el incremento de la humedad y la disminución del grado de carbonificación. Este parámetro es necesario para el cálculo de las diferentes variables en base seca, y en la evaluación y control de los procesos industriales.

En cuanto al contenido de cenizas el 64,00% de las muestras presentan contenidos por debajo de 12,5%, en b.c.a. y un amplio rango en su contenido que va desde 4,43 hasta 38,00%; los contenidos altos de cenizas afectan y limitan la ubicación de los carbones dentro del Sistema Internacional de Clasificación. En cuanto al contenido de cenizas en base seca, el valor medio es de 14,08% debido a que ya no están afectados por la humedad, como se visualiza en la Figura 42.



**Figura 42.** Composición del contenido promedio de cenizas, materia volátil y carbono fijo (%) en b.s.

Con respecto al contenido de materia volátil, su determinación tiene importancia en cuanto es la responsable de los humos producidos en la pirolisis de un carbón, sus principales constituyentes son: hidrógeno, oxígeno, monóxido de carbono, metano y otros hidrocarburos. Su composición varía ampliamente dependiendo del rango del carbón. La base más utilizada, cuando se hace referencia a la materia volátil es la base seca. En el Anexo C, se muestra un rango que va desde 32, 69 a 44,22 %. El promedio para el área de estudio es de 40.36 %.

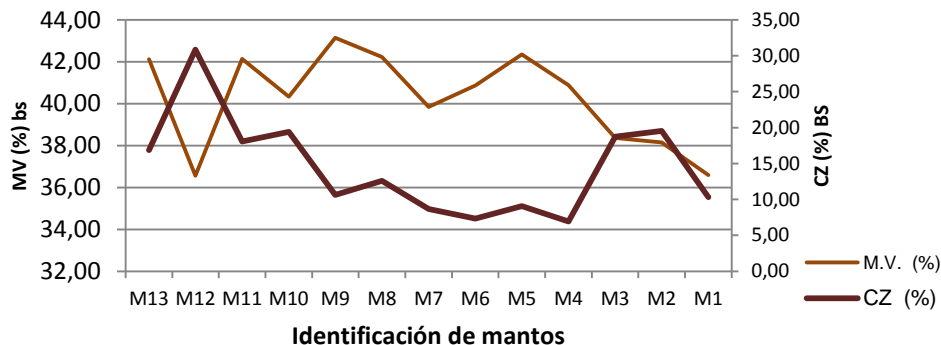
Se aprecia en la Tabla 21, clasificación de carbones por ASTM, que cuando se expresa el contenido de materia volátil seca libre de materia mineral estos valores aumentan considerablemente, cuando los valores de materia mineral son altos.

El carbono fijo es el valor que se obtiene por diferencia entre el 100% y la suma de los porcentajes de humedad residual, materia volátil y cenizas; este valor se emplea en los procesos térmicos para determinar la eficiencia en el quemado del

carbón. Igualmente se emplea para clasificar los carbones según el rango de clasificación ASTM cuando el contenido de carbono fijo está por encima del 69% en base seca libre de materia mineral.

En síntesis al observar el contenido de cenizas y materia volátil en base seca, a través de los diferentes mantos iniciando con el manto M13, más superficial hasta M1, manto más profundo de las muestras recolectadas, se establecen las siguientes consideraciones:

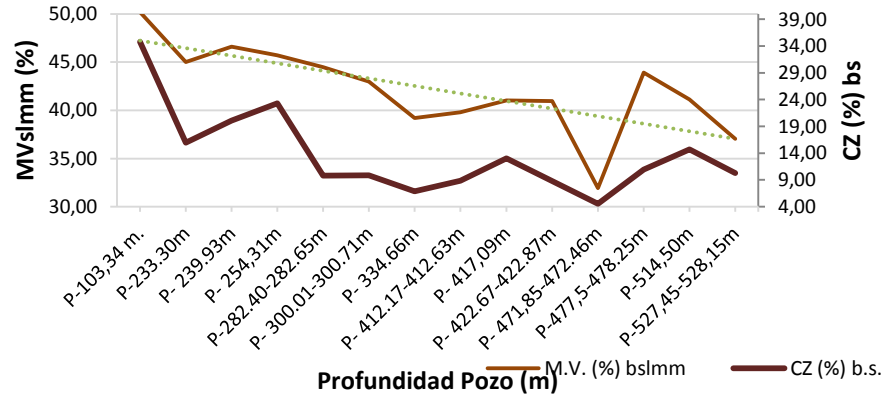
- El contenido de cenizas (Cz) en bs (base seca) tiene una ligera disminución; aunque se incrementa en el manto más profundo (M3 y M2); el contenido de cenizas está influenciado por el contenido de materia mineral (mm).
- En cuanto al contenido de materia volátil en base seca, no se observa una tendencia de la disminución de este parámetro con la profundidad de los mantos, ya que se presenta la influencia del contenido de materia mineral, como se muestra en la Figura 43. Se esperaría una mayor correlación con las profundidades de los mantos, ya que se esperaría un mayor grado de carbonificación en los mantos más profundos. Esta relación de este parámetro es mayor cuando se expresa en base seca libre de materia mineral.



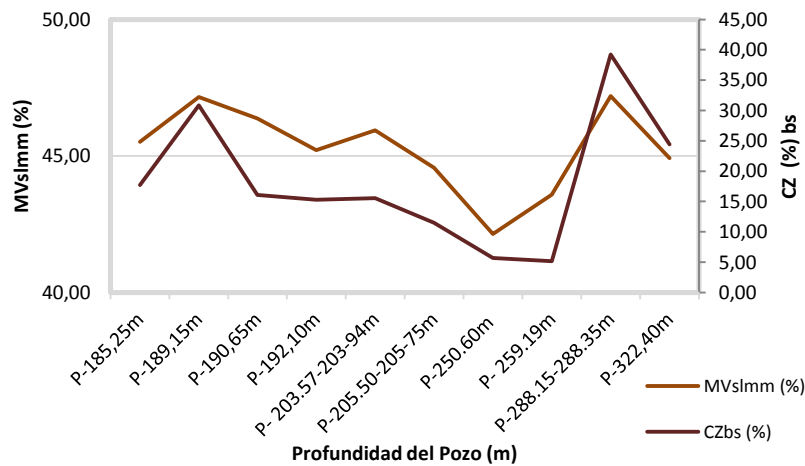
**Figura 43.** Variación del promedio de contenido de MV bs y CZ bs a través de los mantos en el área de estudio.

En cuanto al comportamiento del contenido de Materia Volátil seca libre de materia mineral (MVslmm) y Cenizas en base seca (Cz bs), al observar las Figuras 44 y 45, se nota una mayor grado de relación entre la disminución del contenido MVslmm y la profundidad a través del pozo Chinavita-1, que en la perforación Úmbita -1. Para el contenido de Cz hay una ligera disminución con la profundidad del pozo Chinavita-1.

La diferencia de comportamiento posiblemente se origine debido a que se atraviesan más mantos profundos en la perforación Chinavita-1, que en el Pozo Úmbita -1.



**Figura 44.** Variación contenido de MVslmm y Cz con la profundidad. Pozo Chinavita-1.



**Figura 45.** Comportamiento contenido de MVslmm y Cz con la profundidad. Pozo Úmbita -1.

De acuerdo con los resultados de estos análisis, se tiene que las muestras que mayor contenido de gas metano registraron en el Pozo Úmbita -1, Pozo Chinavita-

1 y Frentes de mina, poseen los siguientes valores de análisis próximo (ver Tabla 12):

**Tabla 12.** Análisis próximo de las muestras con mayor contenido de metano en los Pozos

Muestra	Manto	CZ (%) bs	M.V. (%) bs	C.F. (%) bs	Humedad Residual bca	Gas Total libre de cenizas (pie <sup>3</sup> /ton)	Ubicación
15172807004	M3	6,05	39,9	56,7	2,58	28,77	Frentes de Mina
15172807006	M7	7,47	39,77	55,56	2,73	22,01	
15172807017	M6	8,88	39,8	53,46	2,09	308,07	Pozo Chinavita-1
15172807018	M4	8,8	41,46	51,71	1,93	271,33	
15172807021	M2	14,7	38,92	48,25	1,84	285,2	
15172807022	M1	10,31	36,59	54,89	1,76	243,55	
15842807027	M12	30,85	36,56	34,78	2,14	60,85	Pozo Umbita-1
15842807028	M11	16,07	43,06	42,88	1,97	57,92	
15842807011	M3	39,24	32,69	30,25	2,13	58,76	

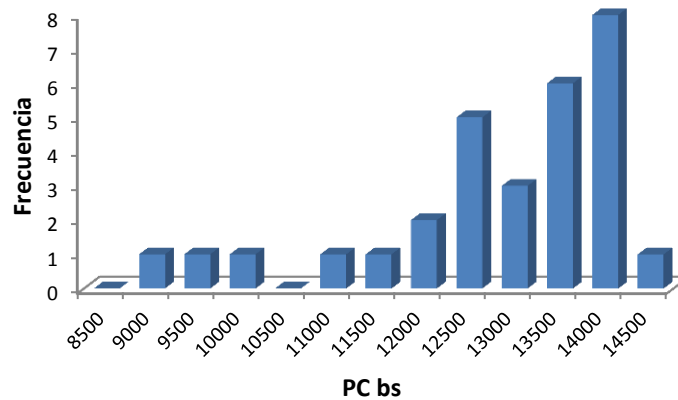
Fuente: Datos del estudio

De acuerdo a la tabla anterior, la variación en cenizas para estas muestras, está entre 6,05% a 30,85 %, el rango de Materia Volátil entre 32,69% a 43,06 %, Carbono Fijo entre 30,25% a 56,70% y la Humedad Residual entre 1,76% a 2,73%.

De estos análisis cabe destacar el correspondiente al contenido de cenizas, pues en una muestra de carbón, este puede disminuir el potencial de metano, ya que actúa como diluyente de la materia orgánica en el mismo. Por tal razón se puede mencionar que entre mayor sea el contenido de cenizas del carbón menor será su potencial de generación (Das y otros, 1991). Con respecto a las muestras que obtuvieron mayores contenidos de metano, se tiene que en el caso del Pozo Úmbita -1, el manto M12 registra un valor de Cz de 30.85; en el Pozo Chinavita-1, el manto M2 registra un valor de Cz de 14,70%; en el caso de las muestras en frente de mina, el manto M7 presentan 7,47%. De lo anterior se aprecia que los contenidos en el pozo Úmbita -1 fueron menores que los contenidos registrados en el Pozo Chinavita-1, lo cual se puede relacionar con la variación marcada entre los valores de Cenizas entre un pozo y otro, con respecto a las muestras de frente de mina, los valores de cenizas son bajos con contenidos igualmente bajos, esto se ha explicado porque los puntos de muestreo son cercanos a la superficie.

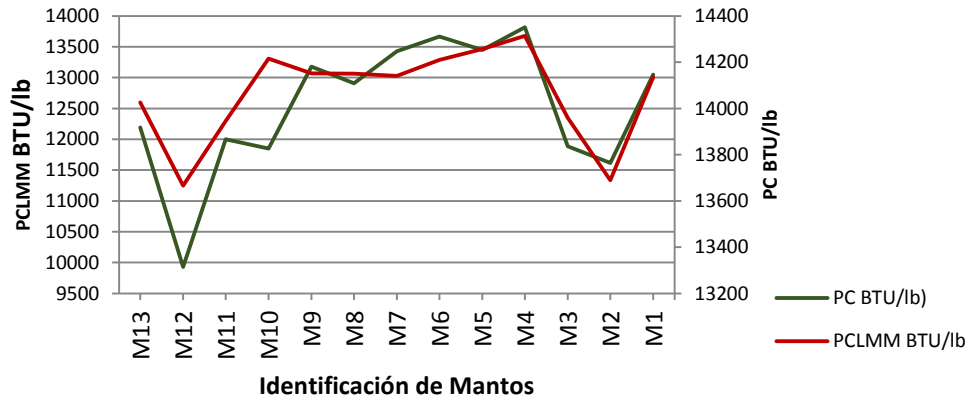
### 5.1.2 Poder Calorífico

Es una de las determinaciones más importantes en los análisis del carbón, principalmente cuando se va a utilizar con fines térmicos. El promedio general del área de estudio en base seca es 12584 Btu/lb y un rango de variación de 8595-14046 Btu/Lb. La Figura 46 muestra el histograma de poder calorífico (Btu/lb) en base seca. En este histograma los valores de poder calorífico están afectados por el contenido de cenizas; como se observa, la gran mayoría de los datos se concentran en valores de 12500 a 14000 Btu/lb.



**Figura 46.** Histograma de valores de Poder calorífico (PC) Btu/lb (base seca).

La Figura 47 muestra el comportamiento del valor energético promedio en base seca y libre de materia mineral en los mantos desde el más superficial manto M13 hasta el más profundo manto M1 y no se nota una tendencia, aunque los valores energéticos de PCImm son más altos, debido a que ya no están afectados por el contenido de materia mineral.



**Figura 47.** Promedios PC (bs) y PCLmm con respecto a la secuencia carbonífera identificada.

Para el manto M12 del pozo Úmbita -1, el cual registra el valor más alto en contenido de gas total libre de cenizas, se observa el valor de 9929 Btu/lb, mientras que para el manto M6 del pozo Chinavita-1, el cual registra el valor más alto en contenido de gas total libre de cenizas, se registra un valor de 13439 Btu/lb. Para el manto M3 muestreado en frente de mina, el cual registra el mayor contenido de metano, el PC fue de 13902 Btu/lb.

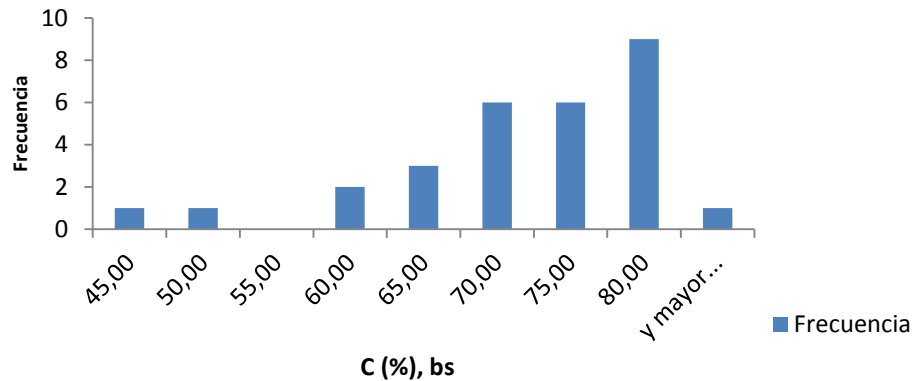
### 5.1.3 Análisis Elemental

Este análisis da la composición elemental del carbón, en términos de su contenido en carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre. Estos elementos no se encuentran como tales en el carbón, sino que forman compuestos orgánicos complejos con grupos aromáticos y alifáticos y también forman parte de la materia mineral del carbón.

Los datos de análisis elemental también son representativos del rango del carbón, por lo que este a menudo se clasifica a partir del contenido de carbono en base seca libre de cenizas.

El promedio general de carbono para el área de estudio en base seca es de 69,21 % y un rango de variación de 42,41 a 80,30, en esta base, pero el 74 %, están entre 70,00-79,00% (Ver Anexo C). La Figura 48 muestra el histograma de Carbono en base seca.

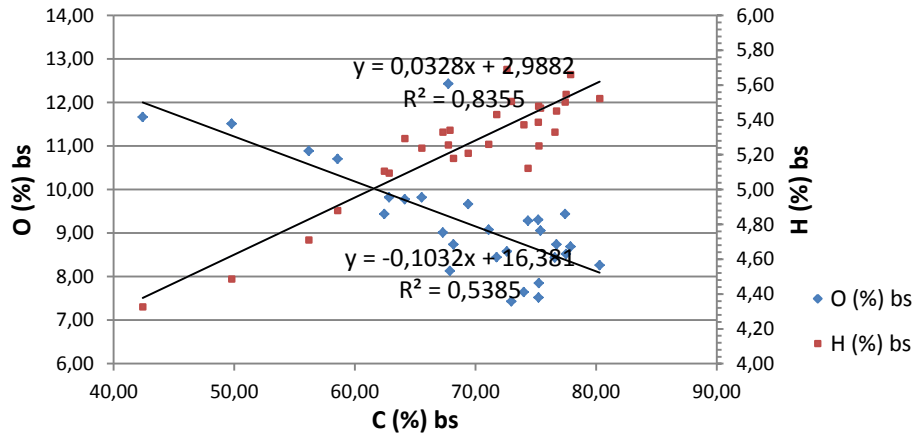




**Figura 48.** Histograma de valores de contenido de Carbono Total (C) (base seca).

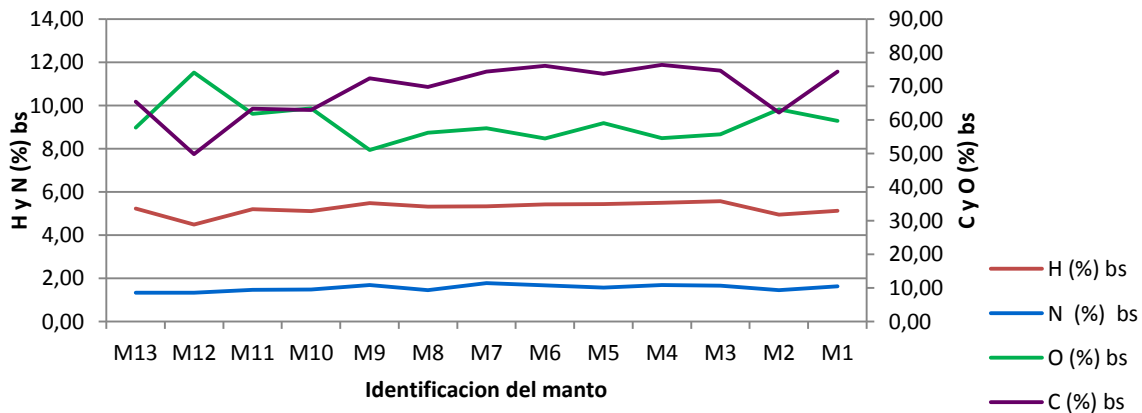
La media del contenido de hidrogeno en base seca de las muestras analizadas es de 5,26 %, y con grado de dispersión de 0,32, indicando una mediana similar a la media. En cuanto al contenido de nitrógeno, esta principalmente asociado a la parte orgánica, desde el punto de vista ambiental es muy importante debido a las emisiones de gases de NOx; no hay una relación directa entre su contenido y el rango del carbón. De acuerdo al Anexo D, la media de los carbones analizados es de 1,55 +/- 0,21 en base seca.

El oxígeno puede ser empleado como indicador de rango del carbón, también su contenido refleja un contenido de oxidación; el promedio de este parámetro en base seca es de 9,24% +/- 1,24 %. Hay una relación inversa entre el contenido de oxígeno y el porcentaje de carbono, como se representa en la Figura 49, hay una correlación de un 83 %, mientras que con el contenido de hidrogeno es menor siendo de un 53%.



**Figura 49.** Interrelación de Hidrogeno y Oxígeno /% bs vs C (% ) bs.

Ya al evaluar el promedio del contenido de C, H, N y O, a través de los diferentes mantos desde M13 hasta M1 (manto más profundo), no hay una tendencia marcada entre los contenidos de estos parámetros con la profundidad de los mantos, como se representa en la Figura 50.



**Figura 50.** Variación de los contenidos medios de C, H, N y O en porcentajes vs mantos.

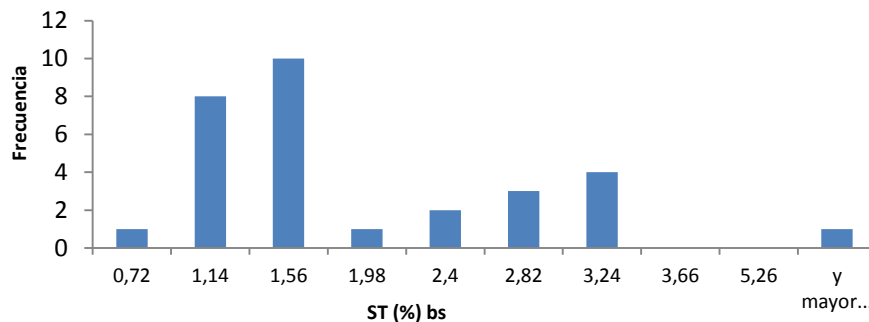
Al igual cuando se observan los datos de estos elementos, a través de las muestras tomadas a diferentes niveles de profundidad en los dos pozos de

perforación, no se observa ninguna tendencia. Los contenidos de H y N en base seca, son muy similares, debido a su composición normal en un carbón, estos están afectados por el contenido de cenizas, siendo para algunas muestras bastante altas, como se muestra en el Anexo B.

### Azufre Total

Los resultados de azufre total, sirven a varios intereses: evaluación de la preparación del carbón, evaluación de emisiones potenciales en la combustión del carbón, para un control efectivo en las emisiones de óxidos de azufre. El contenido de azufre debe ser mínimo, para evitar la contaminación ambiental con la formación de gas de  $\text{SO}_2$ .

En el Anexo C, se presenta la media del contenido de azufre Total (ST) de los carbones analizados; siendo este de 1,76 en base seca y con un rango de 0,72 a 5,97%, este último dato hace que la media del contenido se incremente, este dato pertenece a una cinta de 0.35m, del pozo Chinavita-1 y por ello se tuvo en cuenta en la estadística. El 58% de las muestras presentan contenidos inferiores a 1,30. En el histograma de la Figura 51 se hace más evidente la explicación mencionada anteriormente.



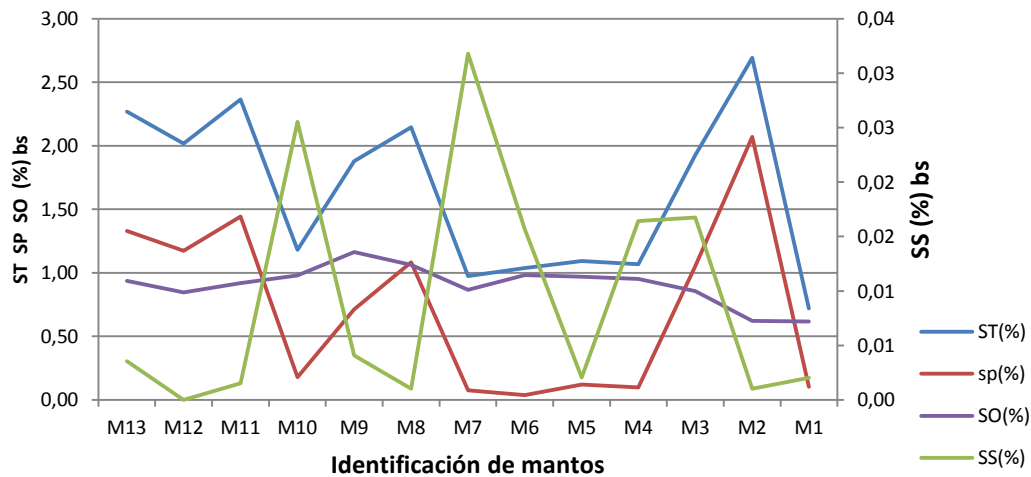
**Figura 51.** Histograma de valores de contenido de azufre total (ST), (base seca).

De las muestras que poseen mayor contenido de gas metano se tienen valores de composición elemental para El Pozo Úmbita -1 (Muestra 15842807027) de 68.18% en Carbono, 5.18% de Hidrógeno, 1.57% de Nitrógeno; en el Pozo Chinavita-1 para la muestra 15172807017, Carbono en 75,28%, Hidrógeno en 5.25% y Nitrógeno en 1.68%; para la muestra 15172807004, 76.73 % de Carbono, 5.45% de Hidrógeno y 1.74% de Nitrógeno.

Así mismo, los valores registrados para el azufre total en las muestras de mayor contenido de gas en el Pozo Úmbita -1 (muestra 15842807027) corresponde a 2.86%; en el Pozo Chinavita-1 (muestra 15172807017) 1.07%; Frente de mina (Muestra 15172807004) 1.28%. El menor valor de Azufre Total corresponde a la muestra 15172807017 del Pozo Chinavita1, Manto M6.

#### 5.1.4 Formas de Azufre

La distribución promedio del contenido de azufre a través de los distintos mantos desde el M13 hasta M1 (en las dos perforaciones), no presenta ningún tipo de tendencia con la profundidad de los mantos, ya que el contenido de azufre de las muestras analizadas provienen principalmente de minerales de sulfuro como la pirita (FeS<sub>2</sub>) asociadas al carbón como componente de materia mineral y no dentro de la matriz orgánica del carbón, como se observa en la Figura 52.



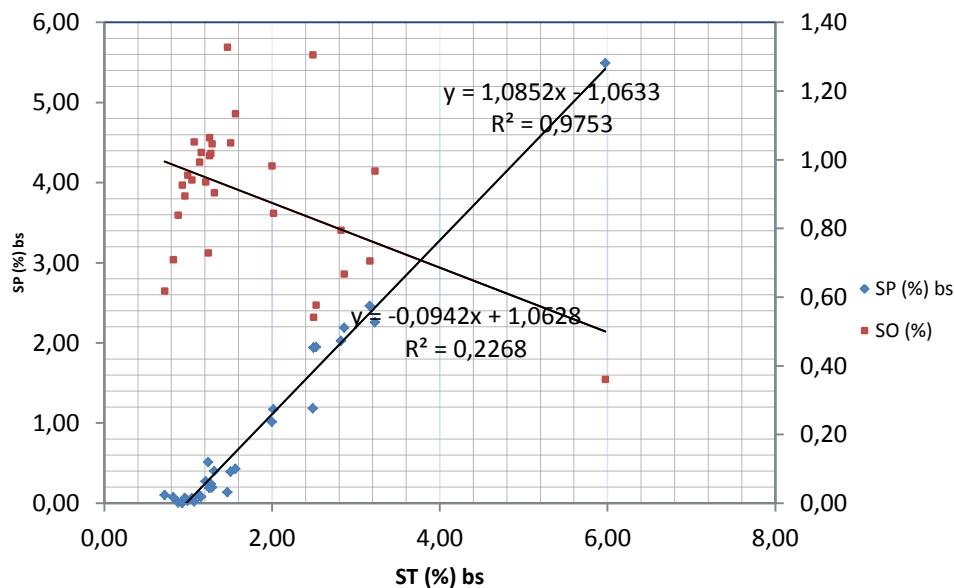
**Figura 52.** Variación de la media los contenidos de formas de azufre en función de los mantos

El azufre en el carbón se encuentra principalmente como:

- Azufre sulfato (SS): combinado como sulfato inorgánico
- Azufre pirítico (SP): como pirita
- Azufre orgánico (SO): en los compuestos orgánicos

La mayoría de las veces, es suficiente con la determinación de azufre total, pero este análisis sirve para saber que tratamiento hay hacer a los carbones cuando ya se van a trabajar. El azufre pirítico es el más fácil de remover. Para destacar el promedio o media de las muestras analizadas para azufre pirítico que es de 0,84 % en base seca, este valor está influenciado por el valor alto de 5,49%, que corresponde a la muestra de una cinta con espesor de 0.35 m.

Al observar la Figura 52 a través de los mantos se evidencia que el contenido de Azufre pirítico registra un comportamiento similar al del azufre total, indicando una interrelación altamente significativa, es decir en una gran proporción el azufre esta como pirita, que por medios gravimétricos sería factible beneficiar, para disminuir su contenido. La Figura 53, representa esta correlación para los carbones analizados; mientras que no se evidencia lo mismo para la variación del azufre orgánico con respecto al azufre total.



**Figura 53.** Variación del contenido de SP y SO en base seca con el contenido de Azufre total en base seca

La importancia de este análisis, que hace una diferenciación del contenido de azufre dependiendo de su forma química, como pirítico, sulfato y orgánico, permite identificar características importantes al momento de la combustión de los carbones.

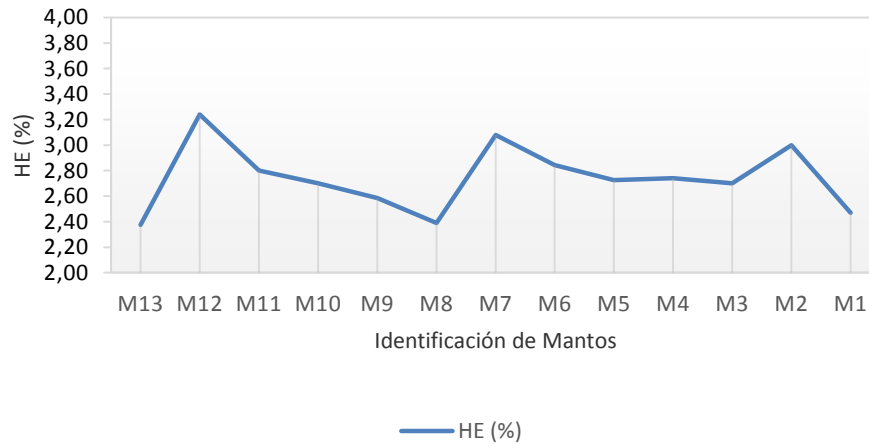
Los valores de formas de azufre en las muestras que registraron mayor contenido de gas corresponden en el Pozo Úmbita -1, para la Muestra 15842807027 a 2.19% de Azufre Pirítico; 0,0 % de Azufre Sulfato; 0.67% de Azufre Orgánico; para la muestra 15172807017 del Pozo Chinavita-1, se tiene 0.02% de Azufre Pirítico, 0.0 % de Azufre Sulfato y 1.05% de Azufre Orgánico; en el Frente de mina para la muestra 15172807004, se tiene 0.20% de Azufre Pirítico, 0.04% de Azufre Sulfato y 1.05% de Azufre Orgánico.

### 5.1.5 Humedad de Equilibrio (HE)

Es aquella humedad que constituye una humedad inherente de la capa de carbón in situ, por cuanto ocurren en su estado natural de formación; incluye solamente el agua considerada como perteneciente al manto, y no a la humedad que se agrega desde la superficie. Se determina como la cantidad de agua en equilibrio contenida en el carbón, en una atmósfera comprendida entre el 96% y el 97% de humedad relativa, a una temperatura de 30°C y este parámetro se toma como base para la clasificación ASTM cuando se establece por PCImm, ( por debajo de 14000 Btu/lb).

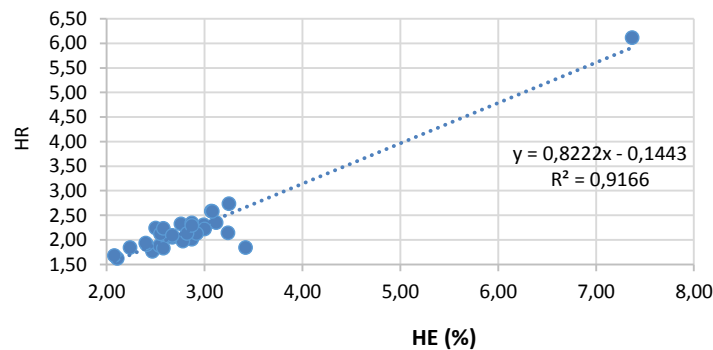
De acuerdo al Anexo D, que resume la estadística de las diferentes muestras colectadas en los sectores de estudio, la media de HE es de 2,90 % con un rango entre 2,08 y 7,37%, este último valor anómalo es altamente distante y único, corresponde a la muestra obtenida en la mina La Rosa, del sector Úmbita - Tibaná; el 80,00% de las muestras analizadas están por debajo de 3,00%. La muestra que registra este resultado tan alto está relacionado con su contenido alto en humedad residual, indicando que se trata de una muestra meteorizada.

La Figura 54, muestra los valores medios de humedad de equilibrio, a través de los mantos, no se evidencia una tendencia de este parámetro con la profundidad de los mismos.



**Figura 54.** Variación de la media de humedad de equilibrio con la profundidad de los mantos.

Es importante establecer si hay una correlación entre la humedad inherente y el contenido de humedad residual que se determina en el laboratorio, como se presenta en la Figura 55. Esta alta correlación está afectada por la muestra meteorizada, ya que al hacer la correlación sin esta muestra, la correlación lineal está alrededor de un 65 % lo cual sigue siendo significativo.



**Figura 55.** Variación del contenido de HR (%) con el contenido de humedad inherente (%).

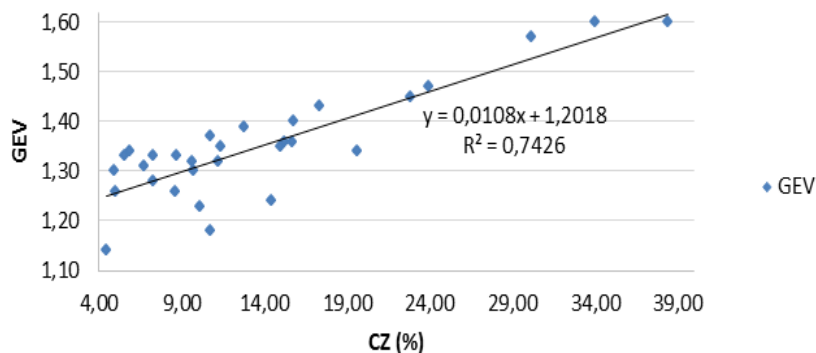
Los valores de Humedad de Equilibrio en las muestras que registraron mayor contenido de gas corresponden en el Pozo Úmbita -1, para la Muestra 15842807027 a 2.67%; para la muestra 15172807017 del Pozo Chinavita-1, se tiene 3.24%; en Frente de mina para la muestra 15172807004, se tiene 3.07%.

### 5.1.6 Gravedad Específica Verdadera (GEV)

La gravedad específica varía con el rango del carbón y tiene una relación directa con el contenido de cenizas; éste es un parámetro necesario para el cálculo de reservas, para establecer el proceso de lavado de carbones y en el transporte.

Los valores registrados en gravedad específica verdadera en las muestras analizadas en general, determinan rangos entre 1,14 a 1,60, con una media de 1,35; estos valores fueron calculados para las 30 muestras entre frentes de mina y pozos de perforación.

