

**PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA ORGÁNICA Y SU APLICACIÓN EN LA  
ESTRATIGRAFIA DE SECUENCIAS EN LA FORMACIÓN CERRREJÓN,  
GUAJIRA**

**ROSSY MERY LAYTON AVILA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGIA  
Bucaramanga  
2006**

**PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA ORGÁNICA Y SU APLICACIÓN EN LA  
ESTRATIGRAFIA DE SECUENCIAS EN LA FORMACIÓN CERRREJÓN,  
GUAJIRA**

**ROSSY MERY LAYTON AVILA**

**Trabajo de grado para optar el título de: Geóloga**

**DIRECTOR:**

**MARIO GARCIA GONZALEZ**

**M.Sc. y Ph.D. en Geoquímica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGIA**

**Bucaramanga**

**2006**

*Dedicatoria*

*A Dios y a la Virgen por ser la luz en mi camino.  
A mis padres Rossy y Milton quienes con su ejemplo, apoyo y gran amor han  
hecho de mí la mujer que soy.  
A mis hermanitos Yennifer, Milton y Jonathan quienes llenan de alegría mi  
vida y día a día me manifiestan su gran confianza y cariño.  
A Julianita, mi adorada sobrina por sus sonrisas.  
A Jaime Morales, mi angelito y gran amor por estar junto a mí en los  
momentos más difíciles.  
A mis amigas y amigos de la vida...espero tenerlos siempre.*

*Rossy*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Mario García González, director de este proyecto, por sus enseñanzas, apoyo, paciencia y tiempo.

A todos los profesores que conforman la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander, por hacer de mí la profesional que ahora soy. Especialmente a los profesores Mario García, Carlos García y Marco Álvarez por su amistad y consejos, y a mis calificadores Ricardo Mier Umaña y Marco Álvarez por sus sugerencias y tiempo.

Al geólogo German Bayona por proporcionar información valiosa para la realización de este proyecto.

A la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo y a la Corporación Geológica ARES por financiar este trabajo de investigación y por creer en los nuevos investigadores.

A Carbones del Cerrejón LLC por permitir el muestreo de los pozos empleados en este estudio y por su interés.

En especial a Dios y a mis padres, a quienes les debo todo, por que sin su apoyo, sacrificio y gran amor nada de esto hubiera sido posible. Y a mis hermanitos por aportar su granito de arena en la realización de esta meta.

A Jaime Morales Rojas por su amor, apoyo incondicional y gran ayuda en la realización de este proyecto. Finalmente, a todos mis amigos y amigas quienes de una u otra forma hicieron posible el logro de esta meta, especialmente a Carito quien fue de gran ayuda en los inicios de este trabajo.

## RESUMEN

**TÍTULO:** PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA ORGÁNICA Y SU APLICACIÓN A LA ESTRATIGRAFÍA DE SECUENCIAS EN LA FORMACIÓN CERREJÓN, GUAJIRA<sup>1</sup>

**Autor:** ROSSY MERY LAYTON AVILA<sup>\*\*</sup>

**Palabras clave:** Formación Cerrejón, geoquímica orgánica, petrografía del carbón, estratigrafía de secuencias.

Las máximas superficies de inundación (mfs) o regresión (sr) son buenas superficies de correlación a nivel local en una cuenca, por lo tanto su identificación es clave para entender la estratigrafía de dicha cuenca, ya que una mala identificación de ellas puede llevar a correlaciones erróneas y por lo tanto a un mal entendimiento estratigráfico.

Las propiedades petrográficas y geoquímicas orgánicas de un manto de carbón están relacionadas a su ambiente de depositación. De esta manera, cambios en el nivel del mar afectan la preservación o destrucción de la turba. Consecuentemente las características petrográficas y geoquímicas de un manto de carbón con techo marino presentan un incremento gradual, de base a tope, en el contenido de liptinita, desmocolinita, azufre, índice de gelificación y cenizas; entre otros, y una tendencia decreciente desde la base al tope de la reflectancia de vitrinita y contenido de materia volátil.

Mantos de carbón con sedimentos aluviales en el techo presentan una tendencia contraria a mantos con techo marino.

Empleando los criterios descritos anteriormente tres mfs y dos sr fueron identificadas en la Formación Cerrejón. En base a esta interpretación se concluyó que la Formación Cerrejón fue depositada durante dos ciclos de fluctuaciones eustáticas. Además fue demostrado que los mantos de carbón de la Formación Cerrejón presentan características distintivas relacionadas a levantamientos o caídas del nivel base.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado modalidad investigación.

<sup>\*\*</sup> Facultad de ingenierías fisicoquímicas, Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander. Director: Mario García González.

## ABSTRACT

**TITLE:** ORGANIC PETROGRAPHY AND GEOCHEMISTRY AND THEIR APPLICATION TO THE SEQUENCE STRATIGRAPHY OF THE CERREJON FORMATION GUAJIRA, COLOMBIA<sup>2</sup>

**Author:** Rossy Mery Layton Avila<sup>\*\*</sup>

**Key words:** Cerrejon Formation, organic geochemistry, coal petrography, sequence stratigraphy.

Maximum flooding surfaces (mfs) are considered as good correlation horizons at a basin scale, therefore their proper identification is crucial to make correct stratigraphic correlations. Coalbed overlaid by marine shale are associated to mfs and can be used for correlation purposes.