La Figura 56, establece la interrelación entre la GEV y el contenido de cenizas en bca, esta correlación es del 74%, lo cual es estadísticamente significativa.



**Figura 56.** Variación del contenido de GEV con el contenido de CZ (%) bca.

Los valores de gravedad específica verdadera en las muestras que registraron mayores contenidos de gas en el Pozo Úmbita 1 (Muestra 15842807027, M12) es de 1.57; en el Pozo Chinavita-1, muestra 15172807017 (M6) es de 1.33; en frente de mina, para la muestra 15172807004 / (M3) es de 1.34. El mayor valor de GEV, corresponde a la muestra 15842807027 del Pozo Úmbita -1, donde se obtuvieron valores bajos de contenidos de gas.

### 5.1.7 Índice de Hinchamiento

Mediante la prueba de índice de hinchamiento libre (IH), que es un ensayo preliminar y cualitativo, se establecen características aglomerantes de los carbones estudiados, que están asociadas con las propiedades plásticas.



Los valores presentados en el análisis de índice de hinchamiento (IH) en general, determinan rangos entre 1 y 3, mostrando un carácter poco aglomerante; solamente hay un carbón que registra un valor de 4½ con propiedades aglomerantes, pero es de una cinta de carbón de 0.35 m.

Los valores de IH de las muestras que reportaron mayores contenidos de gas metano, en el Pozo Úmbita -1, muestra 15842807027 (M12) es de 1.0, en el Pozo Chinavita-1, muestra 15172807017 (M6) es de 3.0 y en frente de mina la muestra 15172807004 (M3) es de 2.0.

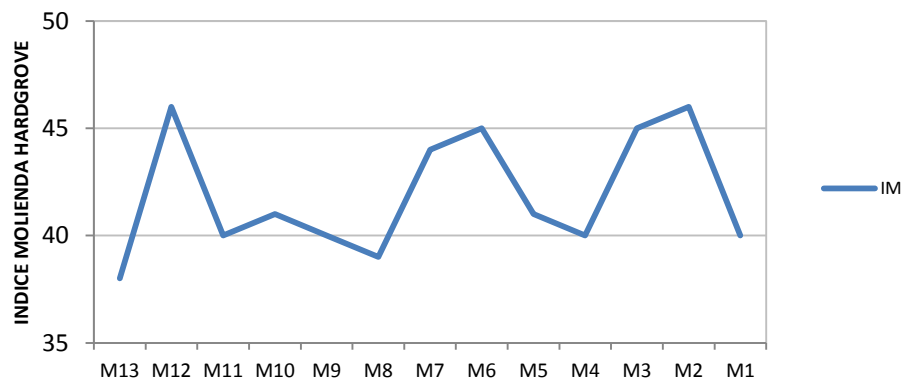
De acuerdo a las muestras analizadas, se puede mencionar que la muestra que registró mayor contenido de gas metano (muestra 15172807017, M6, Pozo Chinavita-1), posee el mayor valor de IH.

### 5.1.8 Índice de Molienda Hardgrove (IHG)

Este parámetro se utiliza para estimar la capacidad de rendimiento y energía requerida en el proceso de molienda, también para definir el tamaño de partícula producido. Carbones que presentan índices por debajo de 50 tienen dificultad para ser pulverizados.

Los valores obtenidos en el Índice de molienda Hardgrove (IHG) en las muestras analizadas, presentan rangos entre 31 y 68, con un valor promedio de 43. Más del 80,00% de los carbones están con IHG inferior a 50, indicando carbones con alto grado de dificultad para su molienda.

La Figura 57, muestra la variación del promedio o media de este parámetro con los mantos desde el más superficial M13 hasta el más profundo M1, no se evidencia una tendencia.



**Figura 57.** Variación del promedio IMH con los mantos.

Para el manto M12 (que reporta mayor contenido de gas) del Pozo Úmbita -1, se determina un valor de IHG de 46, en el Pozo Chinavita-1, la muestra del M6 posee un IHG de 56 y en la muestra 15172807027, manto M3 de frente de mina el IHG es de 50.

La muestra del manto M6 del Pozo Chinavita-1, que registró mayor contenido de gas, posee el mayor IHG de entre las muestras de mayor contenido de gas en los pozos y frente de mina, estando levemente por encima de 50, que define los carbones con dificultad para ser pulverizados.

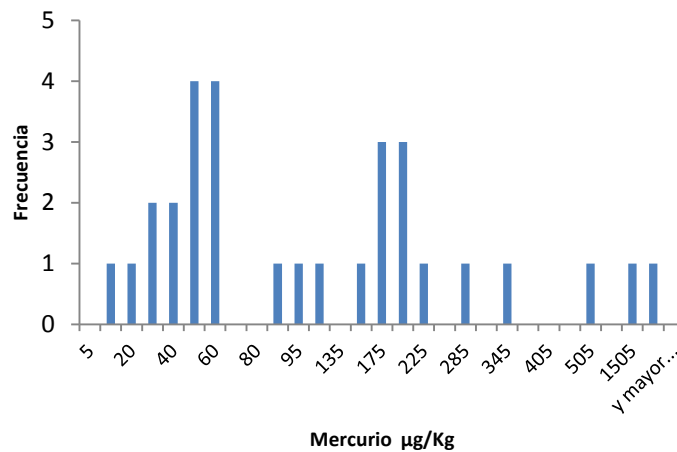
### 5.1.9 Contenido de Mercurio

En el carbón, el petróleo y las rocas se encuentran trazas de mercurio en su forma natural. Aproximadamente el 70% de las emisiones de mercurio a la atmósfera causadas por el hombre proviene de la combustión estacionaria de combustibles fósiles, en especial del carbón y de la incineración de materiales de desecho.

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) ha recopilado en los últimos 25 años información de análisis de mercurio en 7000 muestras de carbón, mostrando una media de 170  $\mu\text{g}/\text{Kg}$ . El 80% de esta población contiene niveles menores a 250  $\mu\text{g}/\text{Kg}$ .

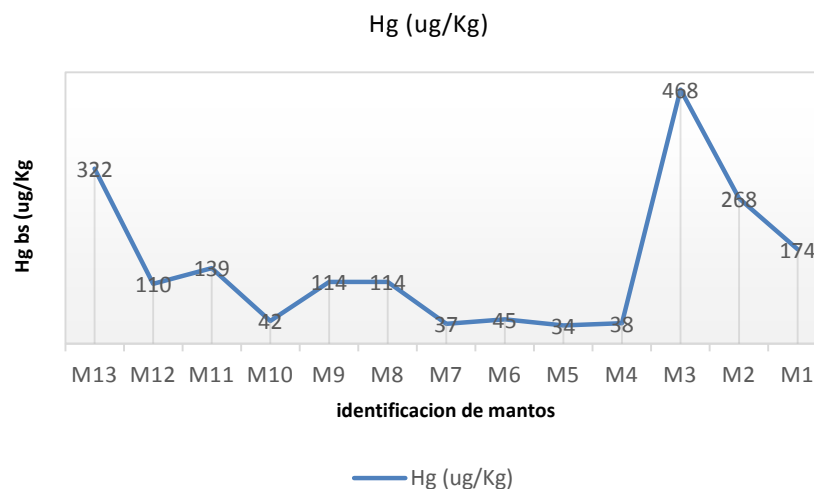
Investigaciones (Kolker, A., 2011) indican que gran parte del mercurio en el carbón se asocia con minerales de pirita, otras formas son enlazadas orgánicamente y con minerales de sulfuro y seleniuro.

El valor medio del contenido de mercurio en base seca de los carbones analizados es de 209  $\mu\text{g}/\text{g}$ , se presentan dos muestras de perforación identificadas como 59789-I / 15842807011 y 58306-I / 15172807023, con contenidos de 1099 y 1855  $\mu\text{g}/\text{g}$ , que están extremadamente altos comparados con el resto de las muestras analizadas. El 87% de los carbones están por debajo de 300  $\mu\text{g}/\text{g}$ , o de 0.30 ppm como se observa en el histograma de la Figura 58. Los datos atípicos de estas muestras presentan alto contenido de mercurio.



**Figura 58.** Histograma del contenido de mercurio  $\mu\text{g/Kg}$  (base seca).

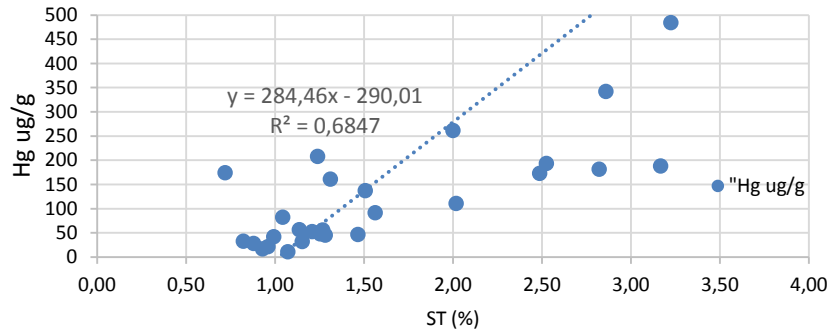
En la Figura 59, se representa la media del contenido de Hg en base seca desde el manto más superficial M13 hasta el manto más profundo M1, y no se establece una tendencia en cuanto a su concentración con respecto a la profundidad de los mantos. El valor promedio de 468  $\mu\text{g/Kg}$  está sobredimensionado por el dato de 1099 de una muestra del M3 (ver Anexo C).



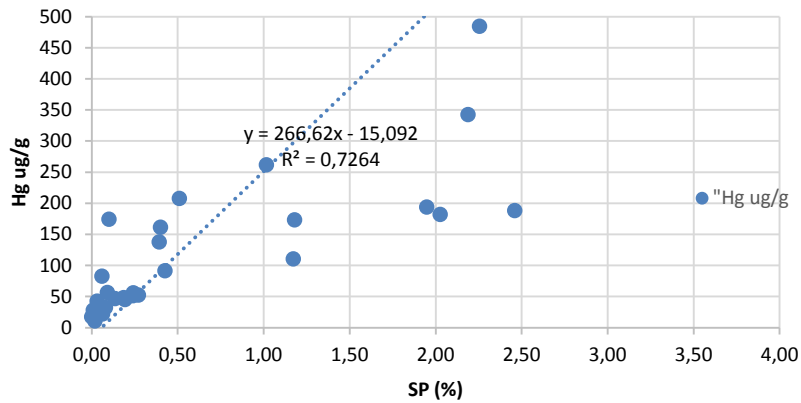
**Figura 59.** Variación de la media del contenido de mercurio con la profundidad de los mantos.

Se encontró una correlación aceptablemente significativa entre el contenido de Hg con ST (%) y SP (%) en base seca, como se representa en las Figuras 60 y 61.

Para establecer esta variación se omitieron dos muestras de carbones con concentraciones mayores a 1000 µg/g.



**Figura 60.** Variación del contenido de Hg (µg/g) con el contenido de ST (%) en b.s.



**Figura 61.** Variación del contenido de Hg (µg/g) con el contenido de SP (%) en b.s.

Para el manto M12 (que reporta mayor contenido de gas) del Pozo Úmbita -1, se determina un valor de contenido de mercurio de 110 µg/Kg, en el Pozo Chinavita-1, la muestra del M6 posee un IHG de 10 µg/Kg y en la muestra 15172807027, manto M3 de frente de mina el IHG es de 45 µg/Kg.

La muestra del manto M6 del Pozo Chinavita-1, que registró mayor contenido de gas, posee el menor valor de contenido de mercurio (µg/Kg) de entre las muestras de mayor contenido de gas en los pozos y frente de mina.

### 5.1.10 Plastometría

Teniendo en cuenta que la mayoría de carbones analizados en el sector GMAC Úmbita -Chinavita, tienen valores de Índice de Hinchamiento por debajo de 4, no se llevó a cabo el análisis de Plastometría a estos.

### 5.1.11 Análisis Químico de Cenizas

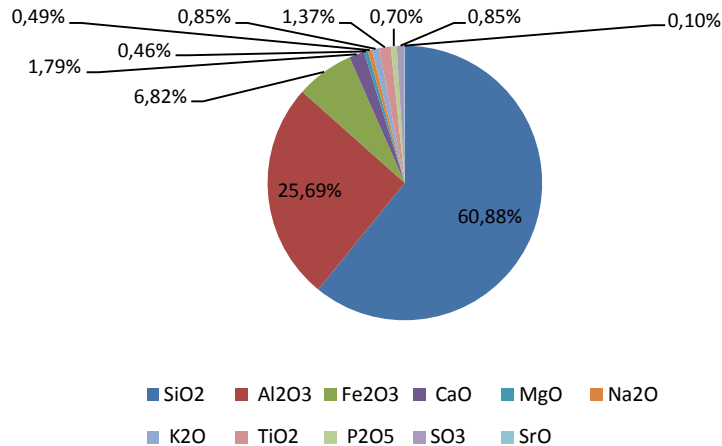
Las cenizas son el residuo sólido que queda de un proceso de combustión de la materia orgánica y de la oxidación de la materia mineral presente en el carbón.

Aunque los componentes de la ceniza se consignan como óxidos, en realidad se presentan como una mezcla de silicatos, óxidos y sulfatos, con pequeñas cantidades de otros compuestos.

En total fueron analizadas 30 muestras de cenizas de carbón obtenidas en el laboratorio para establecer el contenido de los 11 óxidos mayores, cuyos resultados se presentan en la Tabla 13 y en la Figura 62, se observa que la mayor composición está dada por los óxidos de silicio y aluminio en un promedio de 87%. Los valores de las medias para cada uno de los óxidos se muestran en la tabla.

**Tabla 13.** Contenido promedio de elementos mayores expresado en óxidos en las cenizas de los carbones obtenidas a 750°C.

Elemento	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Nivel de confianza (95,0%)
Silicio (SiO <sub>2</sub> )	60,72	4,85	50,80	67,19	1,81
Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	25,62	4,10	17,60	33,47	1,53
Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6,80	6,16	1,27	20,51	2,30
Calcio (CaO)	1,79	1,65	0,19	7,20	0,62
Magnesio (MgO)	0,46	0,20	0,18	1,09	0,07
Sodio (Na <sub>2</sub> O)	0,48	0,35	0,12	1,66	0,13
Potasio (K <sub>2</sub> O)	0,85	0,48	0,14	1,96	0,18
Titanio (TiO <sub>2</sub> )	1,37	0,33	0,65	1,96	0,12
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,70	0,95	0,06	4,02	0,36
Azufre (SO <sub>3</sub> )	0,84	1,11	0,04	6,04	0,42
Estroncio (SrO)	0,10	0,11	0,01	0,51	0,04



**Figura 62.** Composición elemental de las cenizas expresadas en porcentajes de óxidos.

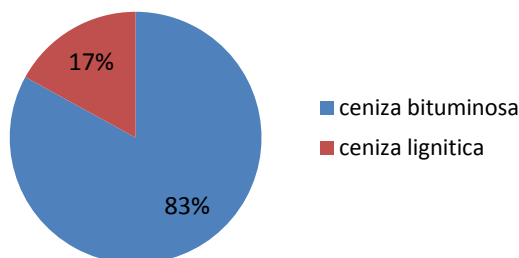
Sobre la base de su composición química, las cenizas del carbón se clasifican en:

Cenizas ligníticas que tienen  $(Ca\ O + Mg\ O) > Fe_2\ O_3$

Cenizas bituminosas que tienen  $Fe_2\ O_3 > (Ca\ O + Mg\ O)$

Existen casos en que carbones ligníticos y subbituminosos tienen cenizas bituminosas, y también hay carbones bituminosos que tienen ceniza lignítica.

En relación con la clasificación de las cenizas según su tipo en bituminosas en las cuales el porcentaje de  $Fe_2O_3$  es mayor que la suma  $CaO$  y  $MgO$  y cenizas ligníticas en las que ocurre lo contrario, se concluye que en la área estudiada prevalece la primera categoría; el 83 % de los carbones tienen cenizas bituminosas, como se representa en la Figura 63. La clasificación de las cenizas es muy importante para medir índices de escorificación y de ensuciamiento cuando los carbones se utilizan en calderas.



**Figura 63.** Clasificación de las cenizas en los sectores de estudio.

Las muestras que registraron mayor contenido de gas presentan un químico de cenizas con los siguientes valores: en el Pozo Úmbita -1, muestra del manto M12 Silicio de 62,43; Aluminio de 27.00; Hierro de 5.95; Calcio de 0.42; Magnesio de 0.68; Sodio de 0.46; Potasio de 1.57; Titanio de 0.99; Fosforo de 0.07; Azufre de 0.18; Estroncio de 0.02; en el Pozo Chinavita-1, Muestra del manto M6: Silicio de 58.56; Aluminio de 31.09; Hierro de 1.40; Calcio de 3.08; Magnesio de 0.45; Sodio de 0.25; Potasio de 0.29; Titanio de 1.94; Fosforo de 1.87; Azufre de 0.60; Estroncio de 0.24; en frente de mina para la muestra del manto M3: Silicio de 64.38; Aluminio de 24.11; Hierro de 3.94; Calcio de 2.04; Magnesio de 0.18; Sodio de 1.09; Potasio de 1.12; Titanio de 1.88; Fosforo de 1.12; Azufre de 0.64; Estroncio de 0.14.

### 5.1.12 Elementos menores y trazas en cenizas de carbón

Este análisis tiene por objeto cuantificar los contenidos de Litio (Li), Berilio (Be), Escandio (Sc) Vanadio (V), Cromo (Cr), Manganeseo (Mn), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Galio (Ga), Arsénico (As), Selenio (Se), Rubidio (Rb), Estroncio (Sr), Itrio (Y), Plata (Ag), Cadmio (Cd), Indio (In), Cesio (Cs), Bario (Ba), Lantano (La), Cerio (Ce), Praseodimio (Pr), Neodimio (Nd), Samario (Sm), Europio (Eu), Gadolinio (Gd), Terbio (Tb), Disprosio (Dy), Holmio (Ho), Erblio (Er), Tulio (Tm), Iterbio (Yb), Lutecio (Lu), Talio (Tl), Plomo (Pb), Bismuto (Bi), Torio (Th) y Uranio (U), con el fin de caracterizar muestras de rocas, suelos y sedimentos mediante la técnica de Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS), utilizando como método de descomposición una mezcla multiácida en sistema abierto. Este método es aplicable para la determinación de diferentes elementos menores y traza, contenidos en muestras tales como rocas, sedimentos y suelos. Los valores registrados se expresan en ug/g de muestra (Anexo F), que es equivalente a partes por millón (ppm). Los resultados de la concentración de los elementos se obtienen a partir de las cenizas de carbón.

Para el presente estudio se reporta datos de los siguientes elementos: V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Cd, Pb.

Ya que estos son los elementos que se analizan en el programa de comparación con otros laboratorios de carbones de la organización CANSPEX de Canadá.

En el anexo F, se menciona los límites de cuantificación por elemento, los cuales corresponde a la cantidad o concentración del analito (elemento) a partir de la cual es confiable realizar determinaciones cuantitativas.

Con respecto al comportamiento de las muestras con mayores contenidos de GMAC en las perforaciones realizadas con relación a los elementos menores y trazas, se tiene que en el Pozo Chinavita-1:

- La muestra correspondiente al Manto M1, posee 200 µg/g de V, 185 µg/g de Cr, 65 µg/g de Mn, 56 de Co, 126 µg/g de Ni, 182 µg/g de Cu, 176 µg/g de Zn, 12 µg/g de As, 797 de Sr, 0.1 µg/g de >Cd, 112 de Pb.

- Para el Manto M2, se tiene valores de Vanadio de 437 µg/g, 188 µg/g de Cr, 51 µg/g de Mn, 35 de Co, 126 µg/g de Ni, 136 µg/g de Cu, 237 µg/g de Zn, 81 µg/g de As, 354 de Sr, 0.6 µg/g de >Cd, 94 de Pb

- En cuanto a la muestra del manto M4, se registra 277 µg/g de Vanadio, 175 µg/g de Cr, 139 µg/g de Mn, 34 de Co, 126 µg/g de Ni, 177 µg/g de Cu, 192 µg/g de Zn, 22 µg/g de As, 499 de Sr, 0.6 µg/g de Cd, 64 de Pb.

- La muestra del Manto M6, registra información de 284 µg/g de Vanadio, 152 µg/g de Cr, 46 µg/g de Mn, 21 de Co, 67 µg/g de Ni, 152 µg/g de Cu, 92 µg/g de Zn, 8 µg/g de As, 1752 de Sr, 0.3 µg/g de Cd, 67 de Pb.

De estas muestras, se tiene que la correspondiente al M6, posee el valor mínimo de Cr, Mn, Co, Ni, Zn, As y el valor máximo de Sr y Cd, la muestra del M2, el valor máximo en V, Cr, Ni, Zn, As, mínimo en Cu, Sr.

En el Pozo Úmbita -1, las muestras con mayores GMAC, corresponden a los mantos M3, M11 y M13 y poseen valores de elementos menores y trazas como se relaciona a continuación:

- En la muestra del Manto M3, 438 µg/g de Vanadio, 168 µg/g de Cr, 28 µg/g de Mn, 36 de Co, 134 µg/g de Ni, 168 µg/g de Cu, 298 µg/g de Zn, 41 µg/g de As, 179 de Sr, 1.4 µg/g de >Cd, 106 de Pb.



- Para la muestra del Manto M11, 377  $\mu\text{g/g}$  de Vanadio, 174  $\mu\text{g/g}$  de Cr, 235  $\mu\text{g/g}$  de Mn, 55 de Co, 171  $\mu\text{g/g}$  de Ni, 259  $\mu\text{g/g}$  de Cu, 154  $\mu\text{g/g}$  de Zn, 41  $\mu\text{g/g}$  de As, 240 de Sr, 0.7  $\mu\text{g/g}$  de  $>\text{Cd}$ , 48 de Pb.

- La muestra del manto M12, posee 336  $\mu\text{g/g}$  de Vanadio, 167  $\mu\text{g/g}$  de Cr, 99  $\mu\text{g/g}$  de Mn, 28 de Co, 97  $\mu\text{g/g}$  de Ni, 168  $\mu\text{g/g}$  de Cu, 208  $\mu\text{g/g}$  de Zn, 13  $\mu\text{g/g}$  de As, 204 de Sr, 1.0  $\mu\text{g/g}$  de  $>\text{Cd}$ , 53 de Pb.

En cuanto a las muestras de este pozo con mayor contenido de  $\text{CH}_4$ , la correspondiente al M3, posee valores máximos de V, Mn, Zn, As, Cd, Pb, mientras y mínimos de Mn, Zn, la muestra del manto M 11, posee valores máximos de Cr, Mn, Co, Ni, Cu, As, Sr y mínimos de Zn, Cd, Pb.

En general de las 30 muestras analizadas se tiene un promedio por elemento de 389  $\mu\text{g/g}$  para V, 180  $\mu\text{g/g}$  de Cr, 72  $\mu\text{g/g}$  de Mn, 83  $\mu\text{g/g}$  de Co, 242  $\mu\text{g/g}$  de Ni, 179  $\mu\text{g/g}$  de Cu, 400  $\mu\text{g/g}$  de Zn, 33  $\mu\text{g/g}$  de As, 783  $\mu\text{g/g}$  de Sr, 1,0  $\mu\text{g/g}$  de Cd, 85  $\mu\text{g/g}$  de Pb.

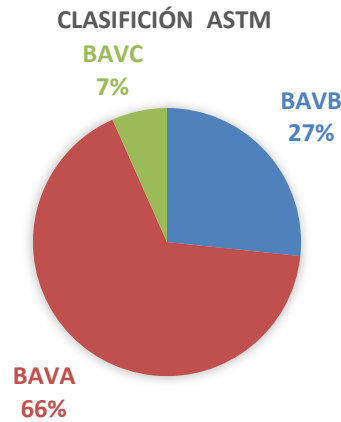
### 5.1.13 Clasificación de los Carbones

La norma ASTM, clasifica los carbones según su grado de metamorfismo o evolución progresiva en la serie natural de lignito a antracita. Esta clasificación establece categorías del carbón basadas en las propiedades que dependen principalmente del grado de metamorfismo al cual fue sometido.

De acuerdo con la norma ASTM, define que la precisión de la clasificación del carbón puede ser afectada por grandes cantidades de material mineral sobre las determinaciones de materia volátil y poder calorífico en el cálculo en base libre de materia mineral<sup>8</sup>.

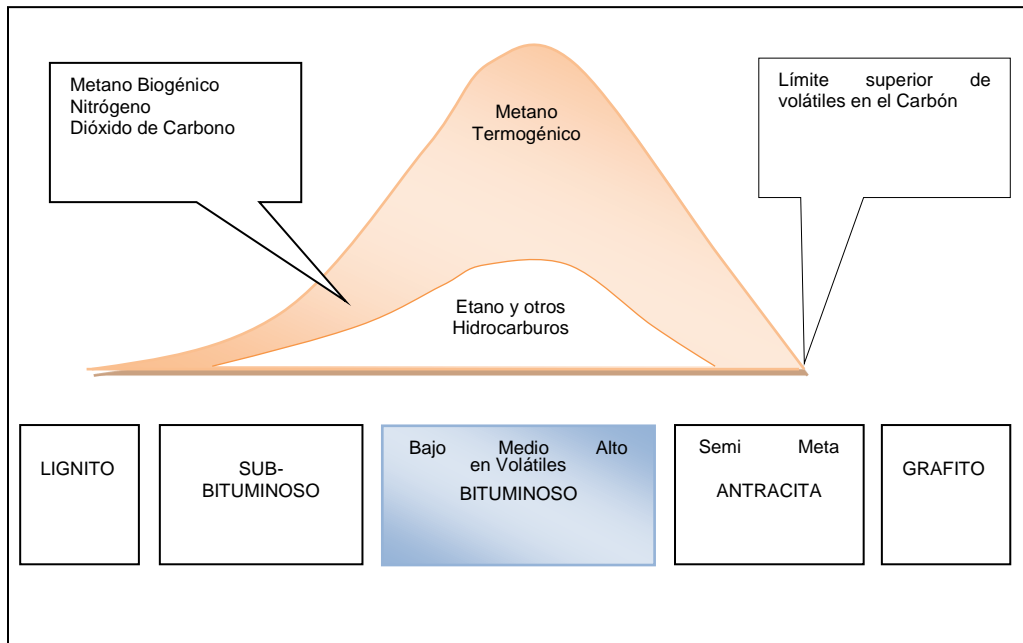
En los carbones analizados, el 66 % (20 muestras) se clasifican como bituminosos altos volátiles A (bav A), un 27% (8 muestras) como bituminosos altos en volátiles B (bav B), de las cuales 6 muestras tienen contenidos superiores al 15% en materia mineral y el 7% (2 muestras) restante como bituminosos altos en volátiles C (bav C), de acuerdo con la Figura 64 y la Tabla 21.

<sup>8</sup> Annual Book of American Standards for Testing and Materials - ASTM 2014, D388-12, Standard classification of coals by rank.



**Figura 64.** Composición porcentual de la clasificación de carbones de acuerdo con la norma ASTM.

Las muestras con mayores contenidos de gas en el Pozo Chinavita-1 (manto M6) y en frente de mina (manto M3), corresponden a carbones tipo Bituminosos altos volátiles A, en el Pozo Úmbita -1, la muestra manto M12, corresponde a un carbón tipo Bituminoso alto volátil B. De acuerdo a esta clasificación los rangos de las muestras que mayor contenido de gas fue medido, están dentro de la ventana de generación de gas de origen termogénico de acuerdo a Law and Rice, 1991 (ver Figura 65).



**Figura 65.** Generación de gas en el carbón Fuente: Law and Rice (1991).

## 5.2 ANÁLISIS PETROGRÁFICOS

Las muestras de carbón de la zona de estudio (30) se prepararon y analizaron petrográficamente de acuerdo con guías y métodos de ensayo del Grupo de Trabajo de Laboratorios de Caracterización y Procesamiento de Minerales y Carbones de la Dirección de Laboratorios, las cuales se basan en las Normas Internacionales ASTM (American Society for Testing and Materials):

- ASTM D2797/D2797M – 11a, empleada en la preparación de muestras de carbón para análisis petrográfico.
- Norma ASTM D2798 – 11a, usada para la determinación de la reflectancia media de la vitrinita (%Rm) del carbón.
- Norma ASTM D2799 – 13, empleada en la determinación de la composición maceral del carbón.

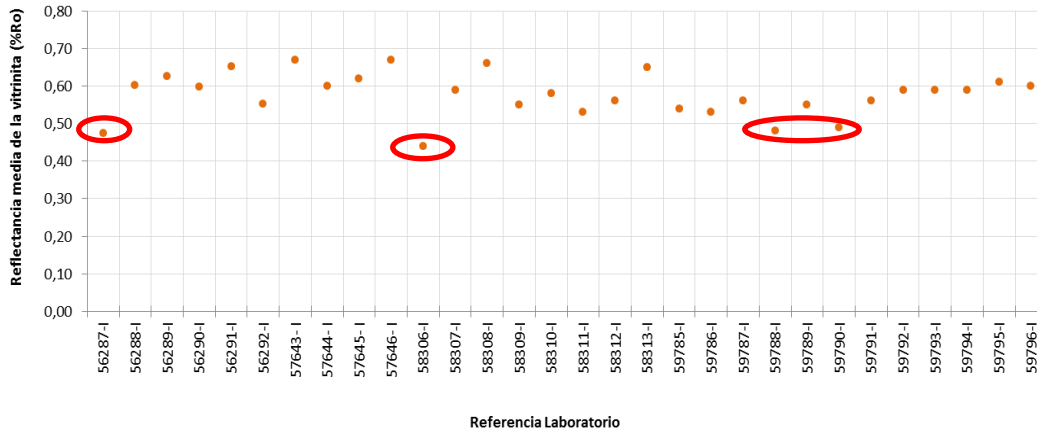
A partir de la medida de la reflectancia media de la vitrinita (%Rm) se determina el rango del carbón y su grado de madurez térmica, parámetros útiles en estudios de la maduración de la roca generadora.

El análisis maceral permite caracterizar los carbones a partir de sus constituyentes reconocibles microscópicamente (vitrinita, inertinita y liptinita), definir el tipo de carbón de acuerdo con su composición maceral, determinar las posibles condiciones de depósito de los carbones y elaborar modelos a partir de las propiedades fisicoquímicas de los grupos macerales con el objetivo de determinar sus usos y modelar su comportamiento en procesos industriales.

Los resultados obtenidos de los análisis realizados para la totalidad de las muestras de carbón se presentan en las siguientes secciones.

### 5.2.1 Reflectancia media de la vitrinita (%Rm)

Aproximadamente un 87% de las muestras analizadas presentan valores de reflectancia en el rango de entre 0,50 y 0,70, a excepción de las muestras 56287-I, 58306-I, 59788-I y 59790-I (ver Anexo G) para las cuales se obtuvieron valores entre 0,45 y 0,50 como se observa en la Figura 66.



**Figura 66.** Reflectancia media de la vitrinita para los carbones en los sectores de estudio.

En este contexto la clasificación por rango a partir de la reflectancia media de la vitrinita (Uribe y Pérez, 1987, ver Figura 67) difiere de los rangos definidos por la Norma ASTM (Tabla 13), la cual emplea como criterios de clasificación los parámetros de materia volátil y poder calorífico, esta diferencia se puede explicar por un aumento en el poder calorífico debido al alto contenido de inertinita el cual es rico en carbono, un 80% de las muestras analizadas presentan contenidos mayores al 11% de este maceral como se observa en la Figura 68.

Las muestras 58306-I, 58307-I, 58310-I, 58313-I, 59789-I y 59791-I (ver Anexo G), que tienen valores de inertinita menores al 10% también presentan los valores más altos de materia mineral y en el caso en particular de las muestras 58306-I y 59789-I son las que exhiben el menor contenido de material vitrinítico.

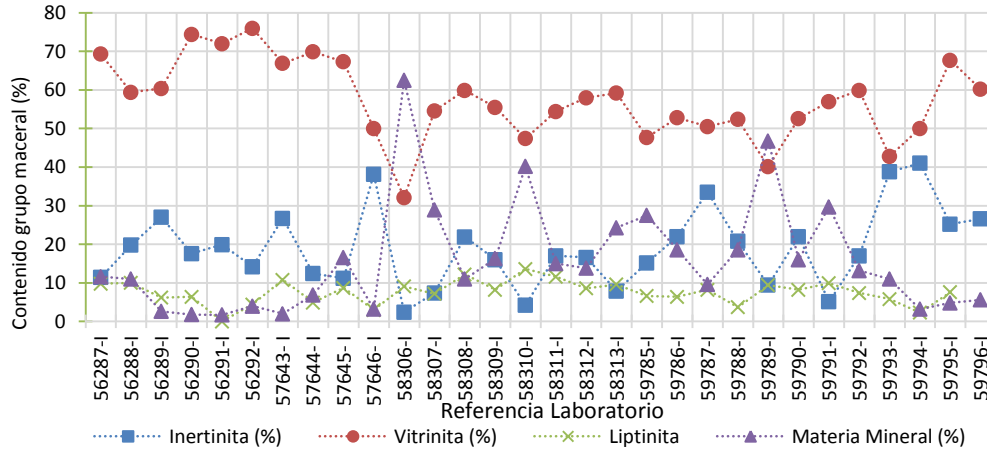
De acuerdo a la Figura 67 y Tabla 14, las muestras analizadas corresponden a carbones con rangos Sub bituminosos B a Bituminosos Alto Volátil C.



**Tabla 14.** Clasificación de carbones por rango a partir de valores de reflectancia de la vitrinita.

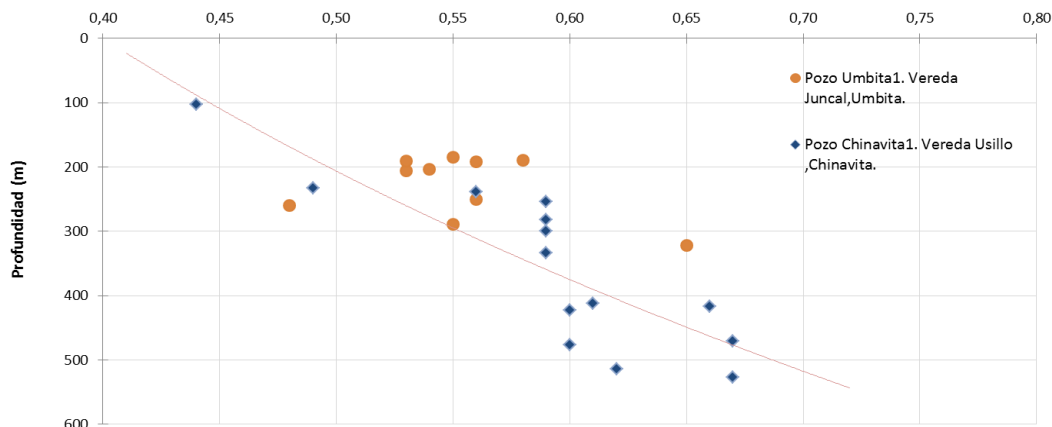
Referencia Laboratorio	%Rm	Clasificación por reflectancia (Uribe y Pérez, 1987)	Clasificación bajo norma ASTM
56287-I	0,47	Sub-bituminoso B	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
56288-I	0,6	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
56289-I	0,63	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
56290-I	0,6	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
56291-I	0,65	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
56292-I	0,55	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
57643- I	0,67	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
57644- I	0,6	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
57645- I	0,62	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
57646- I	0,67	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
58306-I	0,44	Sub-bituminoso B	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
58307-I	0,59	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
58308-I	0,66	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
58309-I	0,55	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
58310-I	0,58	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
58311-I	0,53	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
58312-I	0,56	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
58313-I	0,65	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
59785-I	0,54	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
59786-I	0,53	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL A
59787-I	0,56	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL B
59788-I	0,48	Sub-bituminoso B	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL B
59789-I	0,55	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL B
59790-I	0,49	Sub-bituminoso B	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL B
59791-I	0,56	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL B
59792-I	0,59	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL B
59793-I	0,59	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL B
59794-I	0,59	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL B
59795-I	0,61	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL C
59796-I	0,6	Bituminoso Alto Volátil C	BITUMINOSO ALTO VOLÁTIL C

Fuente: datos del estudio



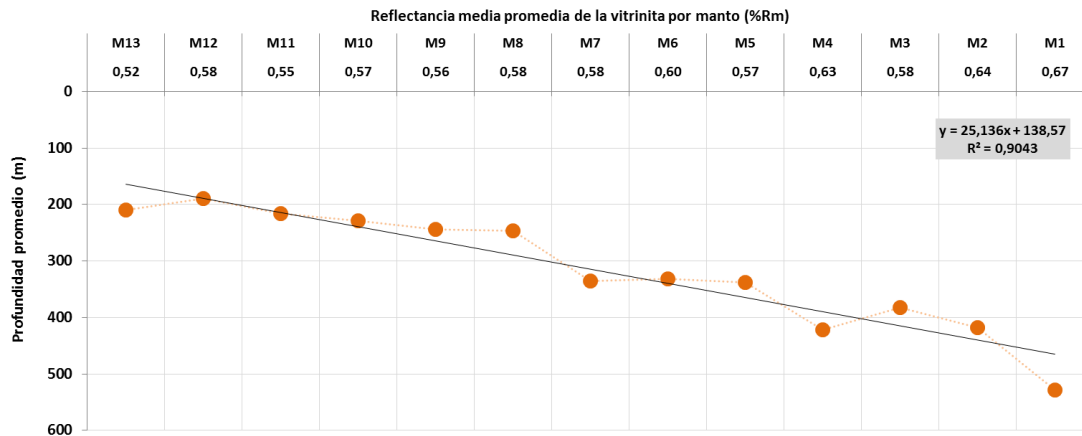
**Figura 68.** Análisis maceral para las muestra de carbón.

La relación de la reflectancia media de la vitrinita con la profundidad para cada pozo se presenta en la Figura 69, como se observa un aumento en la profundidad se relaciona con el aumento en la reflectancia, comportamiento típico de la correlación entre estos dos parámetros (en STACH *et al.*, 1982), adicionalmente se identifica que las muestras del Pozo Úmbita -1 se encuentran localizadas en un mayor porcentaje en el rango de reflectancia de 0,50 a 0,60 con profundidades cercanas entre 200 m y los 300 m, mientras las muestras del Pozo Chinavita-1 se distribuyen en un rango más amplio.



**Figura 69.** Relación de la profundidad con la reflectancia media de la vitrinita (%) por pozos.

Al promediar los valores de reflectancia y de profundidad por mantos y graficarlos en orden ascendente en función a la reflectancia se obtiene la Figura 70, en la cual se observa que el Manto M13 presentan los valores más bajos de reflectancia y profundidad, mientras el Manto M1 exhibe los valores más altos de reflectancia y profundidad, comportamiento típico ya que los carbones a mayor profundidad han sufrido los efectos del metamorfismo por un período de tiempo más largo.



**Figura 70.** Comportamiento de la reflectancia media de la vitrinita con la profundidad para cada manto de carbón.

Otra relación importante a tener en cuenta es materia volátil - reflectancia (Figura 71), se identifica que las muestras correspondientes a los frentes de minas a pesar de presentar valores de reflectancia desde 0,47 a 0,65 se encuentran distribuidas en valores muy cercanos a 40,00% de materia volátil, de igual manera para un mismo valor de reflectancia de 0,56 y 0,59 (marcados en la Figura 71) se presentan distintos valores de materia volátil, en estos casos se confirma la influencia de la composición maceral en la relación de la materia volátil y con el rango alcanzado.

Cuando se grafica el contenido de materia volátil y reflectancia por mantos (Figura 72) se observa que a medida que aumenta la reflectancia disminuye el contenido de materia volátil, comportamiento similar a la Figura 70 en la que los mantos de carbón se organizan y distribuyen desde el Manto M13 en los valores bajos de reflectancia con altos contenidos de materia volátil y el Manto M1 en valores altos de reflectancia con contenidos de materia volátil bajo, tendencia característica de estas variables relacionadas con el grado de carbonificación de los carbones. Por otra parte los mantos M9, M11 y M13 presentan un alto contenido de materia volátil (>42%) y una reflectancia baja (<0,55) correspondiente a valores altos de liptinitas (>8,0%) (Figura 76).



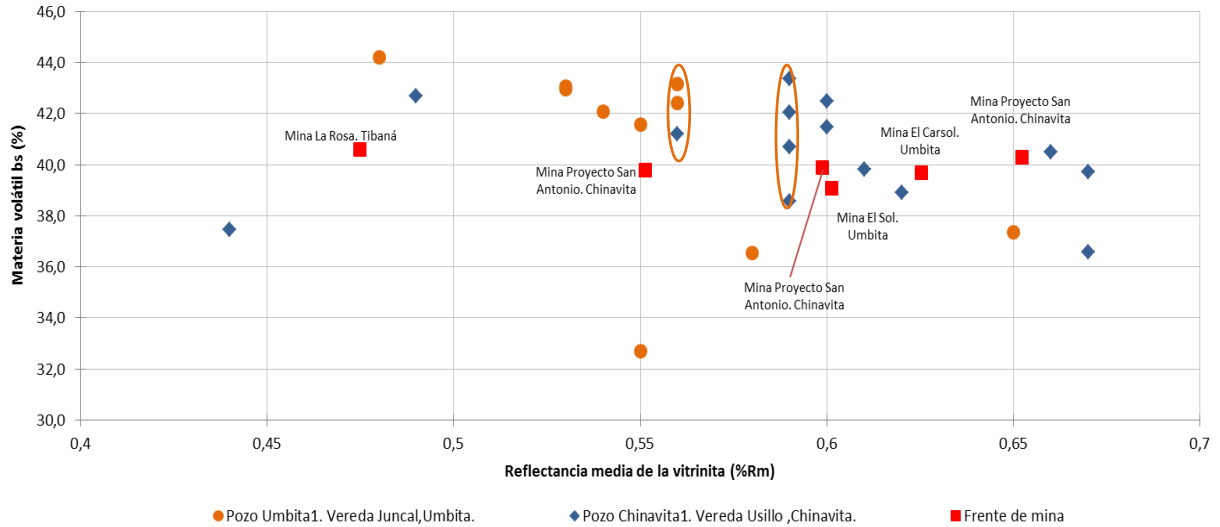


Figura 71. Relación materia volátil bs reflectancia por puntos de muestreo.

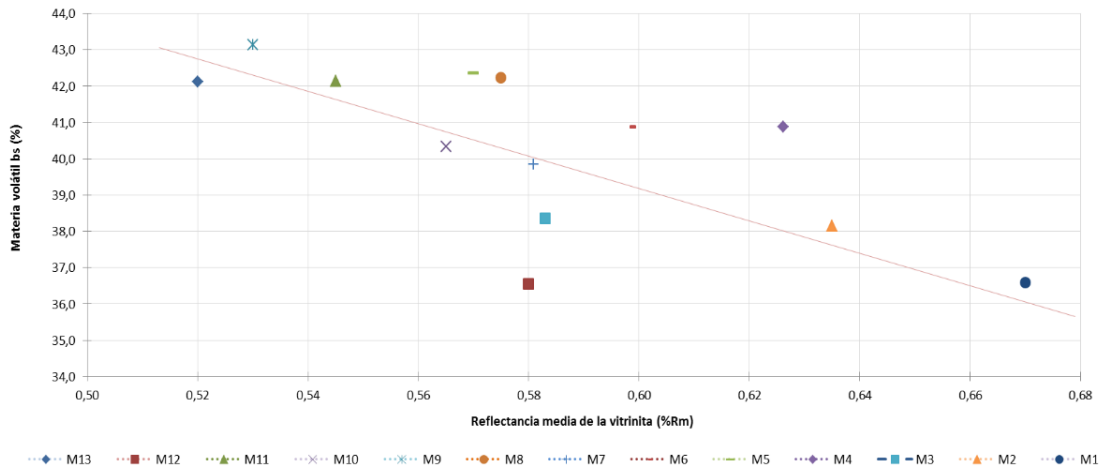
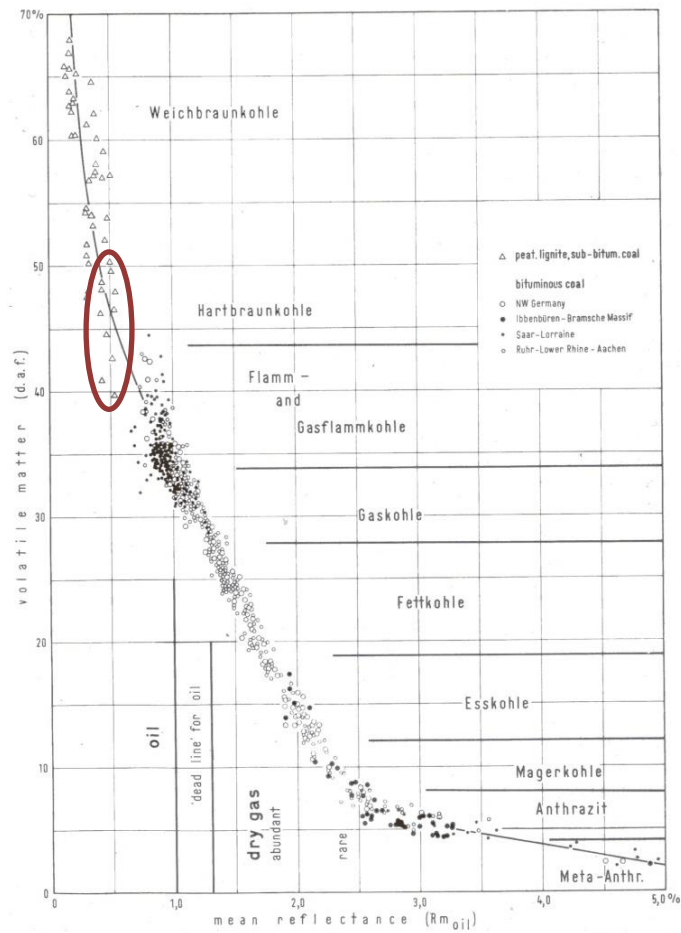


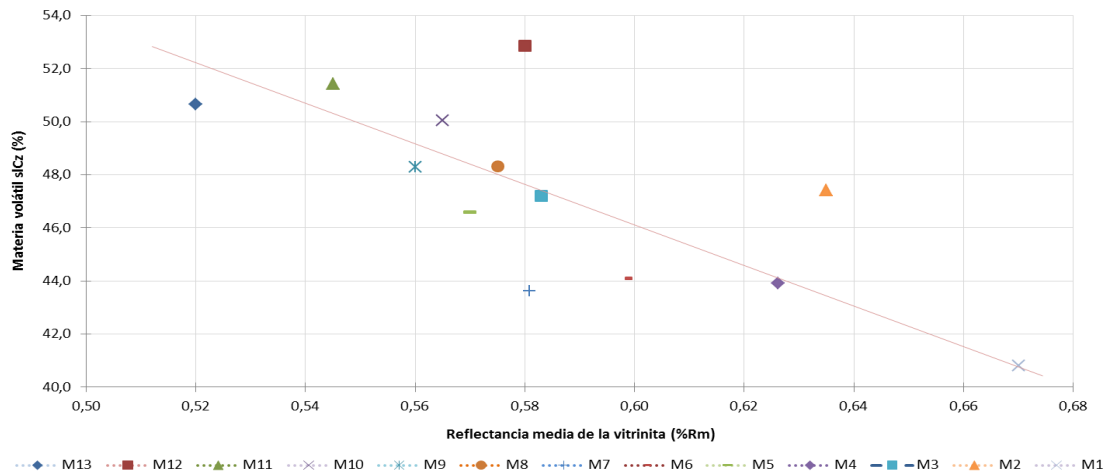
Figura 72. Relación materia volátil bs reflectancia por mantos.

La Figura 73 (en STACH, et al 1982) presenta la relación entre la materia volátil en base seca libre de ceniza y la reflectancia de la vitrinita para diferentes estados de carbonificación del carbón con la presencia de gas natural y aceite para carbones alemanes. Al graficar la materia volátil en base seca libre de ceniza y reflectancia de la vitrinita para los mantos de los carbones estudiados (Figura 74) se observa que estos se encuentran ubicados en la zona señalada en la Figura 73 que

corresponden a carbones sub-bituminosos y bituminosos de acuerdo con la clasificación realizada.

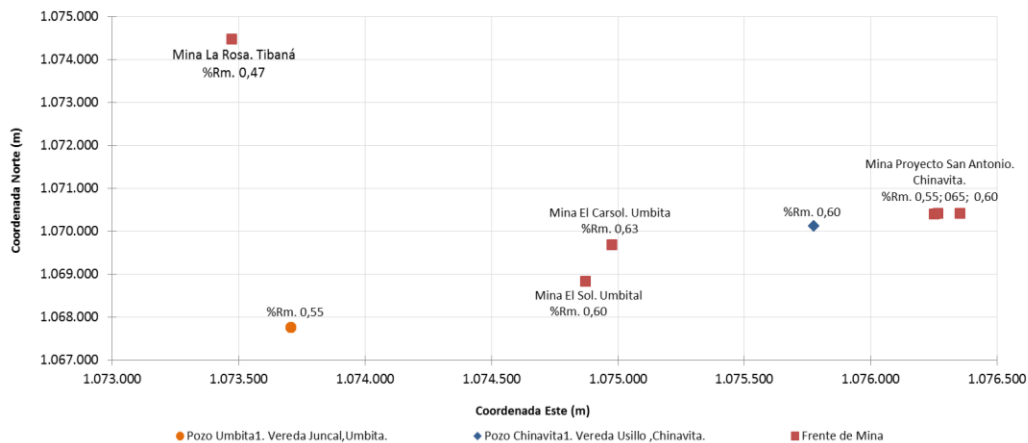


**Figura 73.** Relación materia volátil  $slCz$  Vs reflectancia (Tomado de STACH, et al 1982).



**Figura 74.** Relación materia volátil sICz reflectancia por puntos de muestreo.

De manera general en la Figura 75 se muestra la distribución de los promedios de la reflectancia de la vitrinita para cada uno de los puntos de muestreo, se observa que las muestras que se orientan en sentido NW tienen valores de reflectancia entre 0,55 a 0,65, a diferencia de la muestra Mina La Rosa que presenta un valor de 0,47 y se ubica hacia el norte; sin embargo es necesario acalarar que los valores de reflectancia de los frentes de mina corresponden a una sola muestra a diferencia de los valores de reflectancia de los pozos que son promedios de las muestras tomadas en esos puntos. De acuerdo con lo anterior se presenta un aumento de la reflectancia hacia el NW.



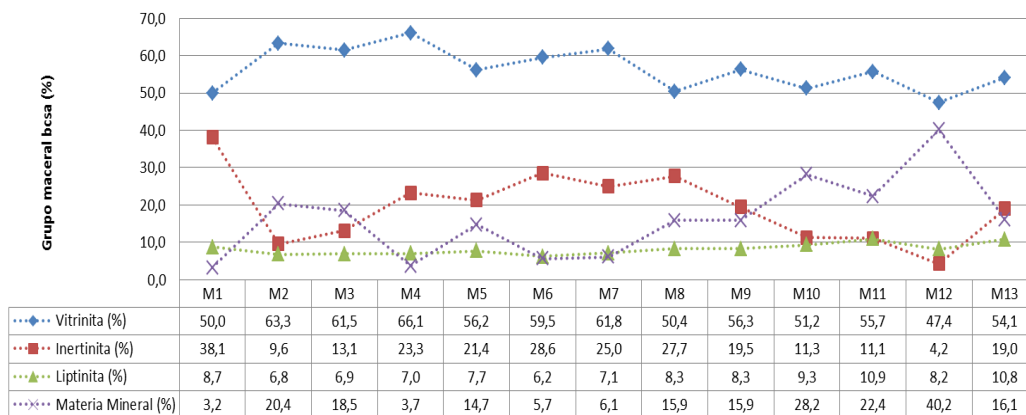
**Figura 75.** Distribución espacial de reflectancia por puntos de muestreo.

Al analizar las muestras que obtuvieron mayor contenido de gas, en el caso del Pozo Úmbita -1(muestra 15842807027 - 58310-I) del manto M12, se tiene una reflectancia media de la vitrinita de 0.58 % ; para el Pozo Chinavita-1 (muestra 15172807017 - 59795-I) de 0.61% y para frente de mina (muestra 15172807004 - 56290-I) de 0.60%. El mayor valor lo registra la muestra del Pozo Chinavita-1, donde se registra mayor concentración de gas.

### 5.2.2 Determinación de la composición maceral

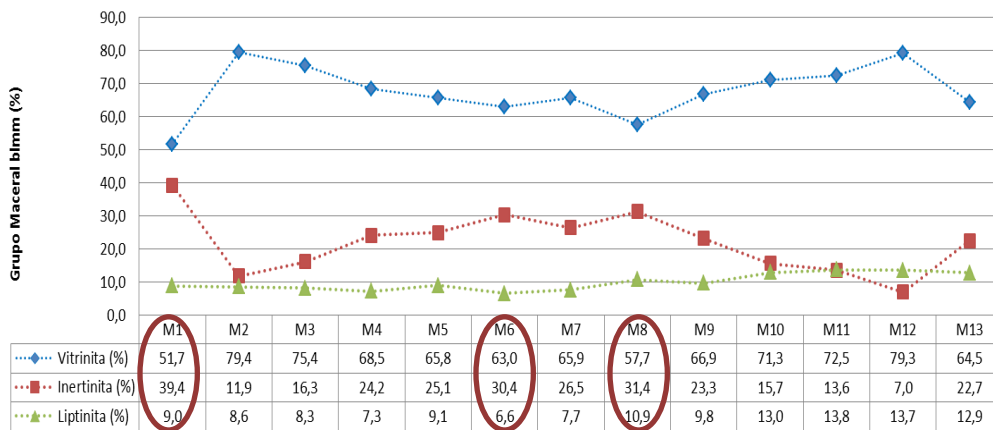
Este análisis se realizó teniendo en cuenta los grupos de macerales individuales y a partir de este se obtuvo el porcentaje de cada uno de los mismos por manto. Los macerales del grupo de la vitrinita e inertinita se relacionan de acuerdo con el grado de conservación y reflectancia, mientras que el grupo de la liptinita se caracteriza por macerales que tienen el mismo origen citado por Mejía L., et al 2006.

La Figura 76 muestra que los contenidos de vitrinita para todos los mantos son mayores al 50% particularmente para los mantos M2, M3, M4 y M7 con un 60%, el grupo maceral inertinitico esta presente en la mayoría de los mantos con porcentajes entre el 10% a 30% a excepción de los Manto M1 y Manto M12 que presentan valores del 40% y del 5% respectivamente, el contenido liptínico para todas las muestras se encuentran por debajo del 10% y la materia mineral es variable en toda la secuencia, sin embargo el manto M12 tiene un 40% de materia mineral valor muy por encima del resto de mantos; en todos los casos la materia mineral corresponde principalmente a pirita y minerales arcillosos.



**Figura 76.** Análisis maceral bcsa por mantos.

Los resultados del análisis del contenido de macerales en base libre de materia mineral (Figura 77) exponen que la mayor parte de los mantos se localizan entre un 65% a 80% de contenido de vitrinitas, lo que hace que estos carbones sean considerados según la clasificación de Alpern, (1980) como vítricos ya que en general tienen un contenido superior al 65% de este maceral, así mismo debido a que la presencia de fusinita es mayor al material liptinitico se consideran que tiene tendencia fúscica (Mejía, 2014); sin embargo se exceptúan los mantos: M1, M6 y M8 en los que los contenidos de vitrinita están por debajo del 65% y a su vez presentan los valores más altos en inertinita como se observa en la Figura 76.



**Figura 77.** Análisis maceral blmm por mantos.

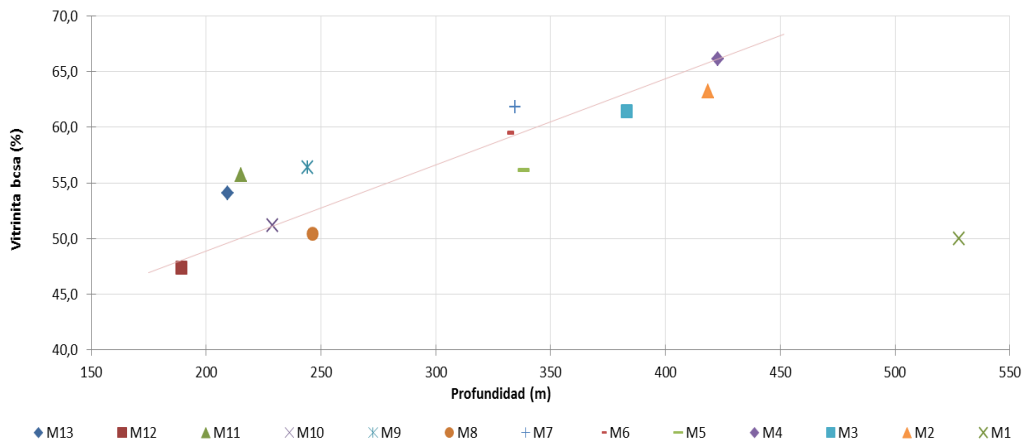
El cálculo en blmm modifica el comportamiento de los grupos macerales en particular vitrinita, en el caso del manto 12 la vitrinita pasa de un 47,4% a 79,3% precisamente por el alto contenido de materia mineral (40,2%) determinada en el análisis que implica un enriquecimiento principalmente de este maceral. Los valores máximos de la vitrinita se encuentran en M2 y M12 con mínimos en M1, M8 y M13, comportamiento antagónico a la inertinita en esas mismas muestras como se observa en la Figura 77.

En las Figuras 78, 79 y 80, se muestra el comportamiento de los grupos macerales en función a la profundidad por mantos y donde se puede establecer que:

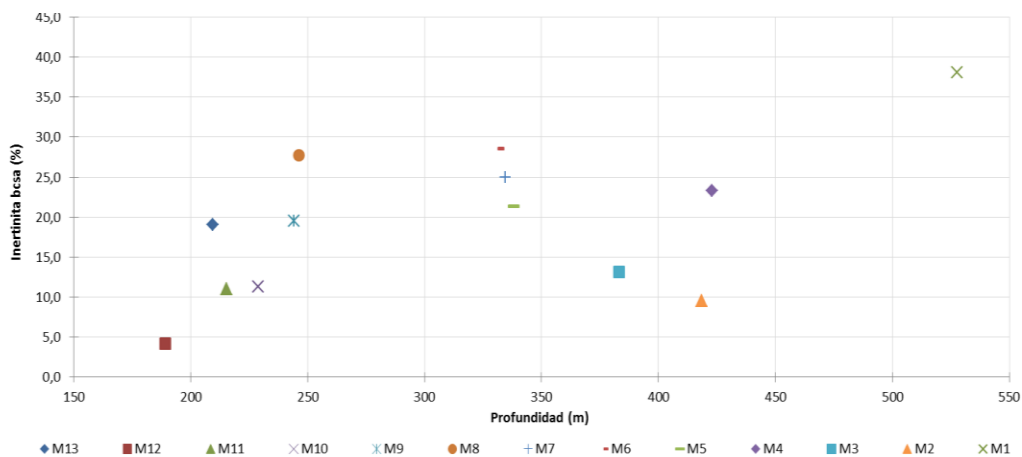
- El contenido de vitrinita aumenta a medida que aumenta la profundidad, sin embargo el manto M1 es la excepción ya que presenta un contenido alto de inertinita como ya se había indicado (Figura 78).
- El comportamiento del material inertinitico puede interpretarse por la conformación de 2 grupos, uno de los cuales comprende los mantos del M13, M12, M11, M10, M9, M8 en el rango de profundidad de 180 a 250 m con aumento de inertinita a mayor profundidad, mientras el segundo grupo está

conformado por los mantos M7, M6, M5, M4, M3 y M2 en el rango de 330 a 420 m aproximadamente en el que se observa la disminución de inertinita a medida que aumenta la profundidad. Al igual que en la Figura anterior el manto M1 se sale de este comportamiento.

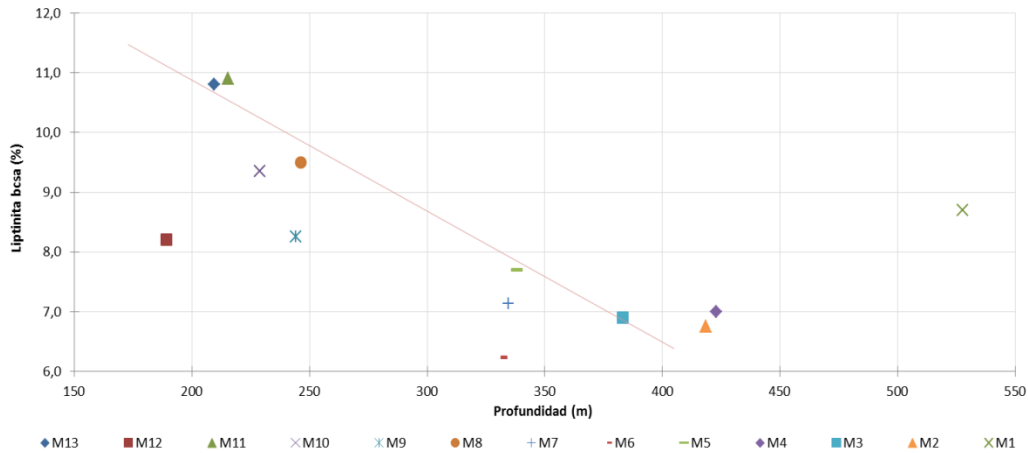
- La presencia del material liptinitico disminuye a medida que aumenta la profundidad, aunque este maceral presenta un poco más de dispersión respecto a la vitrinita e inertinita.



**Figura 78.** Variación de la vitrinita bcsa por manto de carbón respecto a la profundidad.



**Figura 79.** Variación de Inertinita por manto de carbón respecto a la profundidad.

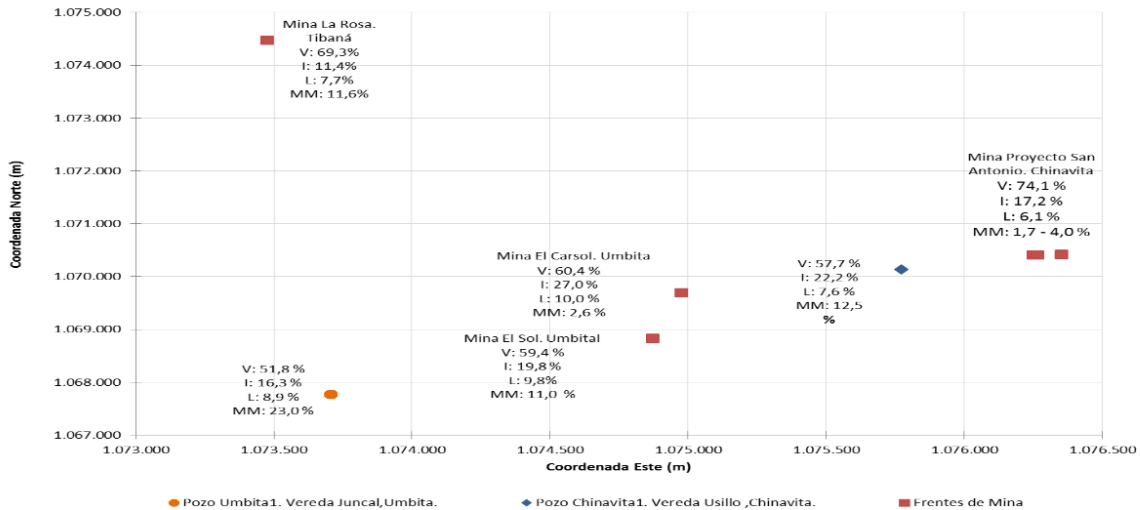


**Figura 80.** Variación de liptinita bcsa por manto de carbón respecto a la profundidad.

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis por mantos se tiene que:

- Los contenidos de vitrinita indican que el resultado de la frecuente saturación de agua de los medios de depósito dificultan la oxidación de la turba (en Mejía, *et al* 2006).
- Los contenidos de inertinita posiblemente corresponden a un contenido relativamente alto de oxígeno cerca de la superficie de la turba o a una desecación muy intensa, que transformó los restos vegetales tanto antes de ser depositados como ya acumulados en la turba, lo que originó por fluctuaciones en el nivel de las aguas en la turbera inicial, facilitando la oxidación de la parte más superficial de los restos vegetales depositados (Ingeominas, 1994).
- El contenido de liptinitas demuestra una pérdida del material liptínico inicial de la turba.
- Como se indicó la materia mineral corresponde a pirita dispersa o de tipo framboidal y minerales arcillosos.

En la Figura 81 se muestra la distribución de los grupos macerales promediados por pozos y frentes de mina, en sentido NW se observa un aumento en el contenido de vitrinita con valores relativamente estables de inertinita y liptinita y con disminución de la materia mineral.



**Figura 81.** Análisis maceral bcsa en los puntos de muestreo.

El carbón al presentar un alto contenido en “Ro” Reflectancia media de la vitrinita, se dice que es un carbón que ha tenido mayor madurez térmica y por lo tanto tiene menos contenido en cenizas, siendo estas características de interés en carbones con buenas perspectivas para la generación de GMAC.

De los valores de Ro registrados, se puede concluir que existe una relación inversa entre la “Ro” y el contenido de cenizas, a mayor contenido de “Ro” menor contenido de cenizas.

Al analizar las muestras que obtuvieron mayor contenido de gas, en el caso del Pozo Úmbita -1(muestra 15842807027 - 58310-I) del manto M12, se tiene porcentajes de macerales como Vitrinita en un 47.4%, Exinita en un 8.2% y Inertinita en un 4.2%, la materia mineral se presenta en un 40.20%; para el Pozo Chinavita-1 (muestra 15172807017 - 59795-I) los macerales Vitrinita se presenta en un 67.7%, la Exinita en un 2.3% la Inertinita en un 25.2%, la materia mineral en un 4.80%; en frente de mina (muestra 15172807004 - 56290-I), la vitrinita se presenta en un 74.4%, la Exinita en un 6.20%, la Inertinita en un 17.60% y la materia mineral en un 1.80%



## 6. MEDICIONES DE CONTENIDOS DE GAS Y CROMATOGRAFIA

### 6.1 MEDICIONES DE CONTENIDOS DE GAS METANO

Para determinar el potencial de GMAC que un área de interés pueda tener, es necesario adelantar mediciones de contenidos de gas en toda la secuencia carbonífera existente en la misma, que como en el presente caso, están basadas en el empleo de métodos directos que permiten medir tanto la desorción de núcleos de perforación en un equipo hermético (canister) una vez extraídos en campo, como el gas desorbido y residual en función del tiempo en cada muestra y bajo condiciones de presión y temperaturas que simulan las características del yacimiento en un ambiente de laboratorio. El empleo de los métodos Directos, es importante teniendo en cuenta que una de las características que diferencia los reservorios de GMAC de los convencionales, es el hecho de que el metano puede encontrarse almacenado en los carbones de diversas maneras: como gas disuelto en el agua de la formación, como gas libre dentro de las fracturas o poros, como moléculas de gas absorbidas en el carbón, siendo este último el principal proceso de almacenamiento del gas en el carbón que puede llegar a representar el 98% del gas contenido en estas capas<sup>9</sup>.

En el área de estudio, se muestrearon para medición de contenidos de gas un total 32 muestras entre capas de carbón, arcillolitas carbonosas y arenitas de la formación Guaduas, tanto en los pozos como en algunos frentes de mina, como se indica en la Tabla 15:

---

<sup>9</sup> Determinación del bloque con mejores posibilidades de gas asociado al carbón GAC de la zona carbonífera ubicada al Nor-oriente del municipio de Sogamoso en el departamento de Boyacá, Luis Carlos López Walteros, Fonseca Rojas Jessel Andrea, UPTC-Sogamoso. Trabajo de grado. 2003.