The organic petrography and geochemistry features of a coal seam are related to its depositional environment. More over, changes of the water table level affect the preservation or destruction a peat. Consequently the petrography and organic geochemistry characteristics of a coalbed with marine roof present a gradual increasing content, from bottom to top, of liptinite, desmocollinite, sulfur, gelification index and ashes; among others, and a decreasing trend from bottom to top of vitrinite reflectance, and volatile matter.

Coalbeds with alluvial sediments roof present of the opposite trend of a coalbed with marine roof.

Using the criteria outlined above three mfs and two regressive surfaces (rs) were identified in the Cerrejon Formation. On the basis of this interpretation it was concluded that the Cerrejon Coal-bearing Formation was deposited during two eustatic cycles. Also it was demonstrated that the Cerrejon coalbeds present distinctive features related to rising or falling of the base level.

---

<sup>2</sup> Undergraduate thesis. Research work.

<sup>\*\*</sup> Physical Chemistry Engineering School. Department of Geology. Universidad Industrial de Santander. Thesis Director: Mario García González, Professor.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. PROBLEMA</b> .....	<b>2</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1 OBJETIVO GENERAL:</b> .....	<b>3</b>
<b>1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:</b> .....	<b>3</b>
<b>3. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
<b>4. MARCO GEOLÓGICO</b> .....	<b>11</b>
<b>4.1 Marco estratigráfico regional</b> .....	<b>11</b>
4.1.1 Precámbrico.....	12
4.1.2 Paleozoico .....	12
4.1.2 Triasico-Jurásico .....	12
4.1.3 Cretaceo.....	12
4.1.5 Paleoceno Inferior a Medio .....	14
4.1.6 Eoceno – Oligoceno .....	15
<b>4.2 Marco Estructural</b> .....	<b>17</b>
<b>5. METODOLOGÍA</b> .....	<b>22</b>
<b>5.1 SELECCIÓN DE MUESTRAS</b> .....	<b>22</b>
<b>5.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS</b> .....	<b>22</b>
Preparación de la muestra para análisis proximales.....	23
Preparación de la muestra para petrografía y reflectancia de vitrinita (Secciones Pulidas).....	23
<b>5.3 ANÁLISIS PROXIMALES</b> .....	<b>23</b>
5.3.1 Determinación de las Cenizas en carbón .....	23
5.3.2 Determinación de la humedad en carbón .....	24
5.3.3 Determinación del contenido de materia volátil en carbón .....	24
<b>5.4 DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA</b> .....	<b>24</b>
<b>5.4.1 Reflectancia de vitrinita (Ro)</b> .....	<b>26</b>
<b>5.5 ANÁLISIS GEOQUÍMICOS</b> .....	<b>26</b>
5.5.1 Azufre Total .....	26
<b>6. RESULTADOS</b> .....	<b>27</b>
<b>6.1 ANÁLISIS PROXIMALES</b> .....	<b>27</b>
<b>6.2 ÍNDICE DE HINCHAMIENTO</b> .....	<b>29</b>
<b>6.2 PETROGRAFÍA DEL CARBÓN</b> .....	<b>33</b>
<b>6.3 ANÁLISIS GEOQUÍMICOS</b> .....	<b>42</b>
Contenido de azufre.....	42
<b>7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS</b> .....	<b>45</b>