**Tabla 15.** Muestras analizadas en el área de estudio para GMAC.

Frente de mina /Pozo	Número de muestras	Material
Pozo Umbita-1	10	carbón
Pozo Chinavita-1	14	carbón
	2	arcillolita
		carbonosa
	1	arenita
Frente de mina	5	carbón
<b>Total</b>	<b>32</b>	

*Fuente: Datos del estudio*

Las mediciones estuvieron a cargo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), sede Sogamoso y se realizaron en el laboratorio de GMAC de la misma.

### 6.1.1 Metodología utilizada para calcular el contenido de gas asociado a los mantos de carbón (GMAC)

El contenido de gas presente en un manto de carbón, se puede calcular a través de la estimación y sumatoria de tres componentes:

$$\text{CONTENIDO DE GAS} = \text{gas perdido} + \text{gas desorbido} + \text{gas residual}$$

De donde:

- El *Gas perdido*, corresponde al gas escapado del carbón, entre el tiempo en que el manto de carbón es penetrado por la broca y el tiempo en que la muestra es colocada y sellada dentro del canister (recipiente hermético). Su valor se calcula mediante la extrapolación de los datos de la prueba de desorción durante las dos primeras horas por los métodos de U.S Bureau of Mines y Smith y Williams (1984) y se expresa en  $\text{cm}^3/\text{gr}$ ,  $\text{pies}^3/\text{ton}$ ,  $\text{pie}^3/\text{ton}$ .

- El *Gas desorbido*, es el gas adsorbido en la muestra de carbón que se mide en el canister a través de la desgasificación del mismo, durante un período de 2 a 3 meses; las unidades corresponden a  $\text{cm}^3 \text{ gas}/\text{gr carbón}$ , o  $\text{pies}^3 \text{ gas}/\text{ton carbón}$ . La

determinación del gas desorbido corresponde a la sumatoria de todos los volúmenes medidos en esta prueba (Anexo H).

- *El Gas residual*, es el gas que permanece atrapado o absorbido en la matriz del carbón, después que se ha completado la prueba de desorción. Este contenido de gas se expresa en  $\text{cm}^3/\text{gr}$ ,  $\text{pies}^3/\text{ton}$  o  $\text{pie}^3/\text{ton}$  con la previa estandarización de la presión y la temperatura (STP).

### 6.1.2 Procedimiento en la medición de contenidos de GMAC

El procedimiento para conocer el contenido de gas en una muestra de carbón, posee varias etapas de desarrollo que comprende tres Fases principales: campo, laboratorio y procesamiento de información.

#### 6.1.2.1 Obtención de muestras en campo

Con el fin de obtener muestras representativas en cada una de las perforaciones adelantadas y en los frentes de mina, se realizaron las siguientes actividades:

a. Prueba de hermeticidad en los canister a utilizar. Con una bomba de aire se le aplica aire a presión al canister, luego se deja unos minutos y se sumerge en agua para poder verificar que no haya ninguna fuga y este se encuentre en condiciones adecuadas para ser utilizado (prueba que se realiza tanto en laboratorio, como en campo (ver Figura 82).

b. Registro de los tiempos en que se empieza y termina de perforar el manto de carbón, el tiempo en que se comienza a subir el núcleo de perforación y el tiempo de llegada a la superficie de la misma, esto con el fin de calcular el volumen de gas perdido en la muestra. En el muestreo en frente de mina, se tienen en cuenta los tiempos en los cuales se obtiene la muestra y el tiempo en que es sellado el canister.



**Figura 82.** Pruebas de hermeticidad en los canister. Muestreo frente de mina.

- c. Recepción y lavado de los núcleos de perforación en superficie.
- d. Descripción de la muestra.
- e. Trituración de la muestra para facilitar el desplazamiento del gas e introducción de la misma en el recipiente sellado (canister), donde se debe tener presente llenar completamente el canister con carbón y material inerte en lo posible de tamaños finos, cuando la muestra de carbón sea muy reducida.
- f. Sellamiento del canister, se emplea para mayor seguridad la aplicación de silicona en la ranura del canister y en la tapa del mismo (ver Figura 83).



**Figura 83.** Pruebas de hermeticidad en los canister. Muestreo frente de mina.

g. Registro del tiempo de sellado.

h. En esta fase de trabajo, se tiene en cuenta, si hay suficiente muestra, extraer una o dos para medición de contenidos de gas metano del mismo manto y una cantidad mayor e igual a 500gr para los análisis fisicoquímicos del carbón, de tal manera que se optimice los tiempos con los cuales se puede contar con resultados de laboratorio tanto para clasificación, caracterización de carbones como para realizar las respectivas correcciones a los volúmenes de gas obtenidos.

#### 6.1.2.2 Prueba de desorción en campo (Gas Perdido)

A través de esta prueba, se mide la desgasificación del carbón, permitiendo su salida. El gas, es medido por el desplazamiento del agua en una columna volumétrica.

Una vez introducida la muestra en el canister y realizado el sellado correspondiente, se adelantan las siguientes acciones:

a. Se conecta una bureta al canister a través de una manguera flexible.

b. Se registra la hora, la temperatura y la presión del lugar donde se realiza el muestreo.

c. Se abre la válvula del canister que permite la salida del gas el cual es medido por el desplazamiento del agua en una columna volumétrica (bureta, ver Figura 84). El dato de gas Desorbido, corresponde a la diferencia entre el volumen final y el volumen inicial registrado en la bureta.



**Figura 84.** Sistema de medición del gas perdido en muestras de carbón pozo Úmbita -1.

d. Se cierra la válvula y se desconecta la manguera del canister, se espera a que se establezca el volumen inicial en la bureta. La medición se hace durante las dos primeras horas, cada 15 minutos o a intervalos de tiempo que el muestreador considere, en el cual se haya recuperado la muestra para nuevamente ser objeto de medición.

e. El gas medido corresponde al gas perdido de la muestra de carbón y se calcula a través del método de U.S Bureau of Mines (Diamond and Levine, 1981).

#### 6.1.2.3 Mediciones en laboratorio

**Prueba de desorción.** Una vez los canister han sido sellados herméticamente, se debe iniciar la medición de gas desorbido en campo hasta que estos sean enviados al laboratorio para proseguir allí el protocolo correspondiente, en el cual se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- a. Pesar el canister sellado herméticamente y por diferencia de pesos (con respecto al peso del canister) obtener el peso de la muestra.
- b. Los canister deben conservar una temperatura constante durante el tiempo de medición (ver Figura 85), para ello se emplean baños termostáticos que garanticen el mantenimiento de temperatura necesaria en los canister. La temperatura debe ser aproximada a la del yacimiento de carbón, para lo cual, in situ, se mide la temperatura del subsuelo del área o sitio de la perforación. Si no se puede medir la temperatura directamente, se utiliza el gradiente geotérmico que es de  $1^{\circ}\text{C}$  por cada 33 metros o se determina el gradiente geotérmico de la zona y se extrapola a la profundidad de la muestra.



**Figura 85.** Conservación de la temperatura de los canister en un baño termostático.

- c. Conectar el canister a la bureta, abrir la válvula, si se presenta succión la válvula del canister debe ser cerrada inmediatamente registrando la cantidad de gas succionado, la cual se le resta a las lecturas acumulativas del gas de-adsorbido (ver Figura 86).



**Figura 86.** Medición de contenidos de gas metano en muestras de pozo. Sistema de medición con control de temperatura (izquierda) y sistema de medición con buretas (derecha).

- d. Desconectar la manguera y esperar que el nivel del agua en la bureta vuelva al punto arbitrario o cero (volumen inicial  $V_0$ ).
- e. Conectar nuevamente, abrir la válvula y tomar la primer lectura del volumen de gas liberado (volumen final  $V_f$ ). El volumen de gas liberado se obtiene mediante la siguiente relación:

$$\text{Gas medido} = V_0 - V_f$$

- f. Cerrar la válvula y desconectar la manguera del canister, se espera a que se estabilice el nivel de agua en el manómetro y se conecta repitiendo el proceso anterior para las siguientes lecturas (durante un período aproximado de 2 a 3 meses, tiempo que depende de la cantidad de gas contenido en la muestra analizada).



g. Adicionalmente se consigna en el formato dispuesto para tal fin, al momento de cada medición la temperatura, presión, hora y fecha. Este procedimiento se repite para cada muestra de corazón obtenida de cada uno de los mantos de carbón encontrados durante la perforación del pozo (Anexo H).

h. Se continúan realizando las pruebas de desorción periódicamente, consistentes en medir la cantidad de gas liberado y presión a intervalos de tiempo cada vez mayores hasta que la tasa de liberación de gas sea prácticamente nula.

**Medición Gas Residual.** Una vez finalizadas las pruebas de desorción, se realiza la medición del gas residual, teniendo en cuenta que parte de este es absorbido en la matriz del carbón; para ello, se retira la muestra de carbón del canister y se parte en cuartos. Se toma una de estas partes y se coloca en un contenedor para mezclas de gases o en un molino de bolas que debe ser sellado herméticamente y conectado a un manómetro para medir el contenido de gas residual (ver Figuras 87 y 88). El carbón es pulverizado a malla 60 para liberar el gas remanente de la muestra y así poder realizar la medición de la misma manera que se hace la medición del gas de desorción.



**Figuras 87 y 88.** Molino empleado para la determinación de gas residual en una muestra de carbón.

Luego de finalizadas las mediciones, se envía la muestra de carbón al laboratorio para análisis próximos, determinando humedad, % de cenizas, poder calorífico y contenido de azufre y el análisis petrográfico que incluye reflectancia a la vitrinita y análisis maceral, con esta información se puede analizar las características de la historia del enterramiento e identificar las partes de la cuenca donde la reflectancia de la vitrinita está entre 0,5 y 1,6%, rango que se ha señalado en algunos estudios de los años 90s, (ECOPEL-ICP), como de interés para establecer los carbones con mayores perspectivas para adelantar proyectos de GMAC. De esta forma se eliminan áreas con poco o excesivo enterramiento no óptimas para la explotación.

#### 6.1.2.4 Procesamiento de la información

Con los datos obtenidos de las pruebas de desorción (tiempos, volúmenes, presiones y temperaturas registradas), se procede a calcular el contenido total de gas a condiciones estándar de la siguiente manera:

- Cada lectura de gas medido y acumulado es dividida entre el peso de la muestra seca para así obtener el contenido de gas de la muestra.
- Se realiza la corrección a presión y temperatura estándar (STP) de los datos obtenidos en la medición de gas perdido, gas desorbido y gas residual. Dicha estandarización se hace mediante la ecuación generada por Close, 1989:
- 

$$\text{Volumen STP} = \frac{\text{Volumen medido} * (\text{Presión ambiente}/29.92)* 520}{460 + \text{Temperatura ambiente } ^\circ\text{F}}$$

Dónde:

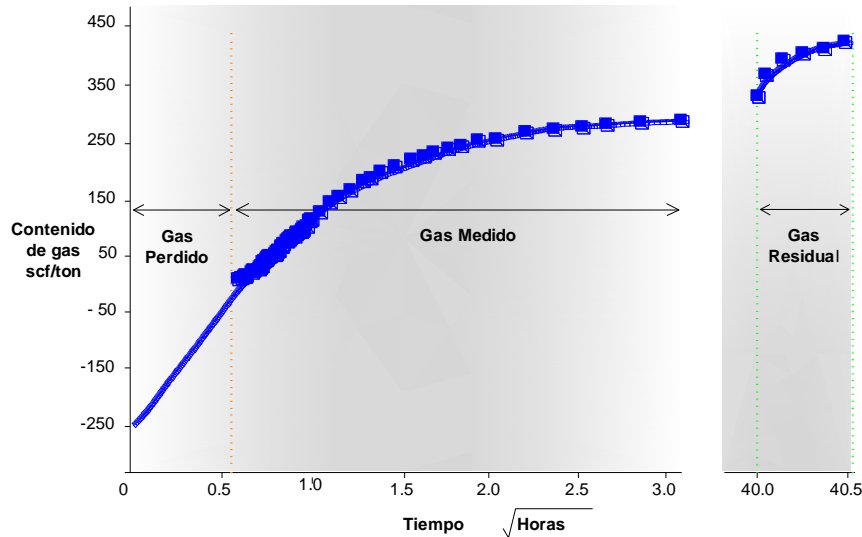
*Volumen medido* = Es aquel tomado en la prueba de de-adsorción

*Presión Estándar* = Equivale a 29.92 pulgadas de mercurio

*Temperatura ambiente* = Es expresada en grados Fahrenheit.

- Posteriormente se grafica el contenido de gas acumulado Vs tiempo (pies<sup>3</sup>/ton Vs  $\sqrt{\text{horas}}$ ), para obtener la curva acumulativa de desorción, obtenida de las pruebas de desorción (ver Figura 89).

Cuando el canister ha succionado aire se puede detectar graficando el contenido acumulado de gas Vs. tiempo, pues la curva se vuelve asintótica para algunos valores. En el caso que el aire entre a la cámara, la actividad biológica resultante provoca que la curva se rompa con este acercamiento asintótico y diverge de su trayectoria normal.



**Figura 89.** Curva de desorción, donde se aprecia los intervalos para los contenidos de gas perdido, medido y residual.

### 6.1.3 Resultados obtenidos

Una vez calculados los valores de gas perdido, desorbido y residual, se procedió a realizar las correcciones a los mismos (Ver Anexo H) con base en la información de los análisis fisicoquímicos de las muestras colectadas objeto de medición de contenidos de GMAC, obteniéndose el valor de gas total libre de cenizas (de acuerdo a corrección por parámetros que no generan metano como La humedad, ceniza y azufre para cada caso), como se muestra a continuación:

#### 6.1.3.1 Pozo Úmbita -1

Los valores de contenidos de metano libres de cenizas en las 10 muestras analizadas de acuerdo a la información registrada en la Tabla 16, varían para las capas de carbón entre 12,90 y 90,855 pies<sup>3</sup>/ton, este último valor corresponde al Manto M12, ubicado hacia el techo de la secuencia carbonífera de la Formación Guaduas, identificado a 189,15 m de profundidad, con una Ro de 0,58% y un

rango ASTM de un carbón Bituminoso alto volátil B (bav B); los valores más bajos corresponden al Manto M8, ubicada hacia la parte media de la secuencia, con Ro de 0,54% y clasificación ASTM para un carbón Bituminoso alto volátil B (bav B).

En este pozo no se muestrearon respaldos.

Se empleó para hacer la corrección a los volúmenes de gas, los valores de Cenizas en base seca (Cz) obtenidos en los análisis fisicoquímicos debido a que son mayores que los de materia mineral; para este pozo se tienen valores entre 5.16% a 39.24% en base seca.

#### 6.1.3.2 Pozo Chinavita-1

De acuerdo con la Tabla 17, en el pozo Chinavita-1, los valores de contenidos de GMAC libres de Cenizas para las 14 muestras de carbón analizadas, varían entre 57.64 a 308.07 pies<sup>3</sup>/ton, siendo este último valor el registrado por una capa de carbón identificada como Manto M6 (Muestra PChi-1:9), ubicada hacia la parte media de la secuencia carbonífera a 411,22 m de profundidad, con un valor de Ro de 0.61% y un rango ASTM para un carbón Bituminoso alto volátil A (bav A); el valor más bajo corresponde a una cinta, ubicada a 103.34 m, con un valor de Ro de 0.44% y un rango de un carbón Bituminoso alto volátil C (bav C).

En las muestras PChi-1:1, PChi-1:5, PChi-1:13, PChi-1:14, los valores de Cz supera el 20%, lo cual incidió en el valor obtenido de Gas total. En general, los valores de cenizas en base seca de las muestras de este pozo oscilan entre 8.80% a 34,79%.

Los respaldos muestreados correspondieron a dos (2) arcillolitas y una (1) arenita, para las primeras, se midió gas total libre de cenizas entre 43.61 a 50.24 pies<sup>3</sup>/ton y para la arenita de 2.19 pies<sup>3</sup>/ton.

#### 6.1.3.3 Frentes de Mina

Los valores de contenidos de gas metano libres de Cenizas en las muestras obtenidas en los frentes de mina presentados en la Tabla 18, varían entre 7,28 y 28,77 pies<sup>3</sup>/ton, con valores de Cenizas en base seca de 5.90 % a 11.41%. El mayor valor corresponde a la muestra del Manto M3, en la Mina San Antonio (Sector Úmbita – Chinavita), con una Ro de 0,60% y un rango para un carbón Bituminoso Alto volátil A (bav A). El menor valor 7,28 pies<sup>3</sup>/ton, se encontró en el manto M7 de la Mina El Sol (Sector Úmbita – Chinavita), con un Ro de 0.60% y un rango para un carbón Bituminoso Alto volátil A (bav A). Los valores bajos de contenidos, pueden deberse a la baja profundidad de toma de la muestra, las minas no superaban los 200m de avance, con inclinaciones de hasta 40°.

**Tabla 16.** Valores de contenidos de gas metano en las muestras analizadas Pozo Úmbita -1.

Nombre mantos Techo a Base	ID Muestra Medición Metano / Análisis Físico químico	Espesor Real (m)	Profundidad (m)		Material	Gas perdido (pies <sup>3</sup> /ton)	Gas Desorbido (pies <sup>3</sup> /ton)	Gas Residual (pies <sup>3</sup> /ton)	Gas Total (pies <sup>3</sup> /ton)	Análisis Físicoquímicos Cz (%)	Materia Mineral (%)	Gas total libre de Cenizas (pie <sup>3</sup> /ton)	Ro (%)	Clasificación ASTM
			Desde	Hasta										
M13	PUm-1:1 15842807026	0,45	185,25	185,7	Carbón	1,42	18,72	16,28	36,42	17,72	16,30	<b>47,28</b>	0,55	BITUMINOSO ALTO VOLATIL B
M12	PUm-1:2 15842807027	1,30	189,15	189,4	Carbón	1,51	18,74	18,35	38,60	30,85	40,20	<b>60,85</b>	0,58	BITUMINOSO ALTO VOLATIL B
M11	PUm-1:3 15842807028	0,40	190,65	191	Carbón	0,45	34,19	12,50	47,14	16,07	15,00	<b>57,92</b>	0,53	BITUMINOSO ALTO VOLATIL B
M10	PUm-1:4 15842807029	0,40	192,1	192,5	Carbón	3,43	23,88	13,68	40,99	15,28	27,50	<b>51,19</b>	0,54	BITUMINOSO ALTO VOLATIL B
M9	PUm-1:5 15842807007	1,00	203,1	203,5	Carbón	0,20	3,57	9,04	12,81	15,56	18,60	<b>15,92</b>	0,53	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
M8	PUm1:6 15842807008	0,50	205,32	205,7	Carbón	0,32	4,92	5,67	10,91	11,49	13,80	<b>12,90</b>	0,56	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
M6	PUm1:7 15842807009	2,70	248,45	248,8	Carbón	2,48	15,29	14,20	31,97	5,70	9,60	<b>35,14</b>	0,56	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
M5	PUm-1:8 15842807010	0,65	259,07	259,5	Carbón	0,36	8,88	27,89	37,16	5,16	18,60	<b>40,52</b>	0,48	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
M3	PUm-1:9 15842807011	1,00	287,65	288,2	Carbón	1,61	11,94	18,27	31,82	39,24	46,80	<b>58,76</b>	0,55	BITUMINOSO ALTO VOLATIL B
M2	PUm-1:10 15842807030	0,60	322,4	322,9	Carbón	0,40	10,27	13,32	23,99	24,39	24,30	<b>34,06</b>	0,65	BITUMINOSO ALTO VOLATIL B

Fuente: Datos del Estudio

**Tabla 17.** Valores de contenidos de gas metano en las muestras analizadas Pozo Chinavita-1.

Nombre mantos Techo a Base	ID Muestra Medición Metano / Análisis Físicoquímico	Espesor Real (m)	Profundidad (m)		Material	Gas perdido (pies <sup>3</sup> /ton)	Gas Desorbido (pies <sup>3</sup> /ton)	Gas Residual (pies <sup>3</sup> /ton)	Gas Total (pies <sup>3</sup> /ton)	Análisis Físicoquímicos Cz (%)	Materia Mineral (%)	Gas total libre de Cenizas (pie <sup>3</sup> /ton)	Ro (%)	Clasificación ASTM
			Desde	Hasta										
Cinta	PCh-1:1 15172807023	0,35	103,34		Carbón	4,03	20,31	8,46	32,80	62,50	62,50	<b>57,64</b>	0,44	BITUMINOSO ALTO VOLATIL C
M13	PCh-1:2 15172807012	1,22	233,01	233,47	Carbón	1,25	30,67	40,79	72,71	16,00	16,00	<b>90,49</b>	0,49	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
M11	PCh-1:3 15172807013	0,93	241,51	242,56	Carbón	2,75	66,28	11,09	80,12	29,70	29,70	<b>106,34</b>	0,56	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
M11	PCh-1:4 15172807013	0,93	243,01	243,61	Carbón	3,01	105,40	19,24	127,65	29,70	29,70	<b>169,34</b>	0,56	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
M10	PCh-1:5 15172807024	1,20	254,31	254,81	Carbón	8,06	106,04	21,37	135,47	28,90	28,90	<b>187,84</b>	0,59	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
M9	PCh-1:6 15172807014	1,47	282	282,4	Carbón	2,58	74,32	17,82	94,72	13,20	13,20	<b>109,94</b>	0,59	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
M8	PCh-1:7 15172807015	1,41	300,05	300,71	Carbón	5,29	115,68	11,57	132,54	11,00	11,00	<b>152,90</b>	0,59	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
M7	PCh-1:8 15172807016	1,00	333,5	333,95	Carbón	14,42	105,37	14,23	134,02	3,20	3,20	<b>149,32</b>	0,59	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
M6	PCh-1:9 15172807017	1,03	411,22	411,92	Carbón	61,02	175,58	33,71	270,31	4,80	4,80	<b>308,07</b>	0,61	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
M5	PCh-1:10 15172807025	1,00	417,09	417,72	Carbón	-	63,08	10,45	73,55	11,00	11,00	<b>88,36</b>	0,66	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
M4	PCh-1:11 15172807018	0,80	421,7	422,67	Carbón	42,51	164,37	31,59	238,47	5,60	5,60	<b>271,33</b>	0,60	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
-	PCh-1:12		475,2	475,76	Limolita Arcillosa	1,36	34,30	14,58	50,24	-	-	<b>50,24</b>	-	-
M3	PCh-1:13 15172807020	1,43	475,75	476,55	Carbón	7,24	80,24	7,35	94,83	6,90	6,90	<b>111,19</b>	0,60	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
-	PCh-1:14		512,4	513,1	Arcillolita	9,17	21,19	13,25	43,61	-	-	<b>43,61</b>	-	-
M2	PCh-1:15 15172807021	0,80	513,13	514	Carbón	34,89	144,26	50,10	229,25	16,60	16,60	<b>285,20</b>	0,62	BITUMINOSO ALTO VOLATIL B
M1	PCh-1:16 15172807022	1,61	526,35	527,45	Carbón	41,36	120,95	48,38	210,69	3,20	3,20	<b>243,55</b>	0,67	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
-	PCh-1:17		562,55	563,4	Arenisca	0,51	1,38	0,30	2,19	-	-	<b>2,19</b>	-	-

Fuente: Datos del Estudio

**Tabla 18.** Valores de contenidos de gas metano en las muestras analizadas de Frente de mina.

ID de Muestra / Código Muestra Campo	Manto	Espesor (m)	Ubicación de la muestra	Material (roca)	Gas Perdido (pies <sup>3</sup> /ton)	Gas Desorbido (pies <sup>3</sup> /ton)	Gas Residual (pies <sup>3</sup> /ton)	Gas Total (pies <sup>3</sup> /ton)	Análisis Físicoquímicos Cz (%)	Materia Mineral (%)	Gas Total libre de cenizas (pies <sup>3</sup> /ton)	Ro (%)	Clasificación ASTM
FM:01 15804807001	M6	1,00	Mina La Rosa Vereda San José, Tibaná	Carbón	0,37	1,50	6,74	8,61	10,76	11,60	<b>10,57</b>	0,47	BITUMINOSO ALTO VOLATIL C
FM:02 15842807002	M7	2,70	Mina El Sol Vereda juncal, Umbita	Carbón	0,04	1,15	4,98	6,17	11,41	11,00	<b>7,28</b>	0,60	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
FM:03 15842807003	M6	2,90	Mina Carsol BM1, Vereda Juncal, Umbita	Carbón	0,94	3,56	10,10	14,60	7,26	2,60	<b>16,31</b>	0,63	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
FM:04 15172807004	M3	2,34	Mina San Antonio, Vereda Usillo,	Carbón	1,87	12,48	11,65	26,00	5,90	1,80	<b>28,77</b>	0,60	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
FM:05 15172807006	M7	1,30	Mina San Antonio, Vereda Usillo,	Carbón	0,57	7,85	9,52	17,94	7,27	4,00	<b>22,01</b>	0,55	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A

Fuente: Datos del Estudio

## 6.2 CROMATOGRAFÍA

La cromatografía de gases es una técnica analítica muy utilizada para separar los compuestos volátiles de una muestra, su rapidez y buena resolución permite analizar e identificar muestras complejas de hidrocarburos, pesticidas, productos vegetales, drogas, fragancias, saborizantes y muchos otros compuestos de difícil identificación por métodos analíticos tradicionales (Cases & Hens, 1988).

En cromatografía de gases la muestra es volatilizada en el inyector, luego es transportada por un gas inerte (Nitrógeno, Helio O Hidrogeno) denominado fase móvil a través de la de la columna cromatográfica, la cual posee una fase estacionaria conformada por moléculas activas que interactúan con los diferentes compuestos de la muestra separándolos en función de su afinidad y grado de volatilidad (punto de ebullición, peso molecular). La detección de los compuestos separados se efectúa en el detector, el cual es seccionado de acuerdo a las propiedades de los compuestos de interés (Quirós, 2006).

El análisis cuantitativo de compuestos químicos gaseosos como:  $N_2$ ,  $CO_2$  y  $CH_4$ , se puede llevar a cabo mediante cromatografía de gases utilizando sistemas que incluyan tanto columnas empacadas como capilares donde la interacción sólido gas se da principalmente por fenómenos de adsorción, es aconsejable en este tipo de análisis la utilización de columnas construidas con tamices moleculares y el uso de un detector de conductividad térmica, el cual es sensible a los cambios en la conductividad térmica de la corriente de gas, ocasionados por la presencia de otras moléculas (*Encyclopedia of Chromatography (Print)*, 2001).

### 6.2.1 Metodología

Para identificar y cuantificar los gases provenientes de la desorción de carbones minerales introducidos en canisters, se realiza un muestreo y posteriormente se hace uso de la cromatografía de gases para separar e identificar los diferentes compuestos.

#### 6.2.1.1 Muestreo

Mediante el equipo conformado por “bomba de muestreo Universal PCXR4” y “cámara de muestreo a presión negativa Vac-U-Chamber” se realiza la toma de muestras tanto de los diferentes canisters como de los gases patrón en bolsas tipo tedlar.



### 6.2.1.2 Identificación y Cuantificación

Con la ayuda del cromatógrafo de gases Agilent 7890A del laboratorio de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) con sede en Sogamoso, el cual se encuentra configurado con el siguiente método cromatográfico:

- **Inyección**  
Manual de 500  $\mu$ L mediante jeringa de inyección para gases.
- **Inyector**  
Split 2:1 16 ml/min  
Temperatura 200°C  
Presión 5,0 PSI  
Flujo total 27 ml/min  
Gas saver 20 ml/min luego de 2 min
- **Columna**  
Varian CP-Molsieve 5Å, 0.53 mm x 25 m fused silica
- **Horno**  
60°C por 8 minutos
- **Detector**  
TCD 250°C  
Flujo 20 ml/min  
Make up 2 ml/min.

Se realizan pruebas preliminares de los gases contenidos en algunos los canisters, se encontró que la respuesta al detector es apropiada así como la separación de los picos cromatográficos, donde el gas predominante en la mayoría de las al parecer correspondía a metano.

Para corroborar los datos obtenidos se trasladan cinco (5) muestras de gas desorbido al laboratorio del Servicio Geológico Colombiano (SGC) donde se cuenta con el cromatógrafo de gases configurado con el siguiente método cromatográfico:

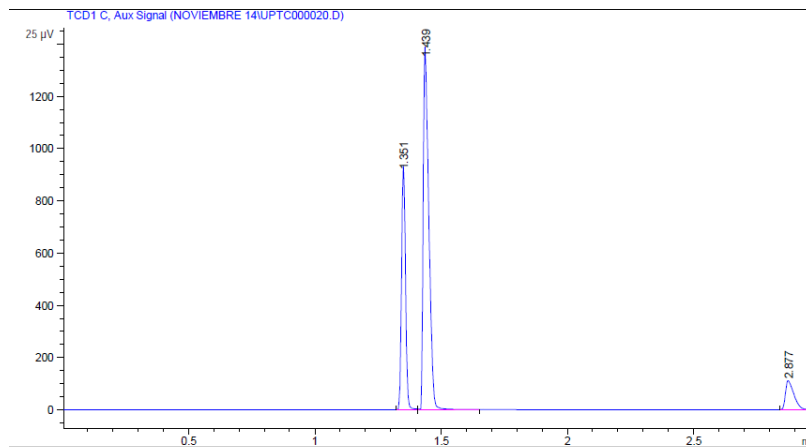
- **Inyección**  
Manual de 500  $\mu$ L por medio de jeringa para inyección de gases
- **Inyector**  
Split 50:1  
128.82 ml/min  
Temperatura 50°C

Presión 10,43 PSI  
Flujo total 134,4 ml/min  
Gas saver 10 ml/min luego de 2 min  
Purga de septa 3ml/min

- **Columna**  
GC-GasPro, 30 m 0.32 mm x 0  $\mu$ m  
Flujo 2.57 mL/min
- **Horno**  
25°C durante 3.5 min
- **Detector**  
TCD 250°C  
Flujo 10 ml/min  
Make up 5 ml/min.

Se realiza una corrida cromatografía donde se inyecta una muestra del estándar 3 (Tabla 19) donde se puede observar el orden de elusión de los componentes de la muestra, los cuales se corroboraron inyectando muestras de metano 99.99% y dióxido de carbono anaeróbico, con lo cual se determinó que el orden de elusión a estas condiciones era:

Nitrógeno a 1,3 minutos, metano a 1,4 minutos y dióxido de carbono a 2,8 minutos (Figura 90).

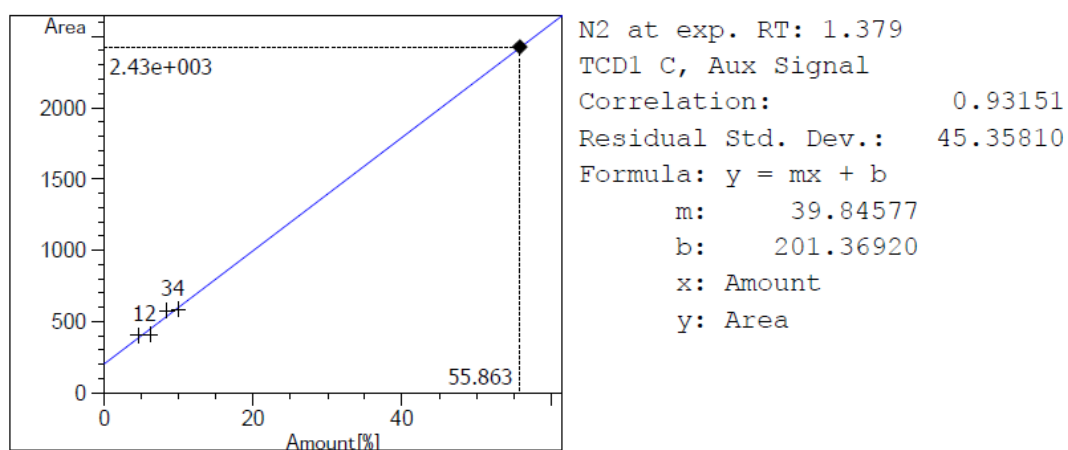


**Figura 90.** Cromatograma estándar 3.

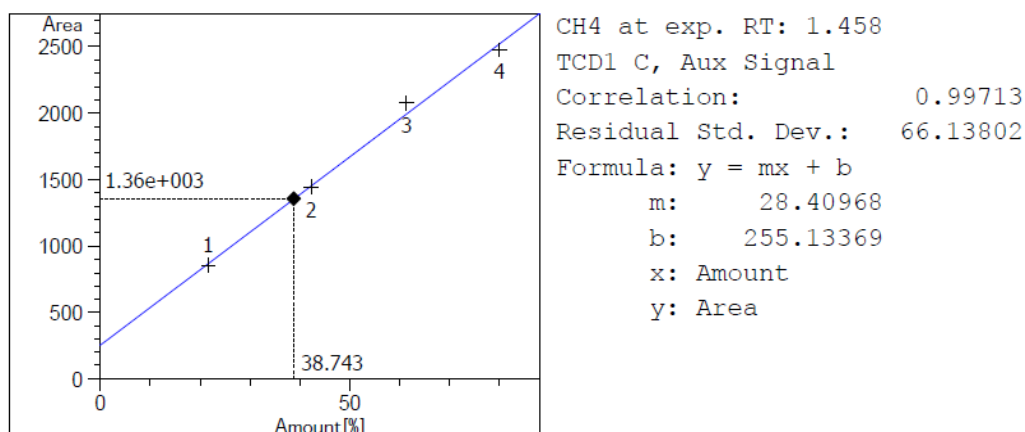
**Tabla 19.** Concentración de gases en los diferentes estándares.