<b>9. REFERENCIAS.....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO 1. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD EN LA MUESTRA PARA ANÁLISIS DE CARBÓN Y COQUE .....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO 2. DETERMINACIÓN DE LA MATERIA VOLÁTIL EN LAS MUESTRAS DE CARBÓN Y COQUE .....</b>	<b>64</b>
<b>ANEXO 3.DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE HINCHAMIENTO LIBRE DEL CARBÓN .....</b>	<b>66</b>
<b>ANEXO 4. HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA EN VALORES DE REFLECTANCIA DE VITRINITA.....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXO 5. ANÁLISIS GEOQUÍMICOS Y PETROGRÁFICOS EN EL POZO WRV-04752.....</b>	<b>87</b>
<b>ANEXO 6. ANÁLISIS GEOQUÍMICOS Y PETROGRÁFICOS EN EL POZO WRV-04774.....</b>	<b>88</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Grupos macerales y tipos de macerales empleados e identificados en el presente estudio	<b>25</b>
<b>Tabla 2.</b> Análisis proximales de la Formación Cerrejón en el pozo WRV-04752	<b>27</b>
<b>Tabla 3.</b> Análisis proximales de la Formación Cerrejón en el pozo WRV - 04774	<b>28</b>
<b>Tabla 4.</b> Datos de índice de hinchamiento en los mantos de carbón del pozo WRV-04752	<b>29</b>
<b>Tabla 5.</b> Datos de índice de hinchamiento en los mantos de carbón del pozo WRV-04774	<b>31</b>
<b>Tabla 6.</b> Análisis de macerales en el pozo WRV-04752	<b>35</b>
<b>Tabla 7.</b> Análisis de macerales en el pozo WRV-04774	<b>36</b>
<b>Tabla 8.</b> Reflectancia de vitrinita en la Formación Cerrejón del pozo WRV - 04752	<b>39</b>
<b>Tabla 9.</b> Reflectancia de vitrinita en la Formación Cerrejón del pozo WRV – 04774	<b>39</b>
<b>Tabla 10.</b> Límites ASTM de Romax para rangos de carbón	<b>40</b>
<b>Tabla 11.</b> Índice de gelificación en los mantos muestreados del pozo WRV – 04752	<b>41</b>
<b>Tabla 12.</b> Índice de gelificación en los mantos muestreados del pozo WRV – 04774	<b>42</b>
<b>Tabla 13.</b> Porcentaje de azufre en la Formación Cerrejón del pozo WRV – 04752	<b>43</b>
<b>Tabla 14.</b> Porcentaje de azufre en la Formación Cerrejón del pozo WRV – 04774	<b>43</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Diferencias en las propiedades geoquímicas y petrográficas dentro de un manto de carbón formado en ambientes transgresivos y regresivos	<b>7</b>
<b>Figura 2.</b> Marco estratigráfico regional de la Formación Cerrejón	<b>11</b>
<b>Figura 3.</b> Marco geológico regional de la mina de Carbón el Cerrejón LLC	<b>13</b>
<b>Figura 4.</b> Columna estratigrafica generalizada de la Formación Cerrejón y Manantial	<b>16</b>
<b>Figura 5.</b> Máximas superficies de inundación identificadas por Bayota et al (2004) en la Formación Cerrejón	<b>20</b>
<b>Figura 6.</b> Variación en el índice de hinchamiento del pozo WRV-04752	<b>30</b>
<b>Figura 7.</b> Variación en el índice de hinchamiento del pozo WRV-04774	<b>32</b>
<b>Figura 8.</b> Contenido maceral en el pozo WRV-04752	<b>33</b>
<b>Figura 9.</b> Contenido maceral en el pozo WRV-04774	<b>34</b>
<b>Figura 10.</b> Principales maceral encontrados en los mantos muestreados de la formación Cerrejón	<b>37</b>
<b>Figura 11.</b> Reflectancia de vitrinita en la sección muestreada de la formación mantos 45-155	<b>40</b>
<b>Figura 12.</b> Variación en los parámetros geoquímicos en la sección infrayacente a la máxima superficie de inundación número 4 (mfs 4)	<b>46</b>
<b>Figura 13.</b> Variación en los parámetros petrográficos en la sección infrayacente a la máxima superficie de inundación numero 4 (mfs 4)	<b>47</b>
<b>Figura 14.</b> Variación en los parámetros petrográficos en la sección comprendida entre la superficie de inundación numero 7 (mfs 7) y la superficie de regresión 2 (sr 2)	<b>48</b>
<b>Figura 15.</b> Variación en los parámetros geoquímicos en la sección comprendida entre la superficie de inundación numero 7 (mfs 7) y la superficie de regresión 2 (sr 2).	<b>49</b>

- Figura 16.** Variación en los parámetros petrográficos en la sección comprendida entre la superficie de inundación numero 5 (mfs 6) y la superficie de regresión 2 (sr 2) **50**
- Figura 17.** Variación en los parámetros geoquímicos en la sección comprendida entre la superficie de inundación numero 5 (mfs 6) y la superficie de regresión 2 (sr 2) **50**
- Figura 18.** Variación en los parámetros petrográficos en la sección comprendida entre la superficie de inundación numero 6 (mfs 6) y la superficie de inundación numero 5 (mfs 5). **52**
- Figura 19.** Variación en los parámetros geoquímicos en la sección comprendida entre la superficie de inundación numero 6 (mfs 6) y la superficie de inundación numero 5 (mfs 5) **52**
- Figura 20.** Variación en los parámetros petrográficos en la sección comprendida entre la superficie de inundación numero 5 (mfs 5) y la superficie de regresión numero 1 (sr1) **53**
- Figura 21.** Variación en los parámetros geoquímicos en la sección comprendida entre la superficie de inundación numero 5 (mfs 5) y la superficie de regresión numero 1 (sr1) **54**
- Figura 22.** Variación en los parámetros petrográficos en la sección comprendida entre la superficie de inundación numero 4 (mfs 4) y la superficie de regresión numero 1 (sr1) **55**
- Figura 23.** Variación en los parámetros geoquímicos en la sección comprendida entre la superficie de inundación numero 4 (mfs 4) y la superficie de regresión numero 1 (s.r 1) **56**
- Figura 24.** Variación en los parámetros petrográficos en la sección infrayacente a la máxima superficie de inundación numero 4 (mfs 4). Las áreas grises indican los mantos muestreados y los puntos las muestras de cada manto **57**

## INTRODUCCIÓN

La estratigrafía de secuencias es una herramienta útil en el análisis de cuencas, por lo tanto los geólogos del carbón han integrado dicha estratigrafía con la geoquímica y petrografía del carbón para dar un mejor entendimiento a los comportamientos petrográficos y geoquímicos de los mantos de carbón y para fortalecer resultados obtenidos a partir de estratigrafía de secuencias.

Estudios palinológicos, paleontológicos, petrográficos (en arenas) y estratigráficos han planteado distintos ambientes de depositación. Aún así dichos estudios no son suficientes para asegurar un determinado ambiente de depositación debido a la poca correlación entre estos y a la presencia de datos inciertos en la estratigrafía que podrían llevar lugar a errores en los resultados obtenidos en estos estudios, por lo cual se hace necesario utilizar otras herramientas como la geoquímica para esclarecer los datos y tener así un conocimiento más acertado de lo que fueron los ambientes de depositación de la Formación Cerrejón

Bayona *et. al.* (2004) Analizo la estratigrafía de la Formación Cerrejón y la dividió dentro de siete parasecuencias limitadas por superficies de inundación trabajando en los pozos ERV-17954, WRV-04752, WRV-04774 Y PAT-11238; dichas superficies de inundación fueron establecidas únicamente en base a aparición de lutitas sobre espesos mantos de carbón. En el presente estudio se muestra la validez o invalidez de las superficies de inundación presentes en los pozos WRV-04774 y WRV-04752 con la aplicación de la petrografía y geoquímica orgánica a la estratigrafía de secuencias en los mantos de carbón de la Formación Cerrejón, ya que si en realidad dichas superficies de inundación existen los mantos de carbón deben mostrar comportamientos petrográficos y geoquímicos propios de dicho ambiente de depositación.