Muestra	% N <sub>2</sub>	% CO <sub>2</sub>	%CH <sub>4</sub>
Estándar 1	4,6	3	21,7
Estándar 2	6,2	5	42,3
Estándar 3	8,4	7,9	61,4
Estándar 4	10	10	80

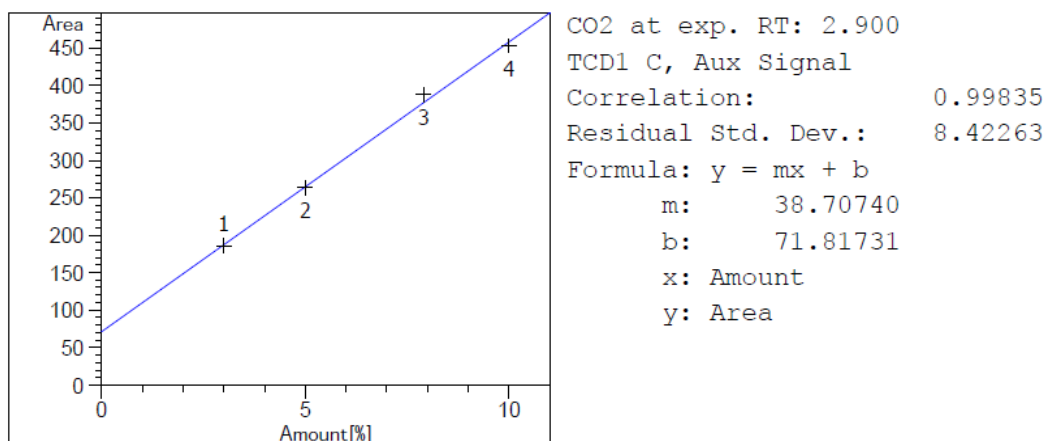
Con las mezclas de gases descritas en la Tabla 18, se realizan curvas de calibración en el laboratorio del SGC, para: nitrógeno, dióxido de carbono y metano. Las curvas de calibración presentaron coeficientes de correlación de 0.93644 para el Nitrógeno (ver Figura 91), 0.99701 para el Metano (ver Figura 92), y 0.99845 para el Dióxido de Carbono (ver Figura 93).



**Figura 91.** Curva de calibración para Nitrógeno.

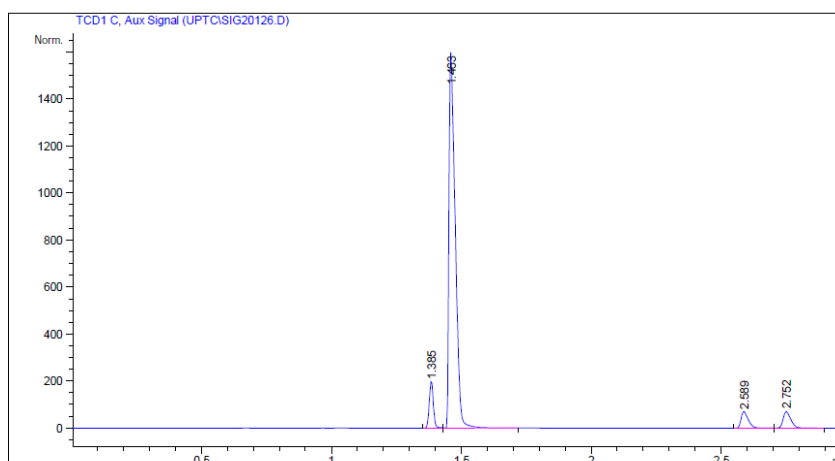


**Figura 92.** Curva de calibración para Metano.



**Figura 93.** Curva de calibración para Dióxido de Carbono.

Se procedió a inyectar las muestras en el cromatógrafo: cada una de las muestras se inyectó y analizó utilizando el método cromatógrafo del laboratorio del SGC. Un ejemplo de los resultados obtenidos se puede observar en la Figura 94. Los resultados de las demás muestras se presentan en la Tabla 20.



**Figura 94.** Cromatograma muestra canister 16 del Pozo Chinavita-1.

**Tabla 20.** Concentración de gases en los diferentes canisters realizada en el laboratorio del SGC Bogotá.

Pozo	ID Muestra Medición Metano / Análisis Fisicoquímico	% N <sub>2</sub>	% CO <sub>2</sub>	%CH <sub>4</sub>	%Total
Pozo Umbita-1	PUm-1:4 15842807029	55,1	0	38,9	94
	Pozo Chinavita-1	PChi-1:8 15172807016	3,6	0,5	80,9
PChi-1:10 15172807025		30,2	0	56,7	86,9
PChi-1:15 15172807021		0,6	5	84,2	89,8
PChi-1:16 15172807022		0,59	2	84,8	87,4

Fuente: Datos del Estudio

Se puede observar que 3 de las 5 muestras analizadas en el laboratorio del SGC presentan concentración de metano superior al 80% (Tabla 19), mostrando con esto que el compuesto prominente en el gas asociado al carbón corresponde al metano. Los canister 4 de Úmbita -1 y 10 de Chinavita-1, ostentan una cantidad considerable de nitrógeno 55,1% y 30,2 % (Tabla 19), lo cual se puede ser

---

consecuencia de la contaminación debida al aire atmosférico, debido a que en el momento del muestreo se recolecto escasa cantidad de gas en estos canister.

### 6.2.1.3 Resultados

Al examinar los métodos cromatógrafos utilizados tanto en la UPTC como en el SGC se puede observar que existe diferencias principalmente en el tipo de columna encontrando que en la UPTC se estaba utilizando una columna Varian CP-Molsieve 5Å, 0.53 mm x 25 m fused silica constituida por un tamiz molecular de 5 Å la cual no es la apropiada para separar mezclas de gases que contengan dióxido de carbono puesto que este es adsorbido casi irreversiblemente en este tamiz molecular (Littlewood, 2013), lo cual implica que el dióxido de carbono posiblemente se retuvo dentro de la columna generando error, aun cuando se observó una separación de los picos los resultados no se muestran debido a este inconveniente.

Observando las curvas de calibración para  $N_2$ ,  $CO_2$  y  $CH_4$  se puede observar que la correlación más deficiente corresponde a nitrógeno con un valor de 0.93151 lo cual indica que el sistema se puede contaminar fácilmente con el aire atmosférico. Si comparamos los picos cromatográficos de la mezcla estándar (figura 1) con los de una muestra de una de los canisters (figura 5) se percibe que aparece un nuevo pico a los 2.752 min, lo cual quiere decir que los gases provenientes de la desorción de los carbones contienen otro compuesto deferente de  $N_2$ ,  $CO_2$  y  $CH_4$  el cual puede ser etano. Esto también lo podemos evidenciar cuando analizamos los datos de la Tabla 19, ya que la suma de los porcentajes se encuentra alrededor del 90% indicando que faltan componentes por cuantificar, lo cual contribuye a que no se alcance una suma del 100%.

## 7. CÁLCULO DE RECURSOS Y RESERVAS DE GAS METANO ASOCIADO AL CARBÓN

Para el sector GMAC de estudio denominado Úmbita – Chinavita, dentro del área Úmbita - Rondón, los mantos de carbón de la Formación Guaduas que presentan mayor interés para adelantar estudios de exploración de GMAC, se encuentran ubicados en el flanco oriental y occidental del Sinclinal de Úmbita, hacia el sur del mismo.

Las condiciones de la zona, describen una actividad tectónica media a alta, que origina afectación en las rocas de las diferentes formaciones geológicas presentes, en la formación Guaduas, se observa cambios en el espesor de los mantos, pinchamientos. Del análisis geológico realizado en campo y junto con la información de subsuelo, se pudo definir una secuencia estratigráfica con las diferentes capas de carbón identificadas, las cuales permitieron cuantificar los volúmenes de GMAC como recursos y reservas en diferentes categorías.

### 7.1 DEFINICIÓN DE RECURSO Y RESERVA

A partir de la metodología empleada para el cálculo de recursos y Reservas de carbón (Wood et. a, 2003), se realiza el cálculo de potencial para GMAC en donde los contenidos de gas metano registrados en las muestras colectadas representan la variación a la misma. Para este recurso se definen a continuación los términos Recurso y Reserva, así:

**Recurso.** Corresponde al volumen u ocurrencia de gas metano presente en el yacimiento carbonífero, el cual ha sido cubicado con base en un estudio geológico detallado, pero los puntos de control no contienen datos puntuales de concentración de metano por tonelada de carbón, se tiene conocimiento por las manifestaciones observadas en las labores mineras y la concentración de gas metano se toma como el promedio de los resultados obtenidos en otros puntos de control sobre el mismo manto de carbón o de estudios que hayan realizado la determinación de las concentraciones por manto; también se clasifican como recursos los volúmenes de gas metano cuantificados mediante puntos de control con datos de medición de contenidos de gas metano expresados en pies cúbicos por tonelada (pie<sup>3</sup>/ton), pies cúbicos estándar por tonelada (scf/ton), centímetros cúbicos por gramo (cc/gr), o metros cúbicos por tonelada (m<sup>3</sup>/ton), pero el estudio geológico base es de carácter regional (Escala 1:25.000, 1:50.000 o más grande).

Los recursos de gas metano se subdividen en categorías, dependiendo de la certeza geológica, la distancia de los puntos de control y la densidad de las mediciones de contenidos de gas metano en el área de estudio, los cuales pueden ser: Recursos Medidos, Recursos Indicados, Recursos Inferidos, Recursos Hipotéticos y Recursos Especulativos.

**Reserva.** Corresponde al volumen de gas metano presente en el yacimiento carbonífero, el cual ha sido cubicado con base en un estudio geológico en escala 1:25.000, 1:10.000, 1:5.000, 1:2.000 o más detallada y mediante puntos de control donde se haya realizado un muestreo sistemático que determine la concentración de metano por tonelada de carbón, tomado de perforación y/o túneles mineros suficientes para determinar la continuidad tanto en rumbo como en buzamiento de los mantos, Estos volúmenes calculados se subdividen en categorías de acuerdo al grado de certeza geológica y densidad de mediciones de CH<sub>4</sub> en el área como Reservas Medidas, Reservas Indicadas, Reservas Inferidas, Reservas Hipotéticas.

## 7.2 LIMITES PARA LA EVALUACIÓN DE RESERVAS Y RECURSOS

Con el fin de definir los límites para la evaluación de reservas y recursos de GMAC, se han establecido varias zonas que condicionan las diferentes categorías; estas se han establecido teniendo en cuenta el avance de la explotación minera, la zona donde el gas puede volver a estabilizarse luego de la minería y la profundidad a la cual se consideraría la explotación de este, cada una de ellas, se describen a continuación:

### 7.2.1 Zona explotada

Zona que ha sido intervenida por la actividad de extracción de carbón (zonas abandonadas y que actualmente se labora), donde las labores mineras permiten la migración del gas a la atmosfera, puesto que se aumenta la permeabilidad del manto con la actividad de explotación. En los planos de los mantos se limitó hasta la línea denominada Avance de La Explotación Minera.

### 7.2.2 Zona de Dilución

Se determinó como una zona de 200 metros medidos en el buzamiento del manto desde la línea de avance de Explotación Minera (ver Mapas 5 a 17, Anexo K) hasta el límite de Dilución. Se considera que en esta zona los contenidos de metano vuelven a registrar valores reales, es el paso de una zona de alteraciones y migraciones a una zona sin intervenir.



### 7.2.3 Zona de Concentración

En los estudios realizados por la empresa privada (Drummond Ltd, 2005) sobre GMAC, se tiene como referencia para determinar las profundidades adecuadas de exploración y explotación del recurso, el valor de 600m, lo cual es compartido en estudios realizados por Universidades como la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), en donde se ha determinado que a partir de esta profundidad se marca un cambio considerable en el valor de los contenidos de Metano (Mariño, 2011). Para el caso de los estudios realizados por el SGC, en sus primeros años, las perforaciones alcanzaron profundidades de hasta 400m, por tanto se estimó el potencial hasta el valor de 600m, denominándose profundidad. En este estudio la perforación Chinavita-1 alcanzó hasta 580m de profundidad, lo cual hizo replantear el valor hasta el cual se adelanta la evaluación del potencial y revisar el hecho que para el aprovechamiento de este recurso se podría trabajar en mayores profundidades a las indicadas inicialmente, razón por la cual se llevó el límite de evaluación hasta el eje del sinclinal de Úmbita (ver Mapas 5 a 17, Anexo K).

## 7.3 EVALUACIÓN DE RECURSOS Y RESERVAS DE GMAC

Con el fin de determinar el potencial de GMAC en la zona de estudio, se han obtenido valores de recursos y reservas en diferentes categorías de evaluación de acuerdo a la información de los puntos de control obtenidos en campo, tanto en superficie, como en profundidad (mediante el muestreo en labores mineras y en las perforaciones); estas categorías se describen a continuación:

### 7.3.1 Categorías de Evaluación

Estas categorías, se han establecido de acuerdo al grado de certeza geológica en el área de estudio, del avance en las labores mineras identificadas, estableciendo para ello áreas de influencia alrededor de Puntos de control caracterizados por registrar información de los diferentes mantos de carbón sobre coordenadas de localización, espesor de los mismos, ángulo de inclinación de las capas, mediciones de contenidos de gas metano entre otras.

Las categorías de evaluación se definen como Recursos y Reservas medido y/o medida, indicado y/o indicada e inferido y/o inferida; las cuales se establecen mediante distancias máximas contadas a partir del punto de medición más cercano (Punto de Control), e identifican de acuerdo al nombre del sector evaluado y en secuencia de sur a norte; estos valores se han fijado hasta 400 m, hasta 1200 m, y hasta 3600 respectivamente, El valor de 400 metros se consideró teniendo en cuenta que el avance de la actividad minera supera los 350m en profundidad, apreciándose la continuidad de los mantos. Cada área establecida se identificó en los mapas estructurales (Ver Mapas 5 a 17, Anexo K) con un literal

---

desde la A a la H, De acuerdo a lo anterior, se ha establecido las siguientes definiciones:

### **Reservas Medidas (A)**

Se ha establecido como el área representada por 400 metros de radio de influencia desde el punto de Control y en la cual, se cuenta con un volumen de metano por tonelada.

### **Reservas Indicadas (B)**

Área de influencia del punto de control entre 400 m y 1.200 m, en ella, se cuenta con un valor de volumen de metano por tonelada.

### **Reservas Inferidas (C)**

Área de influencia del punto de control entre 1.200 m y 3.600 m, se cuenta con un valor de volumen de metano por tonelada.

### **Reservas Hipotéticas (D)**

Área de influencia del punto de control mayor a 3.600 m, se cuenta con un valor de volumen de metano por tonelada.

### **Recursos Medidos (E)**

Área de influencia del punto de control con un radio de 400 m, no se cuenta con volúmenes de metano por tonelada, se utiliza el promedio de los datos obtenidos en los puntos muestreados.

### **Recursos Indicados (F)**

Área de influencia del punto de control con un radio desde 400 m a 1.200 m, no se cuenta con volúmenes de metano por tonelada, se utiliza el promedio de los datos obtenidos en los puntos muestreados.

### **Recursos Inferidos (G)**

Área de influencia del punto de control con un radio desde 1.200 m a 3.600 m, no se cuenta con volúmenes de metano por tonelada, se utiliza el promedio de los datos obtenidos en los puntos muestreados.

## Recursos Hipotéticos (H)

Área de influencia del punto de control con un radio mayor a 3.600 m, no se cuenta con volúmenes de metano por tonelada, se utiliza el promedio de los datos obtenidos en los puntos muestreados.

En el presente estudio, se incorporó al análisis del potencial del recurso, los Recursos hipotéticos y Reservas Hipotéticas, ya que no se limitó la evaluación a la profundidad de 600m, como se menciona en el numeral 8.2.3 Zona de Concentración.

## Categorías de Recursos Especulativos

Se analiza la categoría de especulativo, cuando se tienen capas de carbón que no son comercialmente explotables (y algunas de ellas poseen espesores menores a 0.40m), pero que son identificadas en las perforaciones, se pueden correlacionar con la información de campo obtenida y son objeto de medición de GMAC. El valor de los recursos, se estima, hallando el área entre la posible traza de la capa determinada por distancias estratigráficas y los límites del polígono de estudio, esta se afecta por el valor obtenido de GMAC más alto. En este caso, no se realizan Mapas de contornos estructurales, ya que no se tiene certeza en su continuidad lateral.

### 7.3.2 Cálculo del Potencial de GMAC

La evaluación de reservas y recursos se realizó mediante círculos generados a partir de los puntos de control establecidos en frentes mineros y las dos perforaciones realizadas, estos círculos se deforman en el buzamiento dependiendo del ángulo de inclinación del manto de carbón.

En cada punto de información se grafican círculos de 400m, 1200 m y 3600m, de radio, que determinan las áreas de influencia para las categorías de medido, indicado, inferido e hipotético. Estos círculos se deforman a elipses conservando la longitud verdadera en el lado paralelo al rumbo del manto, mientras que el lado paralelo al buzamiento se corrige multiplicando la dimensión del lado por el coseno del buzamiento. Se considera, igualmente, la influencia de la zona Explotada y la profundidad o el límite hasta el cual se realiza la evaluación.

Posteriormente, se calcula y digitalizan las áreas de influencia, obteniendo el valor de la proyección planimétrica del área. El valor real se recalcula dividiendo el valor planimétrico por el coseno del ángulo de buzamiento del manto, este valor se multiplica por el espesor, la densidad y el contenido de gas metano por tonelada

para así calcular el volumen de gas metano en las diferentes categoría y zonas limitantes.

Es así, como el cálculo del volumen de GMAC, se efectúa, considerando los siguientes parámetros:

$$\text{Volumen de GMAC} = a \times e \times d \times cg$$

De donde:

a = área de cálculo

e = espesor de la capa de interés

d = densidad del carbón

cg = contenido de gas metano en la capa de interés

En el cálculo del potencial de GMAC se ha especificado valores de Recursos y Reservas que corresponden a las áreas por encima y por debajo de la zona de Dilución, esto con el fin de tener en cuenta que las zonas por encima de la zona de Dilución están afectadas por la minería y su influencia, lo cual incide directamente en el valor de las reservas y recursos allí ubicados. Por debajo de la zona de Dilución se tendrían valores de Recursos y Reservas más cercanos a lo que realmente el manto de carbón podría llegar a registrar con respecto al potencial de GMAC.

Igualmente sobre los mapas de contornos estructurales se limitó la evaluación hasta el eje del Sinclinal, reevaluando la posición inicial que se tenía en la metodología donde se utilizó la línea de profundidad de 600 m desde superficie, que indica la cobertura en metros de cada punto de control y el límite final para el cálculo de reservas y recursos de gas metano asociado al carbón.

### 7.3.2.1 Recursos y Reservas de GMAC

Para determinar los recursos y reservas de GMAC en la zona de estudio, se tomó para análisis las capas de carbón con un espesor  $\geq 0,40$  m, que fueron colectadas tanto en las perforaciones como en frente de mina. Considerando en las mediciones de los mantos con intercalaciones la fracción correspondiente a carbón. Los espesores que se registran en las tablas de información de los mantos corresponden a los corregidos de los obtenidos en las perforaciones, como se

indica en el capítulo 3 Geología del Subsuelo, estas fueron direccionadas con un ángulo de 30° con respecto a la vertical.

Como se mencionó en capítulos anteriores en el Sector Úmbita -Tibaná por dificultades de orden social, no se pudo adelantar la evaluación del potencial en el flanco Occidental del Sinclinal; sin embargo allí se tomó una muestra en frente de mina (Mina La Rosa,) para caracterización y medición en frente de mina, que de acuerdo a la secuencia estratigráfica identificada es el Manto denominado M6, con los siguientes valores: cenizas de 10,76%(bslmm), materia volátil 38,11% (bslmm), azufre como SO<sub>3</sub> de 1,26%, un contenido de carbono fijo de 51,13% (bslmm) y un poder calorífico 11760,0 Btu/lb (bslmm), lo que permite clasificar los carbones en un rango de Bituminoso alto volátil C (bav C), ver Tabla 21. El manto presenta una gravedad específica de 1,37 y un Índice de Hinchamiento de 1.

De acuerdo al objetivo del estudio, solo se evaluaron recursos y/o reservas para los mantos de interés, que corresponden a los que las perforaciones cortaron (Ver Columnas 1 a 5), los cuales se describen a continuación de acuerdo al Sector GMAC evaluado que para este caso corresponde al Sector Úmbita -Chinavita y en posición estratigráfica de base a techo.

### **Sector Úmbita - Chinavita**

El sector Úmbita - Chinavita, se caracteriza por estar afectado por una serie de fallas de tipo inverso y de rumbo, que afectan localmente la continuidad lateral de los mantos y su espesor; se han identificado hasta 13 capas de carbón, denominadas de base a techo M1 a M13, cuya descripción se realiza a continuación:

**M1.** Es la primera capa en la secuencia carbonífera identificada en los trabajos de perforación. En las minas no se conoce sobre trabajos realizados en este. Se encuentra a 160,0 m aprox. de la base de la formación Guaduas.

Es un carbón tipo vitreno a clareno; los respaldos tanto superior como inferior lo conforman Limolitas arcillosas de color gris oscuro. El espesor promedio para este manto es de 0,84 m; el rumbo varía entre N35°E a N64°E y el buzamiento varía entre 40° a 88° NW.

Se realizó análisis fisicoquímico en la muestra 15172807022, arrojando valores de cenizas de 10,12%(bslmm), materia volátil 35,95% (bslmm), azufre como SO<sub>3</sub> de 0,68%, un contenido de carbono fijo de 53,93% (bslmm) y un poder calorífico de 12820,0 Btu/lb (bslmm); lo que permite clasificar la muestra en un rango carbón Bituminoso alto volátil A (bav A), ver Tabla 22. El manto presenta una Gravedad Específica de 1,23 y un Índice de Hinchamiento de 1.

La evaluación se llevó a cabo teniendo en cuenta 4 puntos de control, desde el UCh01 al UCh04 (ver Tabla 21), de los cuales en el punto de control UCh04 se obtuvo un valor de GMAC de 243,55 pies<sup>3</sup>/ton de gas total libre de cenizas, en el pozo Chinavita-1 (ver Tabla 17), en el punto de control del Pozo Úmbita -1 (UCh-1), se tomó para el cálculo, el valor obtenido en la muestra del Manto M2 equivalente a 34,06 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 16), por estar cercano al M1, en los demás puntos de control (UCh-2 y UCh-3), se tomó el promedio de los dos datos anteriores. Con estos valores se calculó un potencial para este manto de 10.434.986.451,33 pies<sup>3</sup> equivalente a 10,43 Bcf (Billones de pies<sup>3</sup>) de GMAC, como reservas y recursos en las categorías de medidos, indicados, inferidos e hipotéticos (ver Tablas 23,36 y Anexos H,K).

Suprayaciendo este manto y a 74,0m se encuentra una cinta de carbón de 0,35m (Pozo Chinavita-1) tipo clareno, fuseno a vitreno, hacia el nivel superior de la formación, que se muestreó para caracterización (15172807023, ver Tabla 21) y medición de contenidos de gas metano (PChi-1:1, ver Tabla 17). Los valores de los análisis fisicoquímicos corresponden a cenizas de 34,01%(bslmm), materia volátil 36,63% (bslmm), azufre como SO<sub>3</sub> de 0,79%, un contenido de carbono fijo de 29,36% (bslmm) y un poder calorífico 8988,0 Btu/lb (bslmm), lo que permite clasificar los carbones en un rango de Bituminoso alto volátil C (bav C, ver Tabla 22). La capa posee una Gravedad Específica Verdadera de 1,60 y un Índice de Hinchamiento de ½.

El valor de GMAC medido fue de 57,64 pies<sup>3</sup>/ton.

**M2.** Separado estratigráficamente del manto anterior por un intervalo entre 2,00 m a 7,00 m de limolitas arcillosa de color gris claro a gris oscuro, que constituyen tanto el respaldo inferior como el respaldo superior. Estratigráficamente corresponde al manto número 2 de base a techo de la secuencia carbonífera identificada en la Formación Guaduas (K6e1g).

Es un carbón tipo vitreno, clareno, fuseno. El espesor promedio es de 0,80 m; el rumbo varía entre N45°E a N64°E, el buzamiento varía entre 40° a 80° NW.

Los resultados promedios de los análisis físico-químicos realizados en las muestras 15842807030 y 15172807021, registran valores en promedio de contenidos de cenizas de 19,19%(bslmm), materia volátil de 37,45 %(bslmm), azufre como SO<sub>3</sub> de 0,10 %, un contenido de carbono de 43,37%(bslmm) y un poder calorífico de 11401,0 Btu/lb (bslmm), lo que permite clasificar el carbón como Bituminoso alto Volátil B (bav B, ver Tabla 22). El manto presenta una gravedad específica verdadera en promedio de 1,36 y un Índice de Hinchamiento entre 1½ a 2.

La evaluación se llevó a cabo teniendo en cuenta 3 puntos de control, desde el Uch05 al Uch07 (ver Tabla 21), de los cuales en los puntos de control Uch05 Pozo

Úmbita -1) se registró un valor de contenido de metano de 34,06 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 16) y en el punto de control UCh07 (Pozo Chinavita1-), un valor de contenido de metano de 258,20 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 17), con estos valores y el promedio de ellos, se obtuvo un potencial de 12.688.794.286,09 pies<sup>3</sup> equivalente a **12,69 Bcf** (Billones de pies<sup>3</sup>) de GMAC, como reservas y recursos en las categorías de medidos, indicados, inferidos e hipotéticos para este manto (ver Tablas 24, 36 y Anexos H,K).

**M3.** Se ha identificado a una distancia estratigráficamente del manto anterior de 19,00 m a 34,00 m de limolitas arcillosas de color gris claro a gris oscuro, que constituyen la litología tanto del respaldo inferior como del respaldo superior.

Es un carbón tipo clareno, vitreoso a fuseno; en muestreo de mina, se identificaron dos intercalaciones, una de hasta 0,40m de arcillolita de color gris claro y otra de hasta 0,10 m de arenita de grano muy fino, de color blanco. El espesor promedio es de 1,33 m; el rumbo varía entre N35°E a N64°E, con buzamientos entre 40° a 88° al NW.

Se realizaron análisis fisicoquímicos en las muestras 15172807004, 15842807011 y 15172807020 con valores promedio en cenizas de 18,34% (bslmm), materia volátil de 37,56% (bslmm), azufre como SO<sub>3</sub> de 0,51%, un contenido de carbono fijo de 44,10% (bslmm) y un poder calorífico de 11633,61Btu/lb (bslmm), lo que permite clasificar el carbón como Bituminoso alto volátil B a Bituminoso alto volátil A (bav B y bav A), ver Tabla 22; el manto presenta una Gravedad Específica Verdadera en promedio de 1,37 y un Índice de Hinchamiento entre 1 y 2.

El cálculo del potencial, se llevó a cabo teniendo en cuenta 5 puntos de control, desde el UCh-8 a UCh-12 (ver Tabla 21), donde el punto UCh-8, fue muestreado para medición de contenidos de metano y determinación del Gas total libre de cenizas, con un valor de 58,76 pies<sup>3</sup>/ton en el pozo Úmbita -1, (ver Tabla 16), en el Punto de control UCh-11 (Pozo Chinavita-1), se obtuvo un valor de medición de 111,19 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 17) y en el Punto de control UCh-11 (Mina San Antonio) el valor fue de 28,77 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 18); con estos valores y el promedio de los mismos, se obtuvo un potencial para este manto de 9.883.326.408,66 pies<sup>3</sup> equivalente a 9,88 Bcf de GMAC, en las categorías de Recursos y Reservas medidos, indicados, inferidos e hipotéticos para este manto (ver Tablas 25 ,36 y Anexos H, K).

En el Pozo Chinavita-1, suprayaciendo este manto a 3,0m aproximadamente se encuentra una cinta de carbón tipo clareno, fuseno a vitreoso de 0,32 m de espesor, la cual fue objeto de muestreo para análisis de caracterización (15172807019, ver Tabla 21), obteniéndose valores de Cenizas de 4,44% (bslmm), materia volátil de 38,83% (bslmm), azufre como SO<sub>3</sub> de 6,04%, un contenido de carbono fijo de 56,74% (bslmm) y un poder calorífico de 13576,0 Btu/lb (bslmm), lo que permite clasificar el carbón como Bituminoso alto volátil B (bav B, ver Tabla 22).

---

El manto presenta una Gravedad Específica Verdadera de 1,14 y un Índice de Hinchamiento de 4½. No se determinó contenidos de gas metano.

**M4.** Separado del manto anterior por una distancia estratigráfica que varía entre 9,00 m a 28,00 m de limolitas arcillosas de color gris oscuro con eventuales niveles delgados de limolita silíceas de color pardo a arcillolitas limosas de color gris claro, que corresponden a los respaldos del manto.

Este carbón es tipo vitreno a clareno. El espesor promedio es de 0,80 m. El rumbo varía entre N45°E a N64°E, con buzamientos entre 40° a 89° al NW.

En las muestras 15172807005 y 15172807018, se adelantaron análisis fisicoquímicos con resultados en promedio de cenizas de 6,78%(bslmm), materia volátil de 39,96%(bslmm), azufre como SO<sub>3</sub> de 0,97%, contenido de carbono de 53,26%(bslmm) y un poder calorífico de 13503,50 Btu/lb (bslmm) lo que permite clasificar el carbón como Bituminoso alto Volátil A (bav A, ver tabla 22). En promedio la Gravedad Específica Verdadera es de 1,30 y el Índice de Hinchamiento varía entre 3 y 4.

Se utilizaron 3 puntos de control desde el UCh-13 al UCh-15 (ver Tabla 21), en uno de los cuales (UCh-14 ) se adelantó medición para calcular contenidos de gas metano y por ende valores de Gas total libre de cenizas (pozo Chinavita-1) de 271,33 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 17); para el punto de control UCh-13, se tomó para la evaluación el promedio de los valores obtenidos para el Manto M3 y M5 del Pozo Úmbita -1 (ver Tabla 16); con estos valores y el promedio entre ellos, se calculó el potencial de GMAC para el manto equivalente a 11.928.476.896,05 pies<sup>3</sup> o 11,93 Bcf (Billones de pies<sup>3</sup>) en las categorías de Recursos y Reservas medidos, indicados, inferidos e hipotéticos (ver Tablas 26,36 y Anexos H, K).

**M5.** Este manto, se ha identificado a una distancia estratigráfica del anterior de entre 2,0 m a 17,0 m, en una secuencia de limolitas arcillosas de color gris oscuro con laminaciones de arenita de color blanco seguida de un nivel de arenitas cuarzosa de color blanco, de grano muy fino a fino, con bioturbación con laminaciones e intercalaciones de limolita arcillosa de color gris oscuro, presencia de macrorestos vegetales, con un espesor aproximado de 4,0 m.

Es un carbón tipo vitreno, fuseno a clareno. El respaldo superior corresponde a una limolita arcillosa de color gris oscuro con laminaciones de arenita de color blanco de grano muy fino, plano paralela a ondulada, mientras el respaldo inferior lo constituyen limolitas carbonosas con láminas de vitreno, seguido de arenita de color blanco de grano muy fino con esporádicas laminaciones de limolita arcillosa de color gris oscuro con estratificación ondulada y flasser. Su espesor promedio es de 0,83 m. El rumbo varía entre N45°E a N64°E, con buzamientos entre 40° y 80° NW.

Se adelantaron análisis fisicoquímicos en las muestras 15842807010 y 15172807025 (ver Tabla 21), correspondientes a los pozos Úmbita -1 y Chinavita-1



respectivamente, con valores promedio de cenizas de 8,90%(bslmm), materia volátil de 41,46%(bslmm), azufre como SO<sub>3</sub> de 0,93%, contenido de carbono de 49,65%(bslmm) y un poder calorífico de 13161,18 Btu/lb (bslmm), lo que permite clasificar el carbón como Bituminoso alto Volátil A (bav A, ver Tabla 22). En promedio, la Gravedad específica Verdadera es de 1,33 y el Índice de Hinchamiento de 2½.

Para el cálculo del potencial, se utilizaron 2 puntos de control el UCh-16 y UCh-17 (ver Tabla 21), se realizó medición de contenido de gas metano para la determinación de Gas total libre de cenizas, obteniéndose en el primer punto un valor de 40,52 pie<sup>3</sup>/ton (Pozo Úmbita -1, ver Tabla 16) y en el segundo un valor de 88,36 pie<sup>3</sup>/ton (Pozo Chinavita-1, ver Tabla 17) con estos valores y el promedio de los mismos, se realizó la evaluación de recursos y reservas, donde se calculó para este manto un total de 2.057.670.115,78 pies<sup>3</sup> de GMAC (Ver Tablas 27, 36 y Anexos H, K), equivalente a 2,06 Bcf (Billones de pies<sup>3</sup>).

**M6.** Este manto está separado del manto anterior por un intervalo entre 2,0 a 7,0 metros, compuesto por limolitas arcillosas de color gris oscuro con laminaciones de arenita de color blanco, de grano muy fino. Es el manto de mayor interés económico en la zona de estudio.

Este carbón es de tipo clareno, vitreño a dureno, en muestreo de mina se identificaron dos intercalaciones de hasta 0,15m de arcillolita de color negro. Los respaldos están constituidos por limolitas arcillosas de color gris oscuro a claro con presencia de materia orgánica y restos de materia orgánica. El espesor promedio para el sector de estudio es de 2,40 m. El rumbo varía entre N22°E a N64°E, con buzamientos entre 37° a 80° NW.

Los resultados promedios de los análisis fisicoquímicos realizados en las muestras 15842807003, 15842807009 y 15172807017, corresponden a un contenido de cenizas de 7,17% (bslmm), materia volátil de 39,95% (bslmm), azufre como SO<sub>3</sub> de 0,48%, carbono fijo de 52,88%(bslmm) y un poder calorífico de 13357,33 Btu/lb (bslmm), lo que permite clasificar el carbón como Bituminoso alto volátil A (bav A), (ver Tabla 22). El promedio para el valor de Gravedad específica Verdadera es de 1,33, los valores de Índice de Hinchamiento varía entre 1½ y 3.

Se utilizaron 5 puntos de control desde el UCh-18 al UCh-22 (ver Tabla 21), en tres de los cuales UCh-18 (Pozo Úmbita -1), UCh-20 (mina Carsol) y UCh-22 (Pozo Chinavita-1), se tomaron muestras para la determinación del Gas total libre de cenizas, con valores de 35,14 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 16), 16,31 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 18), y 308,07 pies<sup>3</sup>/ton (ver tablas 17) respectivamente; estos valores fueron utilizados para la evaluación del potencial, donde se calculó un total de 18.683.898.286,87 pies<sup>3</sup> de GMAC, equivalente a 18,68 Bcf (Billones de pies<sup>3</sup>) en las categorías de Recursos y Reservas medidos, indicados, inferidos e hipotéticos para este manto (ver tablas 28, 36 y Anexos H, K).

**M7.** Se encuentra localizado hacia la parte media de la formación Guaduas, separado del manto anterior por una secuencia de entre 26,0 m a 42,0 m de limolitas arcillosas de color gris oscuro con láminas de arenita de color blanco de grano muy fino, con estratificación ondulada, convoluta, lenticular y flaser, en sectores se evidencian capas delgadas e intercalaciones de limolita silícea de color pardo.

Se caracteriza por ser un carbón tipo clareno con láminas de vitreno. Los respaldos están constituidos por arcillolitas limosas de color gris claro con láminas de carbón tipo vitreno. El espesor promedio es de 1,26 m. El rumbo del manto varía entre N45°E a N64°E y el buzamiento fluctúa entre 65° a 84° al NW.

En las muestras 15842807002 (Mina El Sol), 15172807006 (Mina San Antonio) y 15172807016 (pozo Chinavita-1), se realizaron análisis fisicoquímicos con valores promedio de contenido de cenizas de 8,47 % (bslmm), materia volátil de 38,86% (bslmm), azufre como SO<sub>3</sub> de 0,58%, contenido de carbono de 52,67% (bslmm) y un poder calorífico de 13098,67 Btu/lb (bslmm), lo que permite clasificar el carbón como Bituminoso alto volátil A (bav A). La Gravedad Específica en promedio es de 1,31 y el Índice de Hinchamiento varía entre 1 y 3.

Se utilizaron 5 puntos de control para su evaluación desde el UCh-23 al UCh-27 (ver Tabla 21) de los cuales en el punto UCh-24 (Mina El Sol), se tomó muestra para determinar el valor de Gas total libre de cenizas, correspondiente a 7,28 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 18), en el punto de control UCh-26 (pozo Chinavita-1), se obtuvo un valor de 149,32 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 17) y en el punto UCh-27 (Mina San Antonio) un valor de 22,01 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 18); estos valores y el promedio de ellos fue empleado para el cálculo del potencial equivalente a 8.594.480.061,17 pies<sup>3</sup> de GMAC o 8,59 Bcf (Billones de pies<sup>3</sup>), en las categorías de Recursos y Reservas medidos, indicados, inferidos e hipotéticos para este manto (ver tablas 29, 36 y Anexos H, K).

**M8.** Estratigráficamente se ubica hacia la parte media del paquete carbonífero identificado para la zona de estudio en la Formación Guaduas (K6e1g); dista del manto anterior entre 6,0 m y 19,0 m de una secuencia de limolitas arcillosas de color gris oscuro, con algunas capas delgadas de arcillolita carbonosa, limolita silícea de color pardo y presencia de láminas de arenita de color blanco de grano muy fino.

Es un carbón tipo clareno a vitreno; su respaldo superior está constituido por limolitas, arcillolitas carbonosas y limolitas arcillosas de color gris oscuro, mientras su respaldo inferior presenta limolitas arcillosas de color gris claro en alternancia con limolitas arcillosas de color gris oscuro con eventuales capas delgadas de arenita de grano muy fino, color gris claro. El espesor promedio es de 1,75 m. El rumbo varía entre N30°E a N64°E, con buzamientos entre 35° a 80° NW.

Se realizó análisis fisicoquímicos a dos muestras 15842807029 y 15172807015 donde se obtuvo en promedio valores de contenido de cenizas de 12,35% (bslmm), materia volátil de 41,44% (bslmm), azufre como SO<sub>3</sub> de 0,85%, contenido de carbono de 46,21% (bslmm) y un poder calorífico de 12666,19 Btu/lb (bslmm), lo que permite clasificar el carbón en un rango entre Bituminoso alto volátil B a A (bav B a bav A, ver Tabla 22). El manto presenta una Gravedad Específica en promedio de 1,33 y un Índice de Hinchamiento entre 1 y de 2½.

Para la evaluación del potencial de GMAC, se tuvo en cuenta 6 puntos de control, desde el UCh-28 al UCh-33 (ver Tabla 21), de los cuales en el punto UCh-28 (Pozo Úmbita -1) y UCh-32 (pozo Chinavita-1), se tomó muestra para determinación de gas metano, con un valor de 12,90 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 16) y 152,90 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 17), en los demás puntos se utilizó el promedio de gas total libre de Cenizas de estos puntos. Se obtuvo un potencial de 7.860.124.667,51 pies<sup>3</sup> de GMAC, equivalente a 7,86 Bcf (Billones de pies<sup>3</sup>) como Reservas y Recursos en las categorías de medidos, indicados, inferidos e hipotéticos (ver Tablas 30, 36 y Anexos H, K).

**M9.** Ubicado hacia la parte media de la secuencia carbonífera identificada, litológicamente está separado del manto anterior por un conjunto de limolitas arcillosas de color gris oscuro con eventuales láminas de arenita de color blanco, de grano muy fino e intercalaciones de limolita silíceas de color pardo cuyo espesor varía entre 7,0 a 9,0 m.

Corresponde a un carbón tipo clareno a vitreño; su respaldo superior está constituido por limolitas carbonosas y el respaldo inferior por limolitas arcillosas de color gris oscuro. El espesor promedio del manto es de 1,90 m. El rumbo fluctúa entre N 30°E a N 64° E y el buzamiento entre 40° a 80° NW.

Se realizó análisis fisicoquímicos en las muestras 15842807008 y 15172807014, obteniéndose valores en promedio de contenido de cenizas de 10,43%(bslmm), materia volátil de 42,24 (bslmm), azufre como SO<sub>3</sub> de 0,36%, contenido de carbono de 47,34%(slmm) y un poder calorífico de 12901,50 Btu/lb (bslmm), lo que permite clasificar el carbón en un rango Bituminoso alto Volátil A (bav A, ver Tabla 22). Se registra para la Gravedad Específica Verdadera un valor en promedio de 1,32; el Índice de Hinchamiento varía entre 1½ a 3½.

Para la evaluación de recursos se utilizaron 4 puntos de control (UCh-34 a UCh-37, ver Tabla 21), de los cuales en los puntos UCh-34 y UCh-36 se tomó muestra de contenido de gas metano, con valores de 15,92 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 16) y 109,94 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 17) respectivamente, para los demás puntos se tomó el promedio de estos valores. El potencial de GMAC calculado fue de 9.551.057.023,49 pies<sup>3</sup> equivalente a 9,55 Bcf (Billones de pies<sup>3</sup>) como Reservas y Recursos en las categorías de medidos, indicados, inferidos e hipotéticos (ver Tablas 31, 36 y Anexos H, K).

**M10.** Se ubica estratigráficamente a una distancia de 2,0 a 15,0 m suprayaciendo el manto anterior, en una secuencia de limolitas arcillosas de color gris claro con delgadas capas de limolita silíceas de color pardo, presencia de restos vegetales posibles fragmentos de tallos u hojas.

Es un carbón clareno a vitreoso; el respaldo superior está conformado por limolitas arcillosas de color gris oscuro con eventuales láminas de arenita color blanco, de grano muy fino y material carbonoso con intercalaciones de limolitas silíceas de color pardo y el respaldo inferior, corresponde a limolitas arcillosas de color gris claro con delgadas capas de limolita silíceas de color pardo, presencia de restos vegetales. Presenta un espesor promedio de 1,21 m. El rumbo varía entre N 30° E a N64° E con buzamientos entre 40° a 80° NW.

De las muestras obtenidas, se realizó análisis fisicoquímicos en dos (15842807007 y 15172807024), en la cual se registró en promedio valores de contenidos de cenizas de 19,02% (bslmm), materia volátil de 39,49%(bslmm), azufre como SO<sub>3</sub> de 0,24%, contenido de carbono de 41,49%(bslmm) y un poder calorífico de 11602,72 Btu/lb (bslmm), clasificando el carbón en un rango de Bituminoso alto volátil A (bav A, ver Tabla 22). La muestra presenta en promedio un valor de Gravedad Específica Verdadera de 1,41 y un Índice de Hinchamiento de 1 a 1½.

Los puntos de control UCh-38 a UCh-41 (ver Tabla 21), se utilizaron para la evaluación de reservas y recursos en sus diferentes categorías, de los cuales en los puntos UCh-38 (Pozo Umbita 1) y UCh-40 (Pozo Chinavita-1) se tomaron muestras de contenido de gas metano, obteniéndose valores de gas total libre de cenizas de 51,19 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 16) y 187,84 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 17) respectivamente. El potencial de GMAC calculado es de 8.729.517.586,51 pies<sup>3</sup> (ver Tablas 32, 36 y Anexos H, K), equivalente a 8,73 Bcf (Billones de pies<sup>3</sup>).

**M11.** Se ubica estratigráficamente suprayaciendo el manto anterior a una distancia promedio de 6,0 m a 12,50 m de limolitas arcillosas de color gris claro a gris oscuro, con intercalaciones de limolitas silíceas de color pardo.

Es un carbón tipo clareno a vitreoso. Su respaldo superior lo constituyen limolitas carbonosas en intercalación con limolitas de color gris claro, el respaldo inferior limolitas arcillosas de color gris oscuro. El espesor promedio es de 0,65 m, cuya dirección de las capas varía entre N 45° E a N 64°E con buzamientos entre 40° a 80° al NW.

Se realizó análisis fisicoquímicos en las muestras 15172807013 y 15842807028, en las cuales se registró en promedio valores de contenidos de cenizas de 17,70% (bslmm), materia volátil de 41,27%(bslmm), azufre como SO<sub>3</sub> de 0,78%, contenido de carbono de 41,03%(bslmm) y un poder calorífico de 11752,69 Btu/lb (bslmm), clasificando el carbón en un rango de Bituminoso alto volátil B y A (bav B y bav A),

ver Tabla 22. La muestra presenta en promedio un valor de Gravedad Específica Verdadera de 1,37 y un Índice de Hinchamiento de 1 a 2.

Para el cálculo del potencial, se utilizaron 2 puntos de control el UCh-42 y UCh-43 (ver Tabla 21), donde se adelantaron mediciones de contenidos de gas metano, para el primer punto el valor fue de 57,92 pies<sup>3</sup>/ton (Pozo Úmbita -1, ver Tabla 16), para el segundo de 169,34 pies<sup>3</sup>/ton (Pozo Chinavita-1, ver Tabla 17). El potencial de metano fue de 6.822.874.482,98 pies<sup>3</sup> equivalente a 6,82 Bcf (Billones de pies<sup>3</sup>) como recursos en las categorías de medidos, indicados, inferidos e hipotéticos (ver Tablas 33, 36 y Anexos H, K).

**M12.** Identificado a una distancia del anterior de entre 1,0 a 2,0 m de limolitas carbonosas y limolitas de color gris claro. Conforman los mantos de la parte superior de la secuencia carbonífera identificada.

Es un carbón tipo clareno a fuseno, con láminas de vitreno. El respaldo Superior, corresponde a limolitas carbonosas y limolitas arcillosas de color gris oscuro. El respaldo inferior lo conforman limolitas de color gris oscuro. El espesor promedio es de 1,13 m, con variaciones en el rumbo entre N 45°E a N 64°E y buzamientos entre 40° a 80° NW.

De los análisis fisicoquímicos realizados en la muestra 15842807027, se tiene un valor de cenizas de 30,18%(bslmm), materia volátil de 35,78%(bslmm), azufre de 0,18%, contenido de carbono de 34,04%(bslmm) y un poder calorífico de 9717,0 Btu/lb (bslmm), con lo cual se clasifica la muestra en un rango de Bituminoso alto volátil B (bav B, ver Tabla 22). El valor de Gravedad Específica Verdadera corresponde a 1,57 y el de Índice de Hinchamiento a 1,0.

Para la evaluación de recursos y reservas se utilizaron 2 puntos de control UCh-44 y UCh-45 (ver Tabla 21), de los cuales en UCh-44, se tomó muestra para medición de contenidos de gas metano, obteniéndose un valor de gas total libre de cenizas de 60,85 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 16), en el otro punto se tomó el promedio entre los valores registrados para el M11 y M13 (Pozo Chinavita-1, ver Tabla 17), equivalente a 122,06 pies<sup>3</sup>/ton, las áreas de influencia de los dos puntos, se evaluaron con el promedio obtenido entre los valores anteriores. Con estos puntos de control se generaron áreas para el cálculo de Reservas en las categorías de medidas, indicadas, inferidas e hipotéticas. El potencial de GMAC calculado fue de 8.526.452.511,67 pies<sup>3</sup> equivalente a 8,53 Bcf (Billones de pies<sup>3</sup>) como Reservas y Recursos en las categorías de medidos, indicados, inferidos e hipotéticos (ver Tablas 34,36 y Anexos H, K).

**M13.** Suprayace al manto anterior en una distancia que varía entre 2,0 a 4,0 m, que comprende arcillolitas carbonosas, limolitas arcillosas de color gris oscuro.

Es un carbón de tipo vitreno a clareno; el respaldo superior corresponde a limolitas carbonosas, con láminas de vitreno, mientras el respaldo inferior a arcillolitas

---

carbonosas. Este manto presenta un espesor promedio de 1,0 m, el rumbo varía entre N30° E a N 64°E y el buzamiento entre 40° a 80° NW.

De los análisis fisicoquímicos realizados en 2 muestras (15172807012, 15842807026), se tiene un promedio de cenizas de 16,53% (bslmm), materia volátil de 41,34% (bslmm), azufre como SO<sub>3</sub> de 1,58%, contenido de carbono de 42,13 % (bslmm) y un poder calorífico de 11963,70 Btu/lb (bslmm), con lo cual se clasificó el carbón como Bituminoso alto volátil B y A (bav B y bav A, ver Tabla 22). El manto presenta en promedio una Gravedad Específica Verdadera de 1,40 y un Índice de Hinchamiento de 1½.

Se tomaron 3 puntos de información denominados UCh-46 a UCh-48 (ver Tabla 21) utilizados para la evaluación de Recursos y Reservas en sus diferentes categorías; en los puntos UCh-46 y UCh-48, se realizó mediciones de contenidos de gas metano, obteniéndose valores de gas total libre de cenizas de 47,28 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 16) y 90,49 pies<sup>3</sup>/ton (ver Tabla 17) respectivamente, en el otro punto de control se utilizó el promedio de los valores anteriores. El potencial de GMAC fue de 4.661.872.673,13 pies<sup>3</sup> (ver Tablas 35, 36 y Anexos H, K) equivalente a 4,66 Bcf (Billones de pies<sup>3</sup>).

**Tabla 21.** Localización sitios con información y muestras de carbón del Área GMAC Úmbita -Rondón, Sector Úmbita –Chinavita.

No	PUNTO DE CONTROL	COORDENADAS		MANTO	ESPESOR (m)	LOCALIZACIÓN	RUMBO/ BUZAMIENTO	ID ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO	ID MUESTRA MEDICIÓN POZO
		NORTE	ESTE						
1	UCh-1	1.067.766	1.073.706	M1	0,40	Pozo Umbita-1	N64E/40NW		
2	UCh-2	1.069.377	1.075.463	M1	1,00	Afloramiento Juncal	N60E/44NW		
3	UCh-3	1.069.465	1.075.514	M1	0,40	Río Garagoa	N35E/88NW		
4	UCh-4	1.070.126	1.075.775	M1	1,61	Pozo Chinavita-1	N45E/80NW	15172807022	FChi-1:16
5	UCh-5	1.067.766	1.073.706	M2	0,60	Pozo Umbita-1	N64E/40NW	15842807030	PUm-1:10
6	UCh-6	1.069.628	1.075.717	M2	1,00	Vereda Juncal, Umbita	N55E/64NW		
7	UCh-7	1.070.126	1.075.775	M2	0,80	Pozo Chinavita-1	N45E/80NW	15172807021	FChi-1:15
8	UCh-8	1.067.766	1.073.706	M3	1,00	Pozo Umbita-1	N64E/40NW	15842807011	PUm-1:9
9	UCh-9	1.069.428	1.075.465	M3	1,00	Vereda Usillo, Chinavita	N50E/54NW		
10	UCh-10	1.069.506	1.075.533	M3	0,90	Vereda Usillo, Chinavita	N35E/88NW		
11	UCh-11	1.070.126	1.075.775	M3	1,43	Pozo Chinavita-1	N45E/80NW	15172807020	FChi-1:13
12	UCh-12	1.070.370	1.076.352	M3	2,34	Mina San Antonio, Vereda Usillo, Chinavita	N50E/84NW	15172807004	FM:04
13	UCh-13	1.067.766	1.073.706	M4	0,65	Pozo Umbita-1	N64E/40NW		
14	UCh-14	1.070.126	1.075.775	M4	0,80	Pozo Chinavita-1	N45E/80NW	15172807018	FChi-1:11
15	UCh-15	1.070.419	1.076.352	M4	0,94	Mina San Antonio, Vereda Usillo, Chinavita	N45E/89NW	15172807005	
16	UCh-16	1.067.766	1.073.706	M5	0,65	Pozo Umbita-1	N64E/40NW	15842807010	PUm-1:8
17	UCh-17	1.070.126	1.075.775	M5	1,00	Pozo Chinavita-1	N45E/80NW	15172807025	FChi-1:10
18	UCh-18	1.067.766	1.073.706	M6	2,70	Pozo Umbita-1	N64E/40NW	15842807009	PUm-1:7
19	UCh-19	1.068.850	1.074.918	M6	2,69	Vereda Sisa Abajo, Umbita	N40E/37NW		
20	UCh-20	1.069.160	1.075.076	M6	2,90	Mina Carsol, Vereea Juncal, Umbita	N22E/38NW	15842807003	FM:03
21	UCh-21	1.069.546	1.075.502	M6	2,69	Vereda Usillo, Chinavita	N60E/72NW		
22	UCh-22	1.070.126	1.075.775	M6	1,00	Pozo Chinavita-1	N45E/80NW	15172807017	FChi-1:9

Fuente: Datos del Estudio

No	PUNTO DE CONTROL	COORDENADAS		MANTO	ESPESOR (m)	LOCALIZACIÓN	RUMBO/ BUZAMIENTO	ID ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO	ID MUESTRA MEDICIÓN POZO
		NORTE	ESTE						
23	UCh-23	1.067.766	1.073.706	M7	0,40	Pozo Umbita-1	N64E/40NW		
24	UCh-24	1.068.833	1.074.872	M7	2,70	Mina El Sol, Vereda Juncal, Chinavita	N50E/35nw	15842807002	FMt02
25	UCh-25	1.069.581	1.075.466	M7	0,90	Vereda Usillo, Chinavita	N60E/72NW		
26	UCh-26	1.070.126	1.075.775	M7	1,00	Pozo Chinavita-1	N45E/80NW	15172807016	PChi-1:8
27	UCh-27	1.070.415	1.076.266	M7	1,30	Mina San Antonio, Vereda Usillo, Chinavita	N50E/84NW	15172807006	FMt05
28	UCh-28	1.067.766	1.073.706	M8	0,50	Pozo Umbita-1	N64E/40NW	15842807029	PUm-1:4
29	UCh-29	1.068.185	1.074.588	M8	2,70	Vereda Juncal, Umbita	N40E/44NW		
30	UCh-30	1.068.455	1.074.746	M8	2,70	Vereda Juncal, Umbita	N50E/34NW		
31	UCh-31	1.069.797	1.075.723	M8	2,20	Vereda Usillo, Chinavita	N30E/55NW		
32	UCh-32	1.070.126	1.075.775	M8	1,41	Pozo Chinavita-1	N45E/80NW	15172807015	PChi-1:7
33	UCh-33	1.070.414	1.076.230	M8	1,00	Mina San Antonio, Vereda Usillo, Chinavita	N40E/67NW		
34	UCh-34	1.067.766	1.073.706	M9	1,00	Pozo Umbita-1	N64E/40NW	15842807008	PUm-1:6
35	UCh-35	1.069.751	1.075.637	M9	2,82	Vereda Usillo, Chinavita	N30E/55NW		
36	UCh-36	1.070.126	1.075.775	M9	1,47	Pozo Chinavita-1	N45E/80NW	15172807014	PChi-1:6
37	UCh-37	1.070.419	1.076.217	M9	2,29	Vereda Usillo, Chinavita	N50E/75NW		
38	UCh-38	1.067.766	1.073.706	M10	0,40	Pozo Umbita-1	N64E/40NW	15842807007	PUm-1:5
39	UCh-39	1.069.823	1.075.711	M10	1,60	Vereda Usillo, Chinavita	N30E/55NW		
40	UCh-40	1.070.126	1.075.775	M10	1,20	Pozo Chinavita-1	N45E/80NW	15172807024	PChi-1:5
41	UCh-41	1.070.396	1.076.173	M10	1,62	Vereda Usillo, Chinavita	N45E/58NW		
42	UCh-42	1.067.766	1.073.706	M11	0,40	Pozo Umbita-1	N64E/40NW	15842807028	PUm-1:3
43	UCh-43	1.070.126	1.075.775	M11	0,90	Pozo Chinavita-1	N45E/80NW	15172807013	PChi-1:3 PChi-1:4
44	UCh-44	1.067.766	1.073.706	M12	1,30	Pozo Umbita-1	N64E/40NW	15842807027	PUm-1:2
45	UCh-45	1.070.126	1.075.775	M12	0,95	Pozo Chinavita-1	N45E/80NW		
46	UCh-46	1.067.766	1.073.706	M13	0,45	Pozo Umbita-1	N64E/40NW	15842807026	PUm-1:1
47	UCh-47	1.069.836	1.075.706	M13	1,40	Vereda Usillo, Chinavita	N30E/55NW		
48	UCh-48	1.070.126	1.075.775	M13	1,22	Pozo Chinavita-1	N45E/80NW	15172807012	PChi-1:2

Fuente: Datos del Estudio



**Tabla 22.** Clasificación de carbones por rango según la norma ASTM. Área Úmbita -Rondón. Sector Úmbita –Chinavita.

ID MUESTRA LABORATORIO/ ID MUESTRA CAMPO/ ID MUESTRA MEDICIÓN DE METANO	MANTO	HE (%)	HR (%)	CZ (%)	M.V. (%)	C.F. (%)	P.C. (Btu/lb)	ST (%)	Azufre como SO <sub>3</sub>	CZ - SO <sub>3</sub>	CF corregido	ST BHE	PC LMM	C.F.S (Imm)	M.V. (Imm)	CLASIFICACIÓN
56287-I 15804807001 FM:01	M6	7,37	6,12	10,76	38,11	51,13	11760	1,42	1,26	9,84	52,39	1,40	12794,66	64,24	35,76	BITUMINOSO ALTO VOLATIL C
56288-I 15842807002 FM:02	M7	3,12	2,35	11,41	38,14	50,45	12658	1,11	0,29	11,02	50,74	1,10	14095,66	59,94	40,06	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
56289-I 15842807003 FM:03	M6	2,99	2,31	7,26	38,76	53,99	13319	1,02	0,47	7,00	54,46	1,01	14167,90	61,10	38,90	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
56290-I 15172807004 FM:04	M3	3,07	2,58	5,90	38,87	55,23	13543	1,25	0,64	5,68	55,87	1,24	14185,46	61,80	38,20	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
56291-I 15172807005	M4	3,08	2,58	4,93	39,26	55,81	13637	0,86	0,55	4,75	56,36	0,85	14185,16	61,58	38,42	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
56292-I 15172807006 FM:05	M7	3,25	2,73	7,27	38,68	54,05	13232	0,8	0,35	7,01	54,40	0,80	14129,20	61,16	38,84	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
57643- I 15172807019	Cinta	3,00	2,22	4,44	38,83	56,74	13576	1,21	6,04	4,04	62,77	1,20	13923,24	68,06	31,94	BITUMINOSO ALTO VOLATIL B
57644- I 15172807020 PChi-1:13	M3	2,11	1,62	10,73	41,80	47,46	12946	1,97	0,81	10,42	48,28	1,96	14232,13	56,08	43,92	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
57645- I 15172807021 PChi-1:15	M2	3,42	1,84	14,43	38,20	47,36	12139	2,81	0,16	13,92	47,52	2,76	13650,48	58,86	41,14	BITUMINOSO ALTO VOLATIL B

ID MUESTRA LABORATORIO/ ID MUESTRA CAMPO/ ID MUESTRA MEDICIÓN DE METANO	MANTO	HE (%)	HR (%)	CZ (%)	M.V. (%)	C.F. (%)	P.C. (Btu/lb)	ST (%)	Azufre como SO <sub>3</sub>	CZ - SO <sub>3</sub>	CF corregido	ST BHE	PC LMM	C.F.S (Imm)	M.V. (Imm)	CLASIFICACIÓN
57646-I 15172807022 PChi-1:16	M1	2,47	1,76	10,12	35,95	53,93	12820	0,71	0,68	9,81	54,61	0,70	14135,05	62,97	37,03	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
58306-I 15172807023 PChi-1:1	Cinta	2,50	2,24	34,01	36,63	29,36	8988	5,84	0,79	32,89	30,15	5,82	12814,24	49,82	50,18	BITUMINOSO ALTO VOLATIL C
58307-I 15172807024 PChi-1:5	M10	2,85	2,05	22,82	37,79	39,39	11018	1,18	0,194	22,12	39,59	1,18	14162,03	54,28	45,72	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
58308-I 15172807025 PChi-1:10	M5	2,87	2,01	12,75	39,69	47,56	12589	1,23	1,753	12,17	49,31	1,22	14187,57	58,97	41,03	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
58309-I 15842807026 PUm-1:1	M13	2,67	2,05	17,35	40,72	41,93	11707	3,16	0,764	16,76	42,69	3,14	13723,27	54,48	45,52	BITUMINOSO ALTO VOLATIL B
58310-I 15842807027 PUm-1:2	M12	3,24	2,14	30,18	35,78	34,04	9717	1,97	0,18	29,16	34,21	1,95	13666,03	52,84	47,16	BITUMINOSO ALTO VOLATIL B
58311-I 15842807028 PUm-1:3	M11	2,78	1,97	15,75	42,21	42,04	12034	3,10	0,86	15,18	42,89	3,08	13811,34	53,62	46,38	BITUMINOSO ALTO VOLATIL B
58312-I 15842807029 PUm-1:4	M8	2,54	1,88	14,99	41,62	43,39	12191	2,77	1,03	14,46	44,42	2,75	13936,90	54,78	45,22	BITUMINOSO ALTO VOLATIL B
58313-I 15842807030 PUm-1:10	M2	2,58	1,83	23,94	36,69	39,37	10662	2,48	0,04	23,32	39,41	2,46	13729,28	55,08	44,92	BITUMINOSO ALTO VOLATIL B
59785-I 15842807007 PUm-1:5	M10	2,55	2,12	15,23	41,18	43,59	12187	1,13	0,29	14,80	43,87	1,13	14269,67	54,06	45,94	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A

ID MUESTRA LABORATORIO/ ID MUESTRA CAMPO/ ID MUESTRA MEDICIÓN DE METANO	MANTO	HE (%)	HR (%)	CZ (%)	M.V. (%)	C.F. (%)	P.C. (Btu/lb)	ST (%)	Azufre como SO <sub>3</sub>	CZ - SO <sub>3</sub>	CF corregido	ST BHE	PC LMM	C.F.S (Imm)	M.V. (Imm)	CLASIFICACIÓN
59786-I 15842807008 PUm-1:6	M9	2,76	2,32	11,22	41,94	46,84	12746	1,24	0,37	10,87	47,20	1,23	14196,99	55,43	44,57	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
59787-I 15842807009 PUm-1:7	M6	2,87	2,34	5,56	42,13	52,31	13595	0,97	0,37	5,38	52,68	0,96	14224,34	57,86	42,14	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
59788-I 15842807010 PUm-1:8	M5	2,58	2,23	5,04	43,23	51,73	13733	0,91	0,10	4,91	51,83	0,91	14326,00	56,42	43,58	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
59789-I 15842807011 PUm-1:9	M3	2,92	2,13	38,40	31,99	29,60	8412	2,44	0,08	37,25	29,68	2,42	13458,94	52,81	47,19	BITUMINOSO ALTO VOLATIL B
59790-I 15172807012 PChi-1:2	M13	2,08	1,68	15,72	41,96	42,32	12220	1,29	2,40	15,02	44,72	1,28	14329,29	54,98	45,02	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
59791-I 15172807013 PChi-1:3 PChi-1:4	M11	2,82	2,13	19,65	40,33	40,02	11471	1,53	0,71	18,96	40,73	1,52	14079,18	53,38	46,62	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
59792-I 15172807014 PChi-1:6	M9	2,41	1,90	9,63	42,53	47,84	13057	2,44	0,35	9,37	48,19	2,43	14106,67	55,53	44,47	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
59793-I 15172807015 PChi-1:7	M8	2,24	1,84	9,71	41,27	49,03	13141	1,44	0,67	9,43	49,69	1,43	14365,03	57,01	42,99	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
59794-I 15172807016 PChi-1:8	M7	2,87	2,29	6,73	39,75	53,51	13406	0,94	1,11	6,47	54,62	0,93	14198,32	60,79	39,21	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A
59795-I 15172807017 PChi-1:9	M6	2,67	2,09	8,69	38,97	52,34	13158	1,05	0,60	8,41	52,94	1,04	14238,90	60,21	39,79	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A

ID MUESTRA LABORATORIO/ ID MUESTRA CAMPO/ ID MUESTRA MEDICIÓN DE METANO	MANTO	HE (%)	HR (%)	CZ (%)	M.V. (%)	C.F. (%)	P.C. (Btu/lb)	ST (%)	Azufre como SO <sub>3</sub>	CZ - SO3	CF corregido	ST BHE	PC LMM	C.F.S (Imm)	M.V. (Imm)	CLASIFICACIÓN
59796-I 15172807018 PCh-1:11	M4	2,40	1,93	8,63	40,66	50,71	13370	1,23	1,40	8,31	52,11	1,22	14442,96	59,03	40,97	BITUMINOSO ALTO VOLATIL A

Fuente: Datos del Estudio

**Tabla 23.** Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita. Manto 1.

AREA	PUNTO DE CONTROL	AREA HORIZONTAL (M²)	INCLINACIÓN (°)	AREA INCLINADA (M²)	ESPESOR (M)	GMAC CH4 Pie3/Ton	RESERVAS - RECURSOS												
							MEDIDAS (OS) (Pie3)		INDICADAS (OS) (Pie3)		INFERIDAS (OS) (Pie3)		HIPOTETICAS(OS) (Pie3)						
							SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN					
D1	UCh-1,UCh-2,UCh-3,UCh-4	8.000.261,62	63	17.622.090,38	0,84	138,81												2.527.333.628,80	
D2	UCh-1,UCh-2,UCh-3,UCh-4	107.106,29	63	235.921,88	0,78	138,81											31.418.733,88		
C3	UCh-1,UCh-2,UCh-3	533.680,51	53	886.784,96	0,53	138,81							80.245.382,79						
B4	UCh-1	509.720,66	40	665.393,07	0,35	34,00				9.739.358,29									
A5	UCh-1	8.521,93	40	11.124,59	0,35	34,00	162.830,62												
A6	UCh-1	1.390,96	40	1.815,77	0,35	34,00	26.577,42												
A7	UCh-1	375.107,56	40	489.668,14	0,35	34,00				7.167.272,61									
B8	UCh-1	1.637.588,71	40	2.137.720,24	0,35	34,00						31.289.811,14							
C9	UCh-1,UCh-2,UCh-3,UCh-4	28.205,25	63	62.127,40	0,84	138,81							8.910.218,25						
F10	UCh-2,UCh-3	165.376,55	66	406.593,68	0,70	138,81				48.594.209,81									
F11	UCh-4	1.153,57	80	6.643,15	1,61	243,55				3.204.007,21									
E12	UCh-2,UCh-3	167.406,19	66	411.583,75	0,70	138,81	49.190.601,12												
E13	UCh-2,UCh-3	53.224,36	66	130.857,05	0,70	138,81			15.639.433,97										
B14	UCh-4	445.244,03	80	2.564.058,20	1,61	243,55					1.236.650.562,52								
F15	UCh-2,UCh-3	909.596,16	66	2.236.327,06	0,70	138,81					267.275.545,67								
C16	UCh-1,UCh-2,UCh-3,UCh-4	10.463.431,31	63	23.047.687,82	0,84	138,81							3.305.464.630,62						
A17	UCh-4	86.938,57	80	500.659,27	1,61	243,55				241.469.000,15									
A18	UCh-4	349,50	80	2.012,69	1,61	243,55	970.724,68												
B19	UCh-4	153.563,59	80	884.337,47	1,61	243,55				426.517.787,64									
F20	UCh-2,UCh-3	94.391,33	66	232.069,89	0,70	138,81				27.735.928,63									
C21	UCh-2,UCh-3,UCh-4	555.570,22	71	1.706.463,64	1,00	138,78							291.281.825,02						
D22	UCh-1,UCh-2,UCh-3,UCh-4	257.190,74	63	566.511,28	0,84	138,78											81.227.707,58		
D23	UCh-1,UCh-2,UCh-3,UCh-4	3.017.517,41	63	6.646.653,20	0,84	138,78												953.012.623,19	
G24	UCh-2,UCh-3	2.690.777,20	66	6.615.526,89	0,70	138,78												790.458.049,72	
GE = 1,23							<b>TOTAL RECURSOS</b>		49.190.601,12	15.639.433,97	79.534.145,65	267.275.545,67	-	-	-	-	-	-	-
							<b>TOTAL RESERVAS</b>		1.160.132,71	248.636.272,76	436.257.145,93	1.267.940.373,66	380.437.426,06	3.305.464.630,62	112.646.441,46	4.270.804.301,71			