## 1. PROBLEMA

Las superficies de inundación son buenas superficies de correlación a nivel local, por lo tanto la identificación de dichas superficies en una cuenca son claves para entender su estratigrafía y realizar correlaciones valederas.

En la Formación Cerrejón la estratigrafía está en sus inicios por lo que es pobremente conocida (Montes, C., comunicación escrita) por ello es necesario realizar correlaciones estratigráficas con base en buenas superficies de correlación como lo son las máximas superficies de inundación. Aunque se han planteado diversas superficies de inundación para esta Formación (Bayona et al, 2004) es de gran importancia comprobar por diferentes métodos la veracidad de estas superficies para evitar hacer correlaciones erróneas y por lo tanto llegar a conclusiones equivocadas acerca de los patrones de depositación de la Formación Cerrejón y causar perdidas en minería.

## **2. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL:**

- Identificar límites de las parasecuencias de la Formación Cerrejón empleando métodos geoquímicos y petrográficos y su aplicación a la estratigrafía de secuencias.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Estudiar la variación y tendencias en los principales mantos de carbón de la formación Cerrejón de los siguientes parámetros: 1) Composición maceral y reflectancia de vitrinita, 2) análisis proximales (Materia Volátil, cenizas,) 3) contenido de azufre, 4) Índices de hinchamiento.
- Comparar los resultados obtenidos con respecto al marco estratigráfico establecido por Bayona et al (2004).

### 3. MARCO TEÓRICO

Vail et al (1977, en Alves & Ade, 1996) propusieron una clasificación de secuencias de rocas sedimentarias que se basa en las inconformidades y en los términos de la sísmica (onlap, toplap, downlap y offlap) estableciendo lo que se conoce como estratigrafía sísmica. Van Wagoner et al (1988, en Alves & Ade, 1996) ampliaron estos principios al análisis estratigráfico definiendo la unidad fundamental de la estratigrafía de secuencias, la secuencia, que está delimitada por inconformidades y por sus superficies correlacionables conformes. Cada secuencia puede ser subdividida en *systems tracts* (sistemas de trazas) las cuales a su vez forman un *set* de parasecuencias (parasequences sets), cada parasecuencia puede contener un set de estratos o un estrato; los sets de parasecuencias son los bloques de los cuales esta construida una secuencia.

Van Wagoner et al. (1990, en Holz et al, 2002) establecieron que las superficies de parasecuencias son las mejores superficies para establecer correlaciones locales en tiempo y facies, a partir de registros de pozos y de núcleos. Sin embargo, las superficies de las parasecuencias usualmente no pueden ser correlacionadas fácilmente a escala regional. Por esta razón las superficies de inundación (maximum flooding surfaces) son consideradas superficies con valor cronoestratigraficos que pueden ser empleadas en correlación de secuencias.

A principios de los 80 los geólogos del carbón tenían una serie de preguntas que no podían ser respondidas con la estratigrafía tradicional de esa época o litoestratigrafía. Un intento para explicar los ciclos del carbón fue el concepto de cyclothem de North american school of stratigraphers (e.g. Weller, 1930, Moore 1964 en en Alves & Ade, 1996), siendo popular hasta pasados los 60s. El concepto de cyclothem basado sobre la suposición de un simple ciclo transgresivo

– regresivo formado por una estructura de facies con 10 unidades rocosas en estratos de carbón. Las posiciones de estas unidades dentro del ciclotema fue determinado por el estado prevalente de regresión o trasgresión marina; pero este concepto fue muy rígido. Aunque este concepto intentó cuantificar y predecir las sucesiones de facies en las que estaba involucrada la formación de carbones no fue lo suficientemente práctico para los geólogos del carbón, quienes necesitaban respuestas a preguntas como las siguientes:

- ¿Porque los mantos de carbón ocurren en un nivel particular dentro de una sucesión rocosa?
- ¿Cuales son las condiciones de tope y base de los mantos estudiados?
- ¿Porque los mantos de carbón se pinchan o se subdividen en cierta dirección?
- ¿Como la litología de las subdivisiones y el tope de la roca varía localmente o dentro de la cuenca?
- ¿Porque las propiedades químicas y petrográficas de los carbones no son constantes dentro del mismo manto y como ellas varían?

Algunas de estas preguntas pueden ser respondidas obviamente sin estratigrafía de secuencias, solo por el control del sistema depositacional. Sin embargo, la pregunta más importante – como los mantos de carbón están posicionados dentro de la sucesión y como varían sus propiedades vertical y horizontalmente? – es solo respondida con el estudio integrado de la petrografía y la geoquímica de mantos de carbón en un marco de estratigrafía de secuencias. Este concepto fue entendido y aplicado en los comienzos de los 80 cuando los investigadores (Diessel y otros) del carbón comienzan a entender que los procesos sedimentarios de la cuenca también juegan un papel importante en el control de la formación y distribución regional de mantos de carbón.

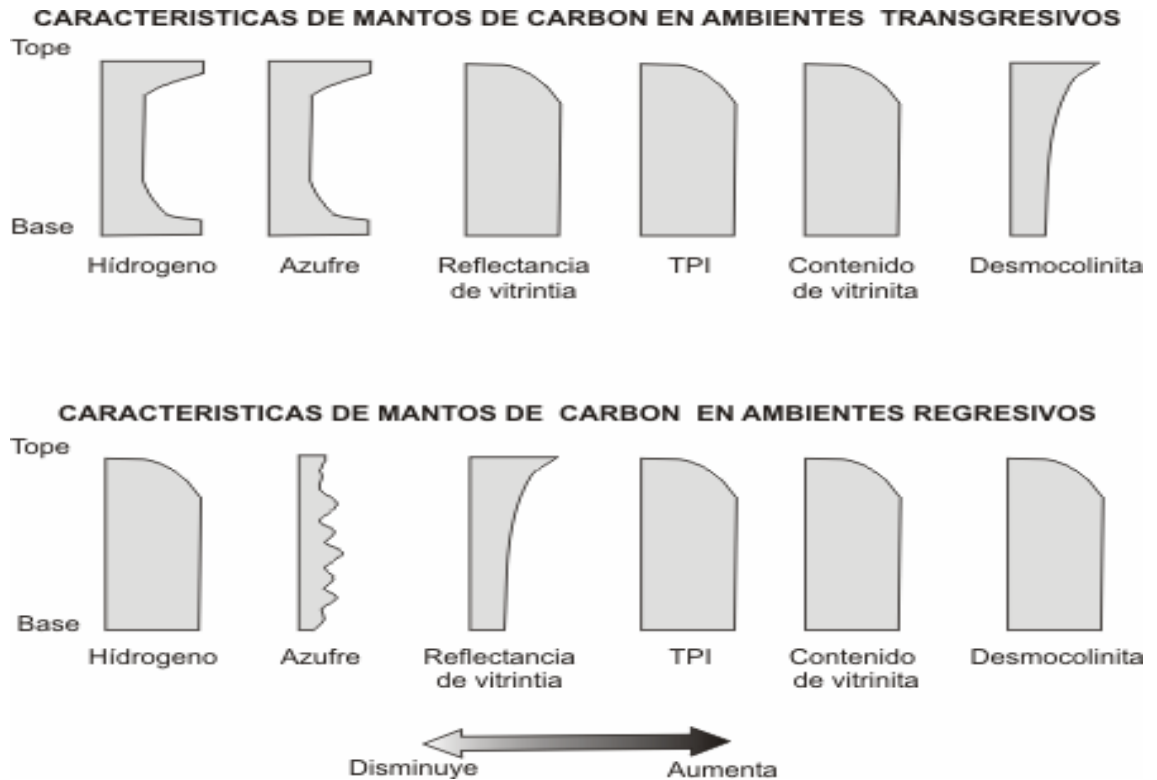
Shearer et al. (1994, en Holz et al, 2002) planteó que los mantos de carbón no son límites de secuencias genéticas. El principal argumento es que los mantos de carbón no son frecuentemente simples, ya que corresponden a cuerpos multi-

episódicos, consecuentemente no representan una simple superficie y no pueden tomarse como una superficie máxima de inundación (msf). Sin embargo, esto no invalida el uso de superficies de inundación para estudio de mantos de carbón. Pashin (2000) uso ciclos depositacionales limitados por superficies de inundación para hacer modelos tridimensionales del espacio de acomodamiento. Diessel et al (1992) también uso superficies de inundación para identificar tendencias de acomodación en los mantos de carbón, incluyendo superficies no marinas correlacionables con superficies marinas. Mas recientemente, autores como Holz et, al (2002) y Davies et al (2005) han usado también superficies de inundación para la correlación de mantos de carbón. Esto muestra que los estratigrafos de secuencias trabajaron con coal-bearing strata repitiendo la metodología paradójica de sus colegas, para otras ramas de estratigrafía de secuencias; aunque la secuencia depositacional esta definida y limitada por algún tipo de inconformidad regional, la principal herramienta conceptual para correlación y estudio de los mantos de carbón son las superficies de inundación. Lo anterior es valido para el estudio de secuencias de carbón de ambientes paralicos influenciados por los ascensos y descensos del nivel del nivel del mar, como es discutido en Bohacs & Suter (1997) como es el caso de la Formación Cerrejón.

### **Características geoquímicas y petrográficas de los mantos de carbón de acuerdo a su posición estratigráfica**

Los mantos de carbón muestran variaciones petrográficas, y geoquímicas dependiendo del ambiente en el cual se han formado, estas características pueden observarse de base a tope del mismo manto y de manto a manto en una secuencia estratigráfica. Las características petrográficas y geoquímicas de mantos de carbón formados en ambientes depositacionales transgresivos y regresivos han sido estudiadas por diferentes autores (Diessel, 1992, 1998, Diessel et al., 2000b; Banerjee et al., 1996; Petersen and Andsbjerg, 1996;

Petersen et al., 1998; Holz et al., 1999, entre otros). De acuerdo a estos estudios, parámetros petrográficos tales como contenido y tipo de vitrinita, reflectancia de



**Figura 1.** Diferencias en las propiedades químicas y petrográficas dentro de un manto de carbón formado en ambientes transgresivos y regresivos. Modificado de Holz et al., 2002.

vitritina, propiedades de fluorescencia, e índice de gelificación (GI) y otros parámetros petrográficos frecuentemente muestran variaciones significantes de base a techo de los mantos como es mostrado en la figura 1 y pueden ser relacionados al régimen depositacional (transgresivo vs. regresivo) bajo los cuales la turba precursora se acumuló. La naturaleza transgresiva – regresiva de los mantos de carbón es también reflejada por propiedades químicas tales con contenido de hidrogeno y sulfuros (Diessel, 1992; García, 2004; entre otros) y por variaciones en ensamblajes de palinomorfos (Banerjee et al., 1996). Diessel (1992) reportó, además, un incremento hacia el tope de los mantos en el

contenido de cenizas para carbones transgresivos acompañado de un incremento en la materia mineral (cuarzo, pirita y arcilla).