Fuente: Datos del Estudio



**Tabla 25. Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita. Manto 3.**

AREA	PUNTO DE CONTROL	AREA HORIZONTAL (M²)	INCLINACIÓN (°)	AREA INCLINADA (M²)	ESPESOR (M)	GMAC CH4 Pie3/Ton	RESERVAS - RECURSOS													
							MEDIDAS (OS) (Pie3)		INDICADAS (OS) (Pie3)		INFERIDAS (OS) (Pie3)		HIPOTETICAS(OS) (Pie3)							
							SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN						
D1	UCh-8,UCh-9,UCh-10,UCh-11,UCh-12	8198934,92	69	22.878.538,47	1,33	66,24													2.761.345.882,81	
D2	UCh-8,UCh-9,UCh-10,UCh-11,UCh-12	116485,19	69	325.043,55	1,33	66,24													39.231.424,93	
C3	UCh-8	525616,29	40	686.143,34	1,00	58,76							55.235.361,95							
B4	UCh-8	483294,86	40	630.896,63	1,00	58,76				50.787.936,04										
A5	UCh-8	31238,61	40	40.779,11	1,00	58,76	3.282.767,23													
A6	UCh-8	353781,85	40	461.829,41	1,00	58,76		37.177.821,36												
B7	UCh-8	1555321,31	40	2.030.327,78	1,00	58,76				163.443.822,31										
C8	UCh-8,Ch-11,UCh-12	53891,14	68	143.860,63	1,59	66,24						20.757.735,26								
F9	UCh-9	12467,02	54	21.210,16	1,00	66,24				1.924.796,68										
C10	UCh-8,Ch-11,UCh-12	15102,25	68	40.314,96	1,59	66,24						5.817.069,51								
F11	UCh-9	140290,9684	54	238.677,25	1,00	66,24				21.659.674,15										
B12	UCh-11	183857,5538	80	1.058.793,45	1,43	69,98				145.158.272,25										
E13	UCh-9, UCh-10	32773,83	71	100.666,57	0,95	66,24	8.678.601,90													
A14	UCh-11	83872,41	80	483.001,96	1,43	111,19	105.213.441,65													
A15	UCh-11	211488,6	80	1.217.914,31	1,43	111,19		265.301.110,06												
A16	UCh-12	16234,08	84	155.307,75	2,34	28,77				14.324.167,89										
A17	UCh-12	893,37	84	8.546,67	2,34	28,77				788.266,53										
B18	UCh-11,UCh-12	173193,88	82	1.244.449,39	1,89	69,98				225.493.250,56										
B19	UCh-11	1195285,51	54	2.033.541,17	1,00	111,19				309.769.936,58										
C20	UCh-8,UCh-9,UCh-10,UCh-11,UCh-12	13529679,54	69	37.753.598,10	1,33	66,24							4.556.704.652,25							
C21	UCh-9,UCh-10, UCh-11, UCh-12	495373,48	77	2.202.138,96	1,42	69,98						299.797.197,95								
C22	UCh-12	32524,96	84	311.158,88	2,34	28,77						28.698.453,36								
D23	UCh-8,UCh-9,UCh-10,UCh-11,UCh-12	209670,56	69	585.070,62	1,33	66,24												70.615.627,91		
D24	UCh-8,UCh-9,UCh-10,UCh-11,UCh-12	2055026,79	69	5.734.404,52	1,33	66,24													692.119.137,55	
							<b>TOTAL RECURSOS</b>	<b>8.678.601,90</b>	<b>-</b>	<b>21.659.674,15</b>	<b>1.924.796,68</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	
GE = 1,37							<b>TOTAL RESERVAS</b>	<b>108.496.208,88</b>	<b>302.478.931,42</b>	<b>436.551.893,26</b>	<b>473.213.758,88</b>	<b>410.305.818,03</b>	<b>4.556.704.652,25</b>	<b>109.847.052,84</b>	<b>3.453.465.020,35</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

Fuente: Datos del Estudio





**Tabla 27.** Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita. Manto 5.

AREA	PUNTO DE CONTROL	AREA HORIZONTAL (M²)	INCLINACIÓN (°)	AREA INCLINADA (M²)	ESPESOR (M)	GMAC CH4 Pie3/Ton	RESERVAS - RECURSOS									
							MEDIDAS (OS) (Pie3)		INDICADAS (OS) (Pie3)		INFERIDAS (OS) (Pie3)		HIPOTETICAS(OS) (Pie3)			
							SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN		
D1	UCh-16,UCh-17	13598336,65	60	27.196.673,30	0,83	64,44									1.934.643.949,34	
D2	UCh-16,UCh-17	120586,49	60	241.172,98	0,83	64,44								17.155.916,14		
C3	UCh-16	520236,54	40	679.120,57	0,65	40,52					23.789.281,22					
B4	UCh-16	466518,63	40	608.996,82	0,65	40,52			21.332.878,47							
A5	UCh-16	47748,54	40	62.331,29	0,65	40,52	2.183.436,49									
A6	UCh-16	337271,8	40	440.277,07	0,65	40,52		15.422.703,10								
B7	UCh-16	1504108,38	40	1.963.474,04	0,65	40,52				68.779.592,54						
C8	UCh-16,UCh-17	284664,25	60	569.328,50	0,83	64,44						40.499.362,76				
C9	UCh-16,UCh-17	284664,25	60	569.328,50	0,83	64,44					40.499.362,76					
C10	UCh-16,UCh-17	284664,25	60	569.328,50	0,83	64,44						40.499.362,76				
B11	UCh-17	366436,4	80	2.110.223,12	1,00	88,36				247.990.889,30						
A12	UCh-17	71886,41	80	413.977,34	1,00	88,36		48.650.119,76								
A13	UCh-17	15401,66	80	88.694,62	1,00	88,36	10.423.285,90									
B14	UCh-17	331307,34	80	1.907.922,93	1,00	88,36			224.216.813,28							
C15	UCh-17	515724,77	80	2.969.940,58	1,00	88,36					349.023.853,37					
D16	UCh-16,UCh-17	245705,22	60	491.410,44	0,83	64,44								34.956.636,94		
B17	UCh-17	515724,77	80	2.969.940,58	1,00	88,36			349.023.853,37							
GE = 1,33							<b>TOTAL RECURSOS</b>		-	-	-	-	-	-	-	
GE = 1,33							<b>TOTAL RESERVAS</b>		7.454.766,61	41.203.854,16	128.955.374,96	197.983.393,65	235.542.532,80	56.663.912,88	36.456.143,59	1.353.410.137,13

Fuente: Datos del Estudio



**Tabla 29.** Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita, Manto 7.

AREA	PUNTO DE CONTROL	AREA HORIZONTAL (M²)	INCLINACIÓN (°)	AREA INCLINADA (M²)	ESPESOR (M)	GMAC CH4 Pie3/Ton	RESERVAS - RECURSOS												
							MEDIDAS (OS) (Pie3)		INDICADAS (OS) (Pie3)		INFERIDAS (OS) (Pie3)		HIPOTETICAS(OS) (Pie3)						
							SOBRE	BAJO	SOBRE	BAJO	SOBRE	BAJO	SOBRE	BAJO					
							ZONA DILUCIÓN	ZONA DILUCIÓN	ZONA DILUCIÓN	ZONA DILUCIÓN	ZONA DILUCIÓN	ZONA DILUCIÓN	ZONA DILUCIÓN	ZONA DILUCIÓN					
D1	UCh-23,UCh-24,UCh-25,UCh-26,UCh-27	7524926,59	62	16.028.503,51	1,26	86,67												2.292.997.672,34	
D2	UCh-23,UCh-24,UCh-25,UCh-26,UCh-27	135022,3	62	287.604,85	1,26	86,67													41.144.031,89
C3	UCh-23,UCh-24	507058,23	38	643.466,13	1,55	60,21							78.667.855,79						
C4	UCh-23,UCh-24,UCh-25,UCh-26,UCh-27	12127220,13	62	25.831.639,42	1,26	86,67											3.695.409.808,65		
B5	UCh-23,UCh-24,UCh-25,UCh-26,UCh-27	2452116,72	62	5.223.142,18	1,26	86,67				747.209.672,28									
A6	UCh-23	276478,21	40	360.916,67	0,40	24,02			4.542.670,46										
A7	UCh-23	108542,21	40	141.691,79	0,40	24,02	1.783.400,91												
B8	UCh-23,UCh-24	417219,95	38	529.459,72	1,55	60,21				64.729.841,50									
A9	UCh-24	37048,9	35	45.228,36	2,70	60,21	9.631.955,90												
A10	UCh-24	10080,02	35	12.305,43	2,70	60,21			2.620.598,94										
A11	UCh-24	91832,2	35	112.106,42	2,70	60,21	23.874.492,93												
E12	UCh-25	62456,29	72	202.112,80	0,90	60,21	14.347.500,58												
F13	UCh-25	2290,15	72	7.411,08	0,90	60,21				526.094,79									
B14	UCh-24,UCh-25,UCh-26,UCh-27	442057,39	68	1.180.057,69	1,48	60,21					137.754.208,69								
A15	UCh-26	49527,16	80	285.215,55	1,00	149,32	55.790.785,00												
A16	UCh-26	37760,87	80	217.456,18	1,00	149,32			42.536.430,10										
C17	UCh-24,UCh-25,UCh-26,UCh-27	537274,9778	68	1.434.237,91	1,48	60,21							167.425.974,75						
C18	UCh-27	16060,59	84	153.648,01	1,30	22,01							5.759.192,84						
D19	UCh-23,UCh-24,UCh-25,UCh-26,UCh-27	234268,9025	62	499.005,52	1,26	86,67											71.386.483,54		
D20	UCh-23,UCh-24,UCh-25,UCh-26,UCh-27	3305001,939	62	7.039.834,15	1,26	86,67												1.007.101.087,61	
GE = 1,31							<b>TOTAL RECURSOS</b>		14.566.546,40	-	534.126,77	-	-	-	-	-	-	-	-
							<b>TOTAL RESERVAS</b>		92.471.178,78	50.458.473,54	205.575.409,74	758.617.453,54	255.698.107,70	3.751.828.279,01	2.400.481.623,91	1.064.248.861,79			

Fuente: Datos del Estudio

**Tabla 30.** Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita, Manto 8.

AREA	PUNTO DE CONTROL	AREA HORIZONTAL (M²)	INCLINACIÓN (°)	AREA INCLINADA (M²)	ESPESOR (M)	GMAC CH4 Pie3/Ton	RESERVAS - RECURSOS												
							MEDIDAS (OS) (Pie3)		INDICADAS (OS) (Pie3)		INFERIDAS (OS) (Pie3)		HIPOTETICAS(OS) (Pie3)						
							SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN					
D1	UCh-28	145.030,20	40	189.323,48	0,50	12,90													
C2	UCh-28	499389,17	40	651.906,26	0,50	12,90													
B3	UCh-28	211929,65	40	276.654,51	0,50	12,90				2.373.280,71									
A4	UCh-28	170339,98	40	222.363,05	0,50	12,90	1.907.541,44												
A5	UCh-28	204196,53	40	266.559,64	0,50	12,90				2.286.681,86									
B6	UCh-28,UCh-29,UCh-30	1203233,95	39	1.548.272,80	1,97	12,90						52.330.521,20							
B7	UCh-28,UCh-29,UCh-30	104592,56	39	134.585,48	1,97	12,90				4.548.893,57									
E9	UCh-28,UCh-29,UCh-30	96496,69	39	124.168,04	1,97	12,90	4.196.791,56												
F10	UCh-30,UCh-31,UCh-32	131467,81	56	235.084,90	2,27	152,90				108.519.985,04									
B11	UCh-31,UCh-32	130109,92	68	347.324,16	1,80	152,90				127.135.438,19									
E12	UCh-31,UCh-32	90300,54	68	241.054,33	1,80	152,90	88.236.152,34												
B13	UCh-31,UCh-32,UCh-33	2637,01	67	6.748,91	1,53	152,90				2.099.830,90									
E14	UCh-31,UCh-32,UCh-33	10178,19	67	26.049,09	1,53	152,90	8.104.814,87												
A15	UCh-31,UCh-32	14180,16	68	37.853,47	1,80	152,90				13.855.983,12									
A16	UCh-31,UCh-32	57451,76	68	153.365,59	1,80	152,90	56.138.338,12												
E18	UCh-32,UCh-33	1774,74	74	6.438,68	1,20	152,90	1.571.220,13												
B19	UCh-31,UCh-32	132198,04	68	352.898,33	1,80	152,90						129.175.821,05							
B20	UCh-32,UCh-33	161881,91	74	587.300,33	1,20	152,90				143.317.959,82									
F21	UCh-32,UCh-33	148324,73	74	538.115,49	1,20	152,90				131.315.461,34									
F22	UCh-30,UCh-31,UCh-32,UCh-33,	1083819,04	59	2.104.347,41	1,80	152,90						770.280.797,98							
C23	UCh-28,UCh-29,UCh-30,UCh-31,UCh-32,UCh-33	9147867,34	53	15.200.463,58	1,75	82,90								2.932.925.647,22					
D24	UCh-28	7685136,29	40	10.032.232,93	0,50	12,90													86.061.510,21
G25	UCh-28,UCh-29,UCh-30,UCh-31,UCh-32,UCh-33	4443032,259	53	7.382.720,75	1,75	82,90								1.424.494.122,93					
C26	UCh-32,UCh-33	400963,97	74	1.454.679,35	1,20	152,90							354.983.074,65						
G27	UCh-32,UCh-33	106535,68	74	386.506,68	1,20	152,90							94.318.607,35						
D28	UCh-32,UCh-33	149173,39	74	541.194,39	1,20	152,90												132.066.800,51	
D29	UCh-32,UCh-33	1271834,56	74	4.614.158,91	1,20	152,90													1.125.985.815,03
GE = 1,33			<b>TOTAL RECURSOS</b>					102.108.978,90	-	239.835.446,39	770.280.797,98	94.318.607,35	1.424.494.122,93	-	-				
GE = 1,33			<b>TOTAL RESERVAS</b>					58.045.879,56	16.142.664,98	279.475.403,19	181.506.342,26	360.575.452,53	2.932.925.647,22	133.690.911,99	1.212.047.325,24				

Fuente: Datos del Estudio

Tabla 31. Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita, Manto 9.

AREA	PUNTO DE CONTROL	AREA HORIZONTAL (M²)	INCLINACIÓN (°)	AREA INCLINADA (M²)	ESPESOR (M)	GMAC CH4 Pie3/Ton	RESERVAS - RECURSOS										
							MEDIDAS (OS) (Pie3)		INDICADAS (OS) (Pie3)		INFERIDAS (OS) (Pie3)		HIPOTETICAS(OS) (Pie3)				
							SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN			
D1	UCh-34	171511,82	40	223.892,78	1,00	15,92									4.704.972,44		
C2	UCh-34	666156,35	40	869.605,36	1,00	15,92					18.274.234,77						
B3	UCh-34	183539,6	40	239.593,93	1,00	15,92			5.034.922,72								
A4	UCh-34	157951,17	40	206.190,61	1,00	15,92	4.332.971,93										
A5	UCh-34	215390,43	40	281.172,24	1,00	15,92		5.908.665,87									
B6	UCh-34	169660,61	40	221.476,20	1,00	15,92			4.654.189,39								
B7	UCh-34	1266858,79	40	1.653.766,70	1,00	15,92				34.752.914,92							
C8	UCh-34,UCh-35,UCh-36	134940,58	58	254.643,66	1,80	62,93					38.074.747,58						
F9	UCh-35,UCh-36	50038,67	68	133.576,59	2,10	109,94			40.707.956,27								
B10	UCh-35,UCh-36	109049,55	68	291.104,19	2,10	109,94			88.715.074,02								
E11	UCh-35,UCh36	94808,86	68	253.089,14	2,10	109,94	77.129.846,32										
E12	UCh-35,UCh-36	6069,19	68	16.201,50	2,10	109,94		4.937.467,79									
A13	UCh-35,UCh-36,UCh37	17487,73	70	51.130,70	2,20	109,94		16.324.282,41									
A14	UCh-35,UCh-36,UCh37	69800,35	70	204.082,57	2,20	109,94	65.156.576,96										
B15	UCh-35,UCh-36,UCh-37	13448,41	70	39.320,52	2,20	109,94			12.553.695,81								
E16	UCh-36,UCh-37	54938,54	78	264.239,78	1,88	109,94	72.091.774,67										
B17	UCh-36,UCh-37	142889,69	78	687.261,45	1,88	109,94			187.503.550,96								
B18	UCh-35,UCh-36,UCh-37	200872,16	70	587.310,91	2,20	109,94				187.508.262,53							
F19	UCh-35,UCh-36,UCh-37	534287,24	70	1.562.151,38	2,20	109,94				498.741.448,61							
C20	UCh-34,UCh-35,UCh36,UCh37	9450059,09	63	20.815.543,71	1,90	62,93						3.285.284.791,07					
D21	UCh-34	8172494,29	40	10.668.433,62	1,00	15,92										224.190.731,43	
G22	UCh-34,UCh-35,UCh36,UCh37	3169823,026	63	6.982.135,15	1,90	62,93						1.101.979.498,56					
C23	UCh-36,UCh-37	468948,55	78	2.255.517,95	1,88	109,94					615.366.429,46						
G24	UCh-36,UCh-37	112057,55	78	538.967,05	1,88	109,94					147.044.818,54						
D25	UCh-36,UCh-37	147478,05	78	709.330,24	1,88	109,94									193.524.515,75		
D26	UCh-36,UCh-37	1948938,91	78	9.373.878,41	1,88	109,94										2.557.448.100,19	
							<b>TOTAL RECURSOS</b>	<b>149.221.620,99</b>	<b>4.937.467,79</b>	<b>40.707.956,27</b>	<b>498.741.448,61</b>	<b>147.044.818,54</b>	<b>1.101.979.498,56</b>	<b>-</b>	<b>-</b>		
<b>GE = 1,32</b>							<b>TOTAL RESERVAS</b>	<b>69.489.548,89</b>	<b>22.232.948,27</b>	<b>298.461.432,90</b>	<b>222.261.177,45</b>	<b>671.715.411,81</b>	<b>3.285.284.791,07</b>	<b>198.229.488,19</b>	<b>2.781.638.831,61</b>		

Fuente: Datos del Estudio

**Tabla 32.** Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita, Manto 10.

AREA	PUNTO DE CONTROL	AREA HORIZONTAL (M²)	INCLINACIÓN (°)	AREA INCLINADA (M²)	ESPESOR (M)	GMAC CH4 Pie3/Ton	RESERVAS - RECURSOS										
							MEDIDAS (OS) (Pie3)		INDICADAS (OS) (Pie3)		INFERIDAS (OS) (Pie3)		HIPOTETICAS(OS) (Pie3)				
							SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN			
D1	UCh-38	192028,21	40	250.675,03	0,4	51,19									7.237.278,76		
C2	UCh-38	473067,51	40	617.545,78	0,4	51,19					17.829.262,90						
B3	UCh-38	176707,59	40	230.675,38	0,4	51,19			6.659.865,69								
A4	UCh-38	154117,32	40	201.185,87	0,4	51,19	5.808.469,53										
A5	UCh-38	206134,19	40	269.089,07	0,4	51,19		7.768.913,72									
B6	UCh-38	165776,91	40	216.406,39	0,4	51,19			6.247.903,42								
B7	UCh-38	1228613,7	40	1.603.841,28	0,4	51,19				46.304.758,20							
C8	UCh-38	169288,09	58	319.460,15	0,4	51,19					9.223.185,23						
F9	UCh-39,UCh-40,UCh-41	26377,78	64	60.172,25	1,47	187,84			23.427.222,77								
B10	UCh-39,UCh-40,UCh-41	126840,93	64	289.345,98	1,47	187,84			112.652.798,03								
E11	UCh-39,UCh-40,UCh-41	174539,21	64	398.153,96	1,47	187,84	155.015.659,17										
A12	UCh-39,UCh-40,UCh-41	79053,38	64	180.334,36	1,47	187,84	70.210.652,44										
A13	UCh-39,UCh-40	8234,69	68	21.982,23	1,4	187,84		8.150.928,16									
E14	UCh-39,UCh-40	2772,17	68	7.400,22	1,4	187,84		2.743.971,97									
B15	UCh39,UCh40,UCh-41	7620,29	64	17.383,19	1,47	187,84			6.767.902,05								
E16	UCh40,UCh-41	1531,49	69	4.273,51	1,41	187,84		1.595.920,70									
B17	UCh39,UCh40,UCh-41	163086,69	64	372.028,80	1,47	187,84				144.844.191,47							
B18	UCh-40,UCh-41	62323,76	69	173.909,97	1,41	187,84			64.945.757,94								
F19	UCh-39,UCh40,UCh-41	716684,38	64	1.634.880,36	1,47	187,84				636.517.729,06							
F20	UCh40,UCh-41	97252,18	69	271.375,22	1,41	187,84			101.343.637,51								
C21	UCh-38,UCh-39,UCh40,UCh-41	9007221,84	58	16.997.347,42	1,21	119,51					3.465.691.337,01						
D22	UCh-38	8099165,6	40	10.572.709,81	0,4	51,19									305.246.396,61		
G23	UCh-38,UCh-39,UCh-40,UCh-41	3830222,41	58	7.227.935,78	1,21	119,51					1.473.747.273,06						
C24	UCh-40,UCh-41	386449,12	69	1.078.358,49	1,41	187,84					402.707.266,13						
G25	UCh-40,UCh-41	145026,68	69	404.686,52	1,41	187,84					151.128.039,36						
D26	UCh-40,UCh-41	132286,77	69	369.136,72	1,41	187,84								137.852.153,71			
D27	UCh-40,UCh-41	1240162,97	69	3.460.585,61	1,41	187,84									1.292.337.369,54		
							<b>TOTAL RECURSOS</b>	<b>155.015.659,17</b>	<b>4.339.892,67</b>	<b>124.770.860,27</b>	<b>636.517.729,06</b>	<b>151.128.039,36</b>	<b>1.473.747.273,06</b>	<b>-</b>	<b>-</b>		
GE = 1,41							<b>TOTAL RESERVAS</b>	<b>76.019.121,97</b>	<b>15.919.841,87</b>	<b>197.274.227,13</b>	<b>191.148.949,67</b>	<b>429.759.714,26</b>	<b>3.465.691.337,01</b>	<b>145.089.432,47</b>	<b>1.597.583.766,15</b>		

Fuente: Datos del Estudio

**Tabla 33.** Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita, Manto 11.

AREA	PUNTO DE CONTROL	AREA HORIZONTAL (M²)	INCLINACIÓN (°)	AREA INCLINADA (M²)	ESPESOR (M)	GMAC CH4 Pie3/Ton	RESERVAS - RECURSOS									
							MEDIDAS (OS) (Pie3)		INDICADAS (OS) (Pie3)		INFERIDAS (OS) (Pie3)		HIPOTETICAS(OS) (Pie3)			
							SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN		
D1	UCh-42	202269,66	40	264.044,29	0,40	57,92								8.380.807,97		
C2	UCh-42	470476,83	40	614.163,88	0,40	57,92					19.493.659,92					
B3	UCh-42	171046,34	40	223.285,14	0,40	57,92			7.087.106,04							
A4	UCh-42	492844,14	40	643.362,33	0,40	57,92	20.420.423,38									
A5	UCh-42	186277,22	40	243.167,64	0,40	57,92		7.718.179,83								
B6	UCh-42	163302,71	40	213.176,55	0,40	57,92			6.766.257,74							
B7	UCh-42	1190327,27	40	1.553.861,89	0,40	57,92				49.319.825,16						
C8	UCh-42,UCh-43	204331,7	60	408.663,40	0,65	113,63					41.351.633,92					
B9	UCh-43	357833,96	80	2.060.683,65	0,90	169,34			430.262.956,05							
A10	UCh-43	82197,47	80	473.356,36	0,90	169,34	98.835.019,52									
A11	UCh-43	5090,6	80	29.315,60	0,90	169,34		6.120.985,85								
B12	UCh-43	146392,5	80	843.040,81	0,90	169,34				176.023.734,01						
B13	UCh-43	357833,96	80	2.060.683,65	0,90	169,34			430.262.956,05							
C14	UCh-42,UCh-43	9494820,03	60	18.989.640,06	0,65	113,63						1.921.514.488,42				
D15	UCh-42,UCh-43	13071429,93	60	26.142.859,87	0,65	113,63									2.645.331.024,84	
C16	UCh-43	479584,56	80	2.761.817,41	0,90	169,34					576.657.035,18					
D17	UCh-43	285107,13	80	1.641.866,52	0,90	169,34								342.815.524,12		
GE = 1,37							<b>TOTAL RECURSOS</b>		-	-	-	-	-	-	-	-
							<b>TOTAL RESERVAS</b>		119.255.442,90	13.839.165,67	874.379.275,88	225.343.559,17	637.502.329,02	1.921.514.488,42	351.196.332,08	2.645.331.024,84

Fuente: Datos del Estudio

**Tabla 34.** Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita, Manto 12.

AREA	PUNTO DE CONTROL	AREA HORIZONTAL (M²)	INCLINACIÓN (°)	AREA INCLINADA (M²)	ESPESOR (M)	GMAC CH4 Pie3/Ton	RESERVAS - RECURSOS								
							MEDIDAS (OS) (Pie3)		INDICADAS (OS) (Pie3)		INFERIDAS (OS) (Pie3)		HIPOTETICAS(OS) (Pie3)		
							SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	
D1	UCh-44	203812,55	40	266.058,39	1,30	60,85								30.727.961,27	
C2	UCh-44	469569,6	40	612.979,58	1,30	60,85					70.795.034,38				
B3	UCh-44	170823,88	40	222.994,74	1,30	60,85			25.754.398,19						
A4	UCh-44	159000,88	40	207.560,91	1,30	60,85	23.971.894,19								
A5	UCh-44	182540,09	40	238.289,16	1,30	60,85		27.520.801,91							
B6	UCh-44	162759,15	40	212.466,98	1,30	60,85			24.538.512,76						
B7	UCh-44	1182170,47	40	1.543.213,95	1,30	60,85				178.230.871,55					
C8	UCh-44,UCh-45	204298,6	60	408.597,20	1,13	91,45					61.376.243,47				
B9	UCh-45	143034,25	80	823.701,42	0,95	122,06				139.446.551,76					
A10	UCh-45	4212,97	80	24.261,53	0,95	122,06		4.107.296,95							
A11	UCh-45	83075,11	80	478.410,49	0,95	122,06	80.991.354,35								
B12	UCh-45	355040,33	80	2.044.595,77	0,95	122,06			346.134.927,50						
C13	UCh-45	478531,31	80	2.755.751,98	0,95	122,06					466.528.409,02				
D14	UCh-45	286333,01	80	1.648.926,09	0,95	122,06								279.150.978,87	
C15	UCh-44,UCh-45	9471200,44	60	18.942.400,88	1,13	91,45					2.845.377.815,23				
D16	UCh-44,UCh-45	13054206,22	60	26.108.412,44	1,13	91,45									3.921.799.460,28
GE = 1,46															
<b>TOTAL RECURSOS</b>							-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>TOTAL RESERVAS</b>							104.963.248,54	31.628.098,87	396.427.838,45	317.677.423,31	598.699.686,86	2.845.377.815,23	309.878.940,14	3.921.799.460,28	

Fuente: Datos del Estudio



**Tabla 35. Cálculo de Reservas y Recursos Sector Úmbita -Chinavita, Manto 13.**

AREA	PUNTO DE CONTROL	AREA HORIZONTAL (M²)	INCLINACIÓN (°)	AREA INCLINADA (M²)	ESPESOR (M)	GMAC CH4 Pie3/Ton	RESERVAS - RECURSOS									
							MEDIDAS (OS) (Pie3)		INDICADAS (OS) (Pie3)		INFERIDAS (OS) (Pie3)		HIPOTETICAS(OS) (Pie3)			
							SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN	SOBRE ZONA DILUCIÓN	BAJO ZONA DILUCIÓN		
D1	UCh-46	7990518,91	40	10.430.881,63	0,45	47,28									310.698.412,60	
D2	UCh-46	205553,86	40	268.331,51	0,45	47,28								7.992.629,61		
C3	UCh-46	468811,96	40	611.990,55	0,45	47,28						18.228.995,32				
B4	UCh-46	170063,51	40	222.002,15	0,45	47,28			6.612.644,71							
A5	UCh-46	162080,08	40	211.580,52	0,45	47,28	6.302.221,94									
A6	UCh-46	176434,95	40	230.319,47	0,45	47,28		6.860.387,86								
B7	UCh-46	162264,07	40	211.820,70	0,45	47,28			6.309.376,09							
B8	UCh-46	1175370,12	40	1.534.336,72	0,45	47,28				45.702.367,35						
C9	UCh-46,UCh-47,UCh48	8890298,86	58	16.776.704,42	1,02	68,88							1.650.167.383,38			
C10	UCh-46,UCh-47,UCh48	174219	58	328.765,18	1,02	68,88						32.337.553,09				
F11	UCh-47,UCh-48	30965,48	68	82.661,33	1,31	90,49			13.718.363,90							
B12	UCh-47,UCh-48	116104,87	68	309.938,14	1,31	90,49			51.436.918,05							
E13	UCh-47,UCh48	66775,25	68	178.254,34	1,31	90,49	29.582.850,93									
A14	UCh-47,UCh48	79211,43	80	456.160,45	1,31	90,49	75.703.776,20									
A15	UCh-47,UCh-48	8076,65	68	21.560,35	1,31	90,49		3.578.127,12								
E16	UCh-47,UCh48	5971,2	68	15.939,92	1,31	90,49		2.645.368,15								
B17	UCh-47,UCh-48,	142126,82	68	379.402,88	1,31	90,49				62.965.193,38						
B18	UCh48	157067,74	80	904.517,06	1,22	90,49			139.799.371,65							
F19	UCh-47,UCh48	550599,95	68	1.469.808,49	1,31	90,49				243.927.446,83						
G20	UCh-46,UCh-47,UCh48	3262168,74	58	6.155.973,11	1,02	68,88							605.505.454,72			
G21	UCh-47,UCh-48	26173,7	68	69.869,83	1,31	90,49					11.595.503,80					
C22	UCh-48	474511,31	80	2.732.601,73	1,22	90,49					422.342.506,35					
D23	UCh-47,UCh-48	265783,63	68	709.500,67	1,31	90,49								117.747.780,90		
D24	UCh-47,UCh-48	1783463,3	68	4.760.896,71	1,31	90,49									790.112.039,21	
GE = 1,40							<b>TOTAL RECURSOS</b>		<b>29.582.850,93</b>	<b>2.645.368,15</b>	<b>13.718.363,90</b>	<b>243.927.446,83</b>	<b>11.595.503,80</b>	<b>605.505.454,72</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
							<b>TOTAL RESERVAS</b>		<b>82.005.998,14</b>	<b>10.438.514,98</b>	<b>204.158.310,50</b>	<b>108.667.560,73</b>	<b>472.909.054,75</b>	<b>1.650.167.383,38</b>	<b>125.740.410,50</b>	<b>1.100.810.451,82</b>

Fuente: Datos del Estudio

**Tabla 36.** Resumen Cálculo de Reservas y Recursos, Área GMAC Úmbita - Rondón, Sector Úmbita –Chinavita.

MANTOS	RESERVAS - RECURSOS							
	MEDIDOS (Pie3)		INDICADOS (Pie3)		INFERIDOS (Pie3)		HIPOTETICAS(OS) (Pie3/Pie3)	
	SOBRE	BAJO	SOBRE	BAJO	SOBRE	BAJO	SOBRE	BAJO
	ZONA DILUCIÓN	ZONA DILUCIÓN	ZONA DILUCIÓN	ZONA DILUCIÓN	ZONA DILUCIÓN	ZONA DILUCIÓN	ZONA DILUCIÓN	ZONA DILUCIÓN
Manto 1	1.160.132,71	248.636.272,76	436.257.145,93	1.267.940.373,66	380.437.426,06	3.305.464.630,62	112.646.441,46	4.270.804.301,71
	49.190.601,12	15.639.433,97	79.534.145,65	267.275.545,67	-	-	-	-
Potencial M1	10.434.986.451,33							
Manto 2	59.259.816,74	348.243.804,53	654.272.645,30	1.811.635.424,15	904.129.425,14	4.571.629.272,50	109.023.303,25	4.167.420.896,11
	21.842.811,75	-	41.336.886,61	-	-	-	-	-
Potencial M2	12.688.794.286,09							
Manto 3	108.496.208,88	302.478.931,42	436.551.893,26	473.213.758,88	410.305.818,03	4.556.704.652,25	109.847.052,84	3.453.465.020,35
	8.678.601,90	-	21.659.674,15	1.924.796,68	-	-	-	-
Potencial M3	9.883.326.408,66							
Manto 4	26.172.311,84	136.533.435,32	514.519.510,08	514.519.510,08	155.420.651,60	58.636.523,56	58.636.523,56	6.533.644.224,37
	-	-	896.202.425,97	-	283.841.097,46	2.750.350.682,21	-	-
Potencial M4	11.928.476.896,05							
Manto 5	7.454.766,61	41.203.854,16	128.955.374,96	197.983.393,65	235.542.532,80	56.663.912,88	36.456.143,59	1.353.410.137,13
	-	-	-	-	-	-	-	-
Potencial M5	2.057.670.115,78							
Manto 6	42.357.145,62	82.203.388,35	612.598.511,38	1.846.863.089,61	585.938.627,50	7.880.228.395,51	580.008.041,78	6.869.594.857,02
	125.230.772,24	4.576.569,76	3.194.171,35	51.104.716,75	-	-	-	-
Potencial M6	18.683.898.286,87							
Manto 7	92.471.178,78	50.458.473,54	205.575.409,74	758.617.453,54	255.698.107,70	3.751.828.279,01	2.400.481.623,91	1.064.248.861,79
	14.566.546,40	-	534.126,77	-	-	-	-	-
Potencial M7	8.594.480.061,17							
Manto 8	58.045.879,56	16.142.664,98	279.475.403,19	181.506.342,26	360.575.452,53	2.932.925.647,22	133.690.911,99	1.212.047.325,24
	102.108.978,90	-	239.835.446,39	770.280.797,98	94.318.607,35	1.424.494.122,93	-	-
Potencial M8	7.805.447.580,50							
Manto 9	69.489.548,89	22.232.948,27	298.461.432,90	222.261.177,45	671.715.411,81	3.285.284.791,07	198.229.488,19	2.781.638.831,61
	149.221.620,99	4.937.467,79	40.707.956,27	498.741.448,61	147.044.818,54	1.101.979.498,56	-	-
Potencial M9	9.491.946.440,95							
Manto 10	76.019.121,97	15.919.841,87	197.274.227,13	191.148.949,67	429.759.714,26	3.465.691.337,01	145.089.432,47	1.597.583.766,15
	155.015.659,17	4.339.892,67	124.770.860,27	636.517.729,06	151.128.039,36	1.473.747.273,06	-	-
Potencial M10	8.664.005.844,13							
Manto 11	119.255.442,90	13.839.165,67	874.379.275,88	225.343.559,17	637.502.329,02	1.921.514.488,42	351.196.332,08	2.645.331.024,84
	-	-	-	-	-	-	-	-
Potencial M11	6.788.361.618,00							
Manto 12	104.963.248,54	31.628.098,87	396.427.838,45	317.677.423,31	598.699.686,86	2.845.377.815,23	309.878.940,14	3.921.799.460,28
	-	-	-	-	-	-	-	-
Potencial M12	8.526.452.511,67							
Manto 13	82.005.998,14	10.438.514,98	204.158.310,50	108.667.560,73	472.909.054,75	1.650.167.383,38	125.740.410,50	1.100.810.451,82
	29.582.850,93	2.645.368,15	13.718.363,90	243.927.446,83	11.595.503,80	605.505.454,72	-	-
Potencial M13	4.661.872.673,13							
TOTAL RESERVAS	847.150.801	1.319.959.395	5.238.906.979	8.117.378.016	6.098.634.238	40.282.117.129	4.670.924.646	40.971.799.158
	2.167.110.196		13.356.284.995		46.380.751.367		45.642.723.804	
TOTAL RECURSOS	655.438.443,40	32.138.732,33	1.461.494.057,33	2.469.772.481,59	687.928.066,51	7.356.077.031,47	-	-
	687.577.175,73		3.931.266.538,92		8.044.005.097,99		0,00	
TOTAL	120.209.719.174,32							

Fuente: Datos del Estudio

De acuerdo a la Tabla 36, el potencial de GMAC para el Sector denominado Úmbita – Chinavita, es de 120,21 Bcf, distribuidos en 2.854.687.372 pies<sup>3</sup> (2,85 Bcf) de Reservas y Recursos medidos; 17.287.551.534 pies<sup>3</sup> (17,29 Bcf) de Reservas y Recursos indicados; 54.424.756.465 pies<sup>3</sup> (54,42 Bcf) de Reservas y Recursos Inferidos y 45.642.723.804 pies<sup>3</sup> (45,64 Bcf) de Reservas y Recursos Hipotéticos.