Diversos autores (e.g. Diessel, 1992; Holz, 2002; Marquez, 2002 y García, 2004) concuerdan en que un aumento en el nivel del mar genera un incremento en el pH de pantanos y lagoons cerca de la condición neutral favoreciendo la preservación de los macerales desmocolinita y liptinita de base a techo del manto. Diessel (1992) además, plantea que esta proporción puede disminuir debido a la corrosión química, la cual se cree que ocurre cuando el pH del agua de la turba es levantado por encima de su punto neutral, por ejemplo durante un contacto prolongado con el agua alcalina del mar.

El contenido de inertinita principalmente fusinita es también un parámetro ya que según Diessel (1992), Alves, R y Ades, M (1996) y Holz et. al (2002), un aumento en el contenido de inertinitas de base a tope del manto indica condiciones más secas, y más húmedas cuando este contenido disminuye en la misma dirección.

El fenómeno de reducción en la reflectancia de la vitrinita de base a tope del manto ha sido observada en muchos mantos de carbón con influencia marina (Diessel, 1992, Diessel et al., 2000b; Banerjee et al., 1995) y ha sido atribuido a que el agua alcalina del mar percola dentro de las partes superiores y basales de las turbas precursoras, neutralizando los ácidos orgánicos, los cuales promueven un incremento en la actividad de bacterias anaeróbicas (Diessel, 1992). Los productos desechados de estas bacterias se cree que son incorporados en la estructura molecular de la vitrinita, incrementando el contenido de hidrogeno y consecuentemente reduciendo la reflectancia de vitrinita.

De acuerdo con Diessel (1992) el incremento en los valores de sulfuros en las zonas superiores y basales de los pantanos salobres está directamente

relacionada con la conexión de estos pantanos con el agua marina. Los cationes de sulfato son empleados por las bacterias para la oxidación de la materia orgánica lo cual se traduce en la reducción de  $\text{SO}_4$  en  $\text{H}_2\text{S}$  el cual a su vez reacciona con el hierro formando pirita (Drever, 1989). En consecuencia el contenido de azufre y consecuentemente de pirita hacia el tope de los mantos es un indicador del aumento en el espacio de acomodación y por lo tanto de una subida del nivel base y de la misma manera es un indicador geoquímico de las superficies máximas de inundación.

El índice de gelificación en los carbones es un indicador de la humedad relativa en las condiciones de formación de turba (Marques, 2002) o una medida de condiciones húmedas o secas (altura del nivel freático) debido a que la gelificación requiere la continua presencia de humedad (Diessel, 1992; Diessel 1989 en Markic & Sachsenhofer, 1997). Este índice ha sido usado por diversos autores (e.g. Alves y Ade, 1996; Buillit et al, 2002; Holz et. al, 2002; Marques, 2002; Singh & Shukla, 2004; Silva, & Kalkreuth, 2005; Misiak, 2006 (manuscrito en imprenta)); los cuales lo han empleado como una herramienta para determinar facies de carbón (junto con el TPI) y para identificar superficies de inundación. El índice de gelificación empleado en este estudio fue calculado por la formula presentada por Marques (2002):

$$GI = \frac{\text{vitrinita total}}{\text{inertinita total}(\text{sin micrinita})}$$

Como se muestra en la figura 1 parámetros como el TPI y el contenido de vitrinita no muestran una diferencia marcada para carbones transgresivos o regresivos; por tal motivo estos criterios no son empleados en el presente estudio.

García – González (2004) observó que las tendencias en las características petrográficas y geoquímicas de los carbones con techo marino mencionadas anteriormente son dadas también de manto a manto hasta llegar a superficies de

máxima inundación o regresión, por tanto la variación de los parámetros mencionado de manto a manto también serán empleados en el presente estudio.

## 4. MARCO GEOLÓGICO

La Formación Cerrejón aflora en el Departamento de La Guajira, en la parte norte de la cuenca del Cesar-Ranchería (11° 1' N; 72° 45' W). La mina de carbones Cerrejón esta localizada en el Valle del Río Ranchería y es limitada al norte por la falla de la Oca, al occidente por el macizo de la Sierra Nevada de Santa Marta, al oriente por el sistema de fallas inversas del Perijá que separa esta cuenca de la Serranía del Perijá (Figura 3A).

### 4.1 Marco estratigráfico regional

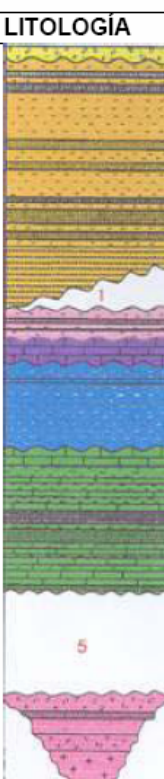
		LITOLOGIA	FORMACIÓN	AMBIENTE		
<b>CUATERNARIO</b>			Aluvión	Continental	CUENCA FORELAND	
TERCIARIO	PLIOCENO					Continental
	MIOCENO					Marino Somero
						Fluvio deltáico/Marino Marginal
	OLIGOCENO		Palmito			Fluvial trenzado
			Tabaco		Fluvio deltáico/Marino marginal	
	PALEOCENO					
CRETÁCICO	MAESTRICHTIANO			Cerrejón	Fluvio deltáico/Marino marginal	CUENCA MARGINAL
	CAMPANIANO			Manantial Hato nuevo		
	SANTONIANO			Molino	Marino	
	CONIACIANO		La Luna	Marino Restringido		
	HURONIANO					
	CENOMANIANO					
	ALBIANO		Aguas Blancas	Gp. Cogollo	Marino somero	
			Lagunitas			
			Río Negro		Fluvial	
JURASICO	TITONIANO				BACK-ARC	
	KIMMERIDGIANO		La Quinta	Continental		
	OXFORDIANO					

Figura 2. Marco estratigráfico regional de la Formación Cerrejón.

#### **4.1.1 Precámbrico**

##### **Terreno Granulítico de Los Mangos**

Según Van der Merwe (1999, en Quintero & Candela 2004) consta principalmente de neises cuarzo – feldespáticos y hornblendo biotíticos bandeados, de colores tanto claros como oscuros, granulitas cuarzo-pertíticas y granulitas granatíferas.

#### **4.1.2 Paleozoico**

De acuerdo a Van der Merwe (1999, en Quintero & Candela 2004) en esta región el paleozoico medio a superior está representado por areniscas ferruginosas de grano fino, arcosas y lodolitas rojas y negras con estratificación gradacional, laminación flaser y ondulosa y capas ricas en carbón que contienen fósiles de braquiópodos y crinoides. Hacia el tope de esta secuencia se encuentran capas de caliza y de arcosas rojas, con fósiles de braquiópodos típicamente globulares.

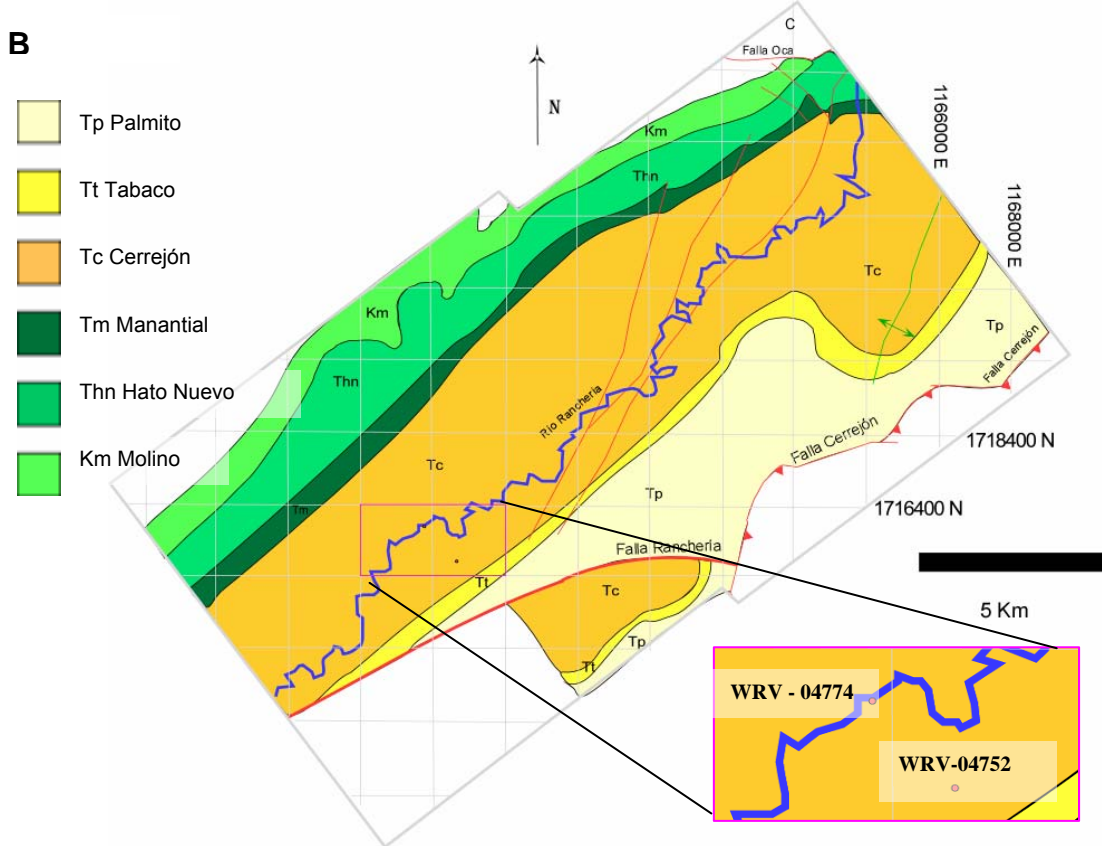
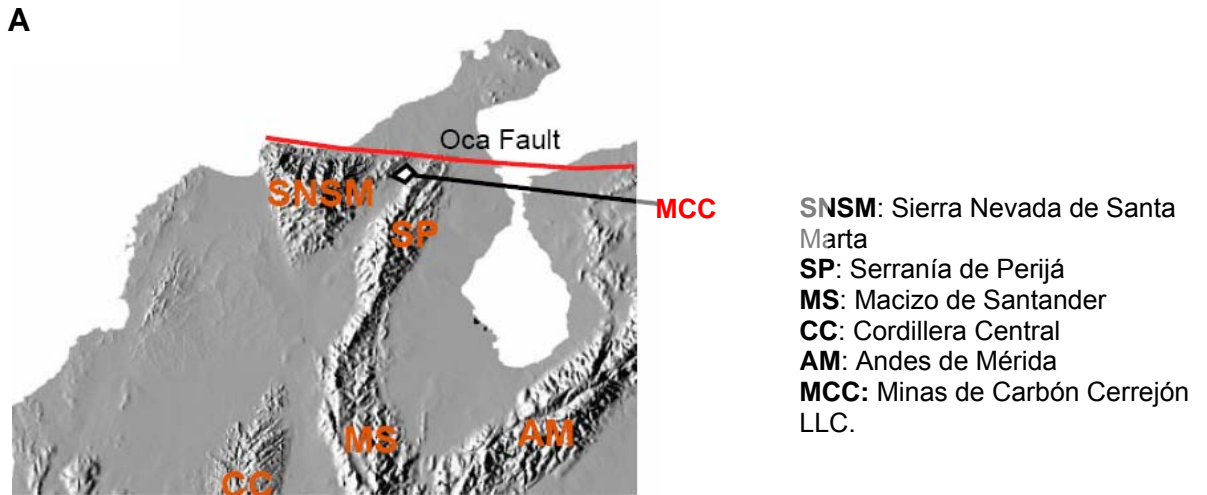
#### **4.1.2 Triásico-Jurásico**