### 7.3.2.2 Recursos Especulativos

En esta categoría se evaluó una cinta de carbón de 0.35m, identificada en el Pozo Chinavita-1, de la cual no se tiene datos para establecer su continuidad, los demás datos de caracterización y medición de contenidos de metano se mencionan en este capítulo, no se realizan mapas de contornos estructurales. El valor de los recursos, se estima, hallando el área entre la posible traza de la capa determinada por distancias estratigráficas tomando como referencia la traza del manto M13 y el límite definido para la evaluación, la cual se afecta por el valor obtenido de GMAC medido (Ver tabla 37).

**Tabla 37.** Resumen Recursos Especulativos. Area Úmbita – Chinavita.

CAPA DE CARBON	AREA (M2)	PROMEDIO BUZAMIENTO (°)	AREA INCLINADA (M <sup>2</sup> )	ESPESOR (M)	GRAVEDAD ESPECÍFICA	GMAC CH <sub>4</sub> (pie <sup>3</sup> /ton)	RECURSOS (pie <sup>3</sup> )
Cinta	25.398.299,76	80	146.262.978,96	0,35	1,6	57,64	4.721.134.940,02
<b>TOTAL</b>							<b>4.721.134.940,02</b>

Como lo indica la Tabla 37, el valor de Recursos Especulativos determinados para esta capa de carbón correspondió a 4.721.134.940,02 pies<sup>3</sup> o 4,72 Bcf (Billones de pies cúbicos).

## 8. CONCLUSIONES

- En el presente informe se consiga el estudio sobre GMAC adelantado en el área Umbita – Rondón, que comprende los municipios de Umbita, Chinavita, Ramiriquí, Tibaná, Zetaquirá, Rondón, entre otros, en el departamento de Boyacá, en la estructura denominada Sinclinal de Umbita, estructura afectada por la Falla de Soapaga al occidente y otras de tipo transversal y de cabalgamiento que truncan su continuidad hacia el norte. La formación portadora de los carbones, corresponde a la Formación Guaduas, cuyo espesor levantado equivale a 510.0 m y en donde se identificaron hasta 13 mantos, con espesores que varían entre 0.40 a 3.0m.
- De los sectores identificados para el estudio, se seleccionó el sector GMAC Umbita – Chinavita, ubicado en el flanco oriental del Sinclinal de Umbita, para adelantar perforaciones con recuperación de núcleos y llevar a cabo mediciones de contenidos de gas metano en las capas de carbón cortadas por las mismas. En estas, se presentaron variaciones en el valor de contenidos de gas total libre de cenizas, siendo mayores los valores del Pozo Chinavita-1 (al norte del sector) que los del Pozo Umbita-1 (al sur del sector), los cuales superaron los 500.0m de profundidad y se encuentran distanciados 4 km aproximadamente, en donde los rasgos estructurales importantes los constituyen la Falla El Uvero y la Falla Río Garagoa.
- Las capas de carbón registradas en los pozos presentan un valor medio a alto de Gamma Ray, entre 17 a 40 API, una ligera deflexión en la temperatura con valores para el Pozo Chinavita-1 entre 21 a 32 °C, correspondiente a profundidades hasta 415,0 m, con lo cual se tiene un gradiente aproximado de 1°C por cada 37.73m de profundidad. A la vez se obtuvo variaciones en los valores de densidad entre 1,10 a 1,35 gramos/cm<sup>3</sup>, con los cuales se pudo determinar los espesores reales de las capas de interés.
- Los análisis llevados a cabo para establecer la madurez termal de la cuenca carbonífera del sinclinal de Umbita y la relación con el gas asociado a los carbones de la Formación Guaduas, revelan que:
  - La máxima paleotemperatura alcanzada por las rocas de esta unidad corresponde a 110°C; lo que representa que las rocas de las Formaciones Socha Superior, Socha Inferior y Guaduas alcanzaron la zona de borrado parcial de huellas de fisión en apatitos.

- 
- Los carbones y por tanto el gas metano asociado de la formación Guaduas se generó por procesos de acumulación y enterramiento de sedimentos dentro de la etapa de catagénesis.
  - El material parental para la formación del carbón, corresponden a plantas arbóreas de ambientes húmedos asociados a zonas de inundación aluvial y pantanos.
  - El carbón de la Formación Guaduas se formó y alcanzó su rango y madurez en un periodo comprendido entre los 45 M.a y 18 Ma y se estima que la exhumación de la cuenca sedimentaria del sinclinal de Úmbita tiene lugar desde al menos unos 6 Ma.
  - Los datos obtenidos de huellas de fisión (AFT), presencia de los gases de nitrógeno y metano, valores de reflectancia de vitrinita, el grado de madurez según el diagrama de van Krevelen, permiten concluir que el gas metano asociado a los carbones de la Formación Guaduas fueron generados en la fase de catagénesis.
- De acuerdo a los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a las 30 muestras de carbón colectadas tanto en pozo como en frente de mina, se obtuvo una clasificación según la norma ASTM por rango para carbones Bituminoso alto volátil A, B, C, que indican una madurez suficiente para la generación de gas según Law and Rice (1991).
  - La reflectancia de la vitrinita ( $R_o$ ) obtenida en las muestras analizadas, permite establecer valores entre 0,45 a 0.70%, con los cuales se clasifican los carbones como Bituminosos alto volátiles C y Sub bituminosos B (Uribe y Pérez, 1987), que de acuerdo a Rice y otros (1991), se encuentran dentro de la ventana de generación de metano tipo termogénico. Esta clasificación difiere con respecto a la realizada con la norma ASTM, debido a que se tienen como criterios de clasificación los parámetros de materia volátil y poder calorífico, y en este se tiene un aumento debido al alto contenido de inertinita el cual es rico en carbono.
  - Las mediciones de  $CH_4$  realizadas en las muestras de los mantos de carbón colectadas, dieron como resultado contenidos de gas total libre de cenizas entre 57.64 a 308.07 pies<sup>3</sup>/ton para el Pozo Chinavita-1; 12.90 a 60.85 pies<sup>3</sup>/ton para el Pozo Umbita-1 y 7.28 a 28.77 pies<sup>3</sup>/ton para las muestras de frente de mina del sector de interés. Los mantos de carbón que mayor contenido de gas total libre de cenizas registraron corresponden a los Mantos: 1, 2, 3, 4, 6, 11, 12 de la Formación Guaduas, ubicados en el flanco Oriental del Sinclinal de Umbita. Con base en esta información se hacen las siguientes consideraciones:
    - Con relación a las mediciones, los contenidos de gas, fueron corregidos con los valores de cenizas de los análisis químicos, debido a que estos, son más altos que los porcentajes de materia mineral y porque incluyen

humedad y azufre. Los valores altos de cenizas en los carbones muestreados, posiblemente tengan su origen en el manejo inadecuado de los núcleos de perforación al momento de recuperarlos, ya que estos pueden salir a superficie con mezcla o parte de los respaldos. Este hecho puede producirse en casos en que la zona de interés presente alto fracturamiento que incide en que la muestra sea poco consistente y dificulte su recuperación.

- Así mismo, los bajos valores en frentes de mina, pueden deberse al poco avance de los trabajos y su proximidad a la superficie, lo cual favorece la desorción natural.
  - A pesar que en este estudio, los pozos alcanzaron una mayor profundidad comparada con los pozos realizados en los proyectos anteriores, no se aprecia el incremento del contenido de metano con respecto a este parámetro, el incremento es variable y no constante.
  - Hay que considerar de acuerdo a los estudios realizados, que el comportamiento de los depósitos de GMAC, difiere entre uno y otro e incluso dentro del mismo, razón por la cual se dificulta el establecer zonas de análisis de potencial muy amplias.
  - De acuerdo a lo anterior y al análisis de Termocronología, se puede mencionar que la generación del metano es una función del tipo de maceral y del proceso de madurez termal de la cuenca (Anderson J. et al 2003-2004)
  - Hacia el pozo Umbita-1, donde se presentaron los menores contenidos de gas metano, los carbones se encuentran subsaturados quizás por efecto tectónico principalmente.
  - Con respecto al pozo Chinavita-1, se analizan, las condiciones de mayores buzamientos en las capas y la posible influencia hidrogeológica existente en la zona que favorece la presión de confinamiento en los mantos de carbón y por ende las mayores concentraciones de CH<sub>4</sub>.
- Los valores encontrados en el Pozo Chinavita 1 son de los valores más altos reportados en el altiplano Cundiboyacense. Contenidos de gas cercanos a 300 pies<sup>3</sup>/ton solo se han reportado en la Zona de Socotá en Boyacá pero a profundidades de 700 m y en carbones coquizables de más alto rango.
  - De acuerdo al análisis de cromatografía efectuado en 5 muestras de carbón obtenidas en pozo a partir de las curvas de calibración para N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, se obtiene que 3 (15172807016, 15172807021, 15172807022, del Pozo Chinavita-1) de las 5 muestras presentan concentración de metano superior al 80%, estableciendo que el compuesto prominente en el gas asociado al carbón corresponde al metano.

- El potencial de gas metano, para el sector evaluado, enmarcados dentro del área general de estudio, correspondió a 120.21 Bcf de recursos y reservas de GMAC en las categorías de Medido, Indicado, Inferido e Hipotético. Discriminados así:

SECTOR	RESERVAS - RECURSOS							
	MEDIDAS (OS) (Pies3)		INDICADAS (OS) (Pies3)		INFERIDAS (OS) (Pies3)		HIPOTÉTICAS (OS) (Pies3)	
Úmbita-Chinavita	2.167.110.196	687.577.176	13.356.284.995	3.931.266.539	46.380.751.367	8.044.005.098	45.642.723.804	0
Total Reservas	107.546.870.362							
<b>Total Recursos</b>	<b>12.662.848.813</b>							
Potencial	120.209.719.174							

## 9. RECOMENDACIONES

- Continuar la exploración de Gas Metano Asociado al carbón (GMAC), en la zona carbonífera Santander, de acuerdo al conocimiento relacionado con estudios a detalle de algunas zonas de interés localizadas en el Área carbonífera San Luis y Vanegas –San Vicente de Chucurí-Río Cascajales de la misma, en donde se referencia la presencia de un número apreciable de mantos de carbón de espesor importante, con rangos correspondientes a carbones con buenas perspectivas para adelantar el estudio de GMAC en una de las estructuras principales el Sinclinal de Andes.
- Analizar el comportamiento del gas metano en los mantos de carbón en estructuras sinclinales como anticlinales, para determinar las condiciones que en cada caso puedan incidir en el buen desarrollo de un proyecto de GMAC.
- Complementar los estudios de exploración de GMAC en las principales zonas carboníferas del país teniendo en cuenta lo siguientes aspectos:
  - Ampliar el conocimiento sobre la cuenca donde se depositaron los carbones de interés.
  - Determinación de la incidencia y priorización de parámetros en la exploración de GMAC, como: rango del carbón, litología de los respaldos de los mantos de carbón, espesor de la cobertera, las condiciones hidrogeológicas de la cuenca, ambientes de depósito, estratigrafía de secuencias, tectónica (sistema de fracturamiento), permeabilidad y porosidad.
  - Establecer relaciones preliminares entre las variables que determinan la generación de gas metano en los mantos de carbón, como la profundidad de los mantos, los contenidos de GMAC, el rango del carbón, el análisis de macerales, entre zonas, áreas, sectores y bloques carboníferos.
  - Emplear técnicas como la Termocronología, con el fin de conocer sobre la historia termal de la cuenca en cada zona de estudio, de tal manera que se



---

determinen entre otras zonas de hundimiento, profundidad de enterramiento, variaciones en la misma.

- Elaborar el modelo hidrogeológico en la zona de estudio, de tal forma que se puedan establecer en el proceso de determinación de sectores de interés GMAC, la dirección del flujo de agua y por ende las zonas donde se pudiera concentrar por efecto de la presión hidrostática mayores contenidos de metano.
- Determinar sistema de fracturamiento endógeno o natural y exógeno (formadas por el tectonismo) de los carbones objeto de estudio, de tal manera que pueda describirse el mecanismo de permeabilidad primario y su influencia en la migración del gas en el carbón, ya que se considera esta propiedad como el principal sustento del potencial de los depósitos de GMAC en la etapa de desarrollo (Anderson J. et al 2003-2004)
- Realizar análisis de cromatografía en los núcleos de las perforaciones con el fin de determinar los diferentes tipos de gases presentes y los porcentajes de metano en cada muestra. En este caso, se debe considerar si no existe evidencia literaria para inferir a cual pico corresponde cada compuesto en el cromatograma, es necesario pasar al menos dos estándares o compuestos conocidos, para definir su tiempo de retención y evitar confundir los picos y llegar a obtener errores en la cuantificación.
- Determinar la capacidad de adsorción de los mantos de carbón a través de la aplicación de Isotermas.
- Es necesario realizar medidas de las concentraciones de gas en diferentes tiempos durante todo el estudio, puesto que la atmósfera puede cambiar de acuerdo con las condiciones ambientales y el tipo de carbón.
- Realizar análisis de Microlitotipos, principalmente en los macerales liptiníticos teniendo en cuenta su origen (esporas, polen, ceras y resinas).
- A partir de los aspectos anteriores integrar e identificar los aspectos relevantes para definir el origen del gas metano en las diferentes muestras de interés.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLAN KOLKER, JEFFREY C; 2011 “Mercury and Halogens in Coal—Their Role in Determining Mercury Emissions From Coal Combustion”. USGS United Stated.
- ALVARADO, B. SARMIENTO, R. 1944. Informe geológico sobre los yacimientos de hierro, carbón y caliza de la Región de paz de Rio, Departamento de Boyacá. Servicio. Geológico. Nacional. Informe 468, ined. Bogotá.
- AMAYA, E., MARIÑO, J., & JARAMILLO, C. 2010. Litofacies y Ambientes Continentales de Acumulación de la Formación Guaduas en la Parte Central de la Cordillera Oriental - Implicaciones Paleogeográficas. Boletín de Geología, 32, 13-25.
- ANDERSON J.; SIMPSON M. et al. 2003-2004. Producción de gas natural a partir del carbón. Schlumberger. Oilfield Review., 8-33. USA
- ANNUAL BOOK OF AMERICAN STANDARDS FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM 2012, D388, Standard classification of coals by rank, D5142-09 Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures (Withdrawn 2010), D5865-04 Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, D5373-08 Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal, D720-91-04 Standard Test Method for Free-Swelling Index of Coal, D1412-07 Standard Test Method for Equilibrium Moisture of Coal at 96 to 97 Percent Relative Humidity and 30°C, D167-93 Standard Test Method for Apparent and True Specific Gravity and Porosity of Lump Coke, D409M-09 Standard Test Method for Grindability of Coal by the Hardgrove-Machine Method, D2639-08 Standard Test Method for Plastic Properties of Coal by the Constant-Torque Gieseler Plastometer, D3682-01-(06) Standard Test Method for Major and Minor Elements in Combustion Residues from Coal Utilization Processes, D2799-05a Standard Test Method for Microscopical Determination of the Maceral Composition of Coal, D2798-06 Standard Test Method for Microscopical Determination of the Vitrinite Reflectance of Coal. USA.

- BARKER, C. E., & PAWLEWICZ, M. J. 1994. Calculation of vitrinite reflectance from thermal histories and peak temperatures: A comparison of methods. En P. K. Mukhopadhyay, & W. G. Dow, Vitrinite reflectance as a maturity parameter: Applications and limitations (págs. 216-219). V. 570: American Chemical Society Symposium Series.
- BAYONA, G., CARDONA, A., JARAMILLO, C., MORA, A., MONTES, C., CABALLERO, V., y otros. 2013. Onset of fault reactivation in the Eastern Cordillera of Colombia and proximal Llanos Basin; response to Caribbean–South American convergence in early Palaeogene time. Geological Society, London, Special Publications, 377.
- BÜRGL, H. 1958. El Jurásico e Infracretácico del río Batá, Boyacá. Servicio Geológico Nacional, Bol. Geol. Bogotá.
- BUSTIN, R. M., BARNES, M. A., & BARNES, W. C. 1990. Determining levels of organic diagenesis in sediments and fossil fuels. En I. A. Mcllreath, & D. W. Morrow, Diagenesis: Geosciences Canada Reprint (págs. 205-226). 4th series: Geological Association of Canada.
- CARBOCOL. 1991. Evaluación Geológica de los carbones en el área comprendida entre Socha y Socotá. Sogamoso.
- CARBOCOL. 1991. Reconocimiento Geológico del área Socotá – Jericó- Boavita. Vicepresidencia Técnica. Dirección de proyectos en desarrollo. Bogotá.
- CARBOCOL – COLCIENCIAS - HIDROGEOMINAS LTDA. 1993. Evaluación geológica de los carbones en el área Socha – Socotá (Boyacá). Paz de Río.
- CASES, M. V., & HENS, A. G. 1988. Técnicas analíticas de separación. Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=WPYYF75dejsC&pgis=1>
- CENSO DANE, 2005. Consultado en <http://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-registros-vitales/censos/censo-2005>.
- CHOU, C. 2012. Sulfur in coals: A review of geochemistry and origins. International Journal of Coal Geology(100), 1 -13.
- DE PORTA DE J. 1974. Lexique Internationale Stratigraphique. Amerique Latine. Vol. V. CNRS. París.
- DIAMOND, W.P. AND LEVINE, J.R. 1981. Direct Method Determination of the Gas Content of Coal: Procedures and Results, Report of Investigations 8515, United States Department of the Interior, Bureau of Mines, Washington, D.C.

- DONELICK, R. O. 2005. Apatite fission-track analysis. En P. a. Reiners, Low Temperature Thermochronology: Techniques, Interpretations. Reviews in Mineralogy and Geochemistry (Vol. 58, págs. 49 - 94). Washington D.C: Mineralogical Society of America.
- DRUMMOND LTD. 2005. "AHORA VAMOS POR GAS Y PETRÓLEO" Consultado en [http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta\\_petrolera108/rev\\_entrevista.htm](http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera108/rev_entrevista.htm)
- ECOCARBON-Colciencias-INGEOMINAS.1993. Características y usos tecnológicos de los carbones Zona Cundinamarca-Boyacá. Bogotá.
- ECOCARBON. Sistema de Clasificación de Recursos y Reservas de Carbón, 1995.
- ECOCARBON. 1996. Programa de Normalización de Recursos y Reservas de Carbón, Área Sogamoso – Jericó. Departamento de Boyacá. Regional N° 1 Nobsa.
- ECOPETROL - ICP. División de producción y exploración. Gas asociado al carbón, marco conceptual. 1997.
- ENCYCLOPEDIA OF CHROMATOGRAPHY (Print). 2001. Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=3Jeu8rMnbyEC&pgis=1>
- ETAYO-SERNA, F., 1964 Posición de las faunas en los depósitos del Cretácico Colombianos y su valor en la subdivisión cronológica de los mismos. UIS. Bol. Geol. Bucaramanga.
- FABRE, A. 1986. Geologie de la Sierra Nevada del Cocuy (Cordillere Orientale de Colombie). Tesis doctorado, Fac. Sciences, U. Geneve. Geneve.
- FUQUEN, J., OSORNO, J., 2005. Geología de la plancha 190-Chiquinquirá. INGEOMINAS. Bogotá.
- FLEISCHER, R. L., PRICE, P. B., & WALKER, R. M. 1975. Nuclear Tracks in Solids. Principles and Applications. Berkeley: University of California Press.
- GARNER, S.H., 1926.- Suggestes nomenclature and correlation of the geological formations of Venezuela. Am. Inst. Min. Metall. Eng. Trans. (London).
- GARZÓN, M. A., IBAÑEZ-PEÑA, R., MONROY, W., & RINCÓN-MESA, M. A. 2008. Recursos Carboníferos área Úmbita – Laguna de Tota. INGEOMINAS. Bogotá.

- GÓMEZ, E. J. 2003. Controls on architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. Geological Society of America Bulletin, 115(2), 131 - 147.
- GUATAME, C., & SARMIENTO, G. 2004. Interpretación del Ambiente Sedimentario de los Carbones de la Formación Guaduas en el Sinclinal Checua-Lenguazaque a partir del análisis petrográfico. Geología Colombiana., 29, 41 - 57.
- HEDBERG, H.D., and SASS, L.C., 1937.-Synopsis of the Geologic Formations of the western part of the Maracaibo Basin. Bol. Geol. Min. Venezuela (Caracas).
- HINCAPIÉ, V. HUGUETT, A. 2003. Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia, Plancha 5-09, Escala 1:500,000, INGEOMINAS, Bogotá.
- HUBACH, E., 1931. Exploración de la región Apulo – San Antonio-Viotá. Bol. Min. Petr. Bogotá.
- HUBACH, E., 1945. La región de Panga Panga, al noreste de Choachí (Cundinamarca). Comp. Est. Geol. Ofic. Col. Bogotá.
- HUBACH, E., 1957a. Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores. Bol. Geol. Bogotá.
- HUNT, J. 1996. Petroleum Geochemistry and Geology (2 ed.). New York: W.H. Freeman and Co.
- INGEOMINAS. 1981. Geología del Cuadrángulo I – 13 Málaga. Geología Plancha 152 Soatá. Bogotá.
- INGEOMINAS – ECOCARBÓN - COLCIENCIAS. 1994. Características y usos tecnológicos de los carbones zona Cundinamarca – Boyacá, Santafé de Bogotá.
- INGEOMINAS. 2001. Geología de la Plancha 172 Paz de Río. Bogotá.
- INGEOMINAS. 2004. El Carbón colombiano - recursos, reservas y calidad, Publ, Geol, Esp, INGEOMINAS, Bogotá.
- INGEOMINAS. 2010. El carbón, Muestreo, análisis y clasificación de recursos y reservas, Segunda Edición, Publicaciones Geológicas Especiales Número 30, Bogotá.
- JULIVERT, M. et al.,1968. –Lexique Stratigraphique International, Amerique Latine: Centre NAT. Res. Scient. (París) 5, fasc. 4<sup>a</sup>, Colombie (Premiere partie).

- 
- KANDEL, R. 1964. Methane–tritium system. III. Kinetics of the exchange reaction. *Journal of Chemical Physics*, 41, 2435-2442.
- KETCHAM, R. A. 2005. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry. *Rev. Mineral. Geochemical*, 58(1), 275 - 314.
- LAW, BEN E., RICE, DUDLEY D., FLORES, ROMEO M. 1991. Coalbed gas accumulations in the Paleocene Fort Union Formation, Powder River Basin, Wyoming. *Rocky Mountain Association of Geologists, Coalbed Methane*.
- LITTLEWOOD, A. B. 2013. *Gas Chromatography: Principles, Techniques, and Applications*. Elsevier. Retrieved from <https://books.google.com/books?id=DiYSBQAAQBAJ&pgis=1>
- LÓPEZ, LUIS. FONSECA, J. Determinación del bloque con mejores posibilidades de gas asociado al carbón GAC de la zona carbonífera ubicada al Nor-orienté del municipio de Sogamoso en el departamento de Boyacá. UPTC-Sogamoso. Trabajo de grado. 2003
- MARIÑO, J., 2010. Estudios preliminares del gas asociado al carbón (GAC) en Boyacá. UPTC.
- MARIÑO, J., 2011. GAS ASOCIADO AL CARBÓN (CBM o GMAC) Geología, medición, reservas, CBM y minería, posibilidades en Colombia. En Revisión. UPTC. Tunja.
- MEJÍA-UMAÑA, L.J.; CONVERS-GÓMEZ, C.E. & GONZÁLEZ-CASALLAS, J.F. 2006. Análisis de Microlitotipos en los Carbones de la Formación Guaduas en el Sinclinal de Sueva, Cundinamarca.- *GEOLOGÍA COLOMBIANA*, 31, pp. 11-26, 11 Figs., Bogotá.
- MEJÍA, L. 2014. *El Carbón: origen, atributos, extracción y usos actuales en Colombia*. Bogotá.
- MAYORGA, M., & VARGAS, M. 1995. Caracterización geoquímica y facial de las rocas potencialmente generadoras de hidrocarburos del Cretáceo y Terciario inferior de la Cordillera Oriental y Piedemonte. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA. Resolución 90341 del 27 de marzo de 2014. Por la cual se establecen los requerimientos técnicos y procedimientos para la exploración y explotación de hidrocarburos en yacimientos no convencionales. Bogotá, 2014.
- MORA, A., HORTON, B. K., MESA, A., RUBIANO, KETCHMAN, R. A., PARRA, M., y otros. 2010. Migration of Cenozoic deformation in the Eastern

- 
- Cordillera of Colombia interpreted from fission-track results and structural relationships: Implications for petroleum systems. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin.*, V. 94: 1543 - 1580.
- MORENO, M., & HINCAPIÉ, G. 2010. Estudio de isótopos de carbono ( $\delta^{13}C$ ) y estroncio ( $^{87}Sr/^{86}Sr$ ) en los depósitos cretáceos-terciarios de la Cordillera Oriental. ANH. Manizales-Colombia: Universidad de Caldas.
- NOTESTEIN, F.B., HUBMAN, C.W. and BOWLER, J.W., 1944.- Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America, *Geol. Soc. Amer. Bull.* (Boulder, Colorado).
- OSORNO, J. F. 1994. Estratigrafía y ambientes de depósito de la secuencia regresiva localizada al Noreste de Sogamoso. Tesis grado, U. Caldas. Manizales.
- PARRA, M., MORA, A., JARAMILLO, C., STRECKER, M. R., SOBEL, E. R., QUIROZ, L., y otros. 2009b. Orogenic wedge advance in the northern Andes: Evidence from the Oligocene-Miocene sedimentary record of the Medina Basin, Eastern Cordillera, and Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, V. 121: 780 - 800.
- PARRA, M., MORA, A., JARAMILLO, C., TORRES, V., ZEILINGER, G., & STRECKER, M. 2010. Tectonic controls on Cenozoic foreland basin development in the north-eastern Andes, Colombia. *Basin Research*, V. 22: 874 - 903.
- PARRA, M., MORA, A., SOBEL, E. R., STRECKER, M. R., & GONZÁLEZ, R. 2009a. Episodic orogenic front migration in the northern Andes: Constrains from low-temperature thermochronology in the Eastern Cordillera, Colombia. *Tectonics*, V. 28.
- PEÑA UREÑA M. 2011. "Caracterización de cenizas de algunos carbones colombianos in situ por retrodispersión gamma-gamma". Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Tesis para optar el título de Maestría en química. Bogotá.
- PÉREZ, G. y SALAZAR A. 1978. Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe. U. Nal. Geol. Col. Bogotá.
- QUIRÓS, M. B. 2006. Principios y aplicaciones de la Cromatografía de Gases. Editorial Universidad de Costa Rica. Retrieved from [https://books.google.com/books?id=g3o\\_PUTmr3wC&pgis=1](https://books.google.com/books?id=g3o_PUTmr3wC&pgis=1)

- REDDING, C. 1978. Hydrogen and carbon isotopes in coals and kerogens. En R. Zartman, 4th Int. Conf. Geochronology, Cosmochronology, Isotope Geology. (págs. 78 - 701). Open File Rep.: US Geological Survey.
- RENZONI, G. 1968. Geología del Macizo de Quetame. U. Nal., Geol. Col. Bogotá.
- SACKETT, W. 1978. Carbon and hydrogen isotope effects during thermocatalitic production of hydrocarbons in laboratory simulation experiments. *Geochemical and Cosmochemical Acta.*, 42, 571 - 580.
- SINGH, P. K., SINGH, M., PRACHITI, P., KALPANA, M., MANIKYAMBA, C., LAKSHMINARAYANA, G., y otros. 2012. Petrographic characteristics and carbon isotopic composition of Permian coal: Implications on depositional environment of Sattupalli coalfield, Godavari Valley, India. *International Journal of Coal Geology.*, 34 - 42.
- ROLLINSON, H. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation.* New York: Routledge.
- SWEENEY, J., & BURNHAM. 1990. Evaluation of a Simple Model of Vitrinite Reflectance Based on Chemical Kinetics. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 74(10), 1559-1570.
- SARMIENTO, G. 1992. Palinología de la Formación Guaduas - Estratigrafía y Sistemática. *INGEOMINAS. Bol. Geol.*, 32 (1-3): 45-126. Santafé de Bogotá.
- SARMIENTO, G., 1994. Estratigrafía, palinología y paleoecología de la Formación Guaduas. *Publ. Geol. Esp. N° 20, INGEOMINAS.* Bogotá.
- SMITH, D.M. and WILLIAMS, F.L., 1984. Diffusion Models for Gas Production from Coals: Application of Methane Content Determination; *Fuel*, Volume 63. EU.
- STACH, E.; MACKOWSKY, TH.; TEICHMULLER, M.; TAYLOR, G. H.; CHANDRA, D., TEICHMULLER, R. 1982. *Textbook of coal petrology*, Gebruder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- TAGAMI, T., & O'SULLIVAN, P. 2005. Fundamentals of Fission-Track Thermochronology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, V. 58: 19-47.
- TISSOT, B., & WELTE, D. 1984. *Petroleum Formation and Occurrence: A New Approach to Oil and Gas Exploration* (2 ed.). Heidelberg, Germany.: Springer-Verlag.



---

ULLOA, C. y RODRÍGUEZ, E. 1979a. Geología del Cuadrángulo K-12, Guateque, Boletín Geológico Ingeominas, Vol.22, No1, p. 2-55, Bogotá.

ULLOA, C. Geología del Cuadrángulo J-13, Sogamoso. Ingeominas. Bogotá.

ULLOA, C. y RODRIGUEZ, E. 1991. Memoria explicativa Plancha 190-Chiquinquirá (Departamento de Boyacá). INGEOMINAS. Bogotá.

URIARTE, A. 2003. Historia del clima de la Tierra. País Vasco: Gobierno Vasco.

URIBE, C., PÉREZ, F., 1987. Propuesta de clasificación de los carbones Colombianos. Bol. Geológico. Vol. 28, núm. 1, Bogotá.

VAN DER HAMMEN, TH., 1957. Estratigrafía palinológica de la Sabana de Bogotá (Cordillera Oriental). Bol. Geol. 5. Bogotá.

VAN DER HAMMEN, TH., 1958. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y Tectogénesis de los Andes colombianos. Bol. Geol. Vol. VI Nº 1 – 3. INGEOMINAS. Bogotá.

VARGAS, R.; ARIAS A.; JARAMILLO, L.; TÉLLEZ, N. 1981. Geología del Cuadrángulo H-13 Pamplona, Colombia. Escala 1:100.000 Inst. Nal. Invest. Geol. Min.

WHITICAR, N. 1996. Stable isotope geochemistry of coals, humic kerogens and related natural gases. International Journal of Coal Geology, 32, 191 - 215.

WOOD, GORDON. KEHN, T. 2003. Coal Resource classification System of the U.S. geological Survey. Geological Survey Circular 891.