##### **Formación la Quinta**

Definida por Radelli (1962c, en Julivert, 1968) como una secuencia continental o sub-continental predominantemente detrítica, con la presencia de material de origen volcánico (ver figura 2).

#### **4.1.3 Cretáceo**

Como es mostrado en la figura 1, el Cretáceo está representado en esta región por las siguientes Formaciones descritas en orden cronológico (de base a techo): *Formación Rionegro* la cual según Hedberg & Sass (1937, en Julivert 1968) esta compuesta por areniscas arcosas y de grano grueso con algunas capas de conglomerados y de lodolitas interestratificadas. El espesor es de 400 m.



**Figura 3.** A. Marco Geológico Regional de las Minas de Carbón Cerrejón. B. Mapa Geológico de las Minas de Carbón Cerrejón LLC y ubicación de los pozos WRV 04752 y WRV-0774, empleados en este trabajo. Modificado de Bayona et al, 2004.

*Formación Lagunitas* identificada por Van der Merwe (1999, en Quintero & Candela 2004) como una alternancia de aproximadamente 450 m de espesor de calizas micríticas grises de 10 a 15 m, calco-arenitas de grano fino de 3 m y capas de caliza micrita fosilífera de color café de 10 a 40 m.

*Formación Aguablanca* definida por Van der Merwe (1990, en Quintero & Candela 2004) como una alternancia de capas de caliza micrítica de color gris a café y calizas fosilíferas, en paquetes de hasta 5 m, que descansan en conformidad sobre la Formación Lagunitas con una edad Aptiano inferior asignada por Petters (1954b, en Julivert 1968); *Formación la Luna* constituida según Van der Merwe (1999, en Quintero & Candela 2004) por intercalaciones de lodolitas calcáreas negras con areniscas de grano fino y areniscas subarcósicas de color gris a café con nódulos de chert de 3 a 10 m de diámetro y con un espesor de algo menos de 100m (Julivert, 1968).

*Formación Molino* definida por Van der Merwe (1999, en Quintero & Candela 2004) como una secuencia clástica de grano fino constituida por limolitas calcáreas gris verdosas, interestratificadas con areniscas de grano fino ricas en arcillas, shales grises y delgadas capas de calizas y lodolitas calcáreas; con un espesor total de 500m.

#### **4.1.5 Paleoceno Inferior a Medio**

##### **Formación Hato Nuevo**

Renz (1960, en de Porta, 1974) la definió como una secuencia de arenisca micácea, marrón, maciza, en parte ferruginosa, cubierta por capas delgadas de caliza. Su espesor es de 100m y descansa en contacto transicional sobre la Formación Molino.

### **Formación Manantial**

Según Van der Merwe (1999, en Quintero & Candela 2004) es una secuencia de calizas claras a oscuras ricas en conchas de ostras. Hacia la parte superior presenta una alternancia de lodolitas micáceas finamente laminadas y arcillolitas con calizas lodosas de color gris verdoso y tiene un espesor de 300 a 350 m. Su contacto inferior y superior es transicional con las Formaciones de Hato Nuevo y Cerrejón (ver figura 3).

### **Formación Cerrejón**

Según Duran, et al (1981, en Quintero & Candela 2004) esta compuesta por areniscas grises a pardo amarillentas, algunas veces calcáreas, interestratificadas con lodolitas grises y carbonosas que contienen de 30 a 40 mantos de carbón. Arboleda (1987, en Quintero & Candela 2004) señala que tiene un espesor promedio de 900 m y se ha definido de edad paleoceno. Esta Formación está suprayacida discordantemente por las Formaciones Tabaco y Palmito (figura 3).

## **4.1.6 Eoceno – Oligoceno**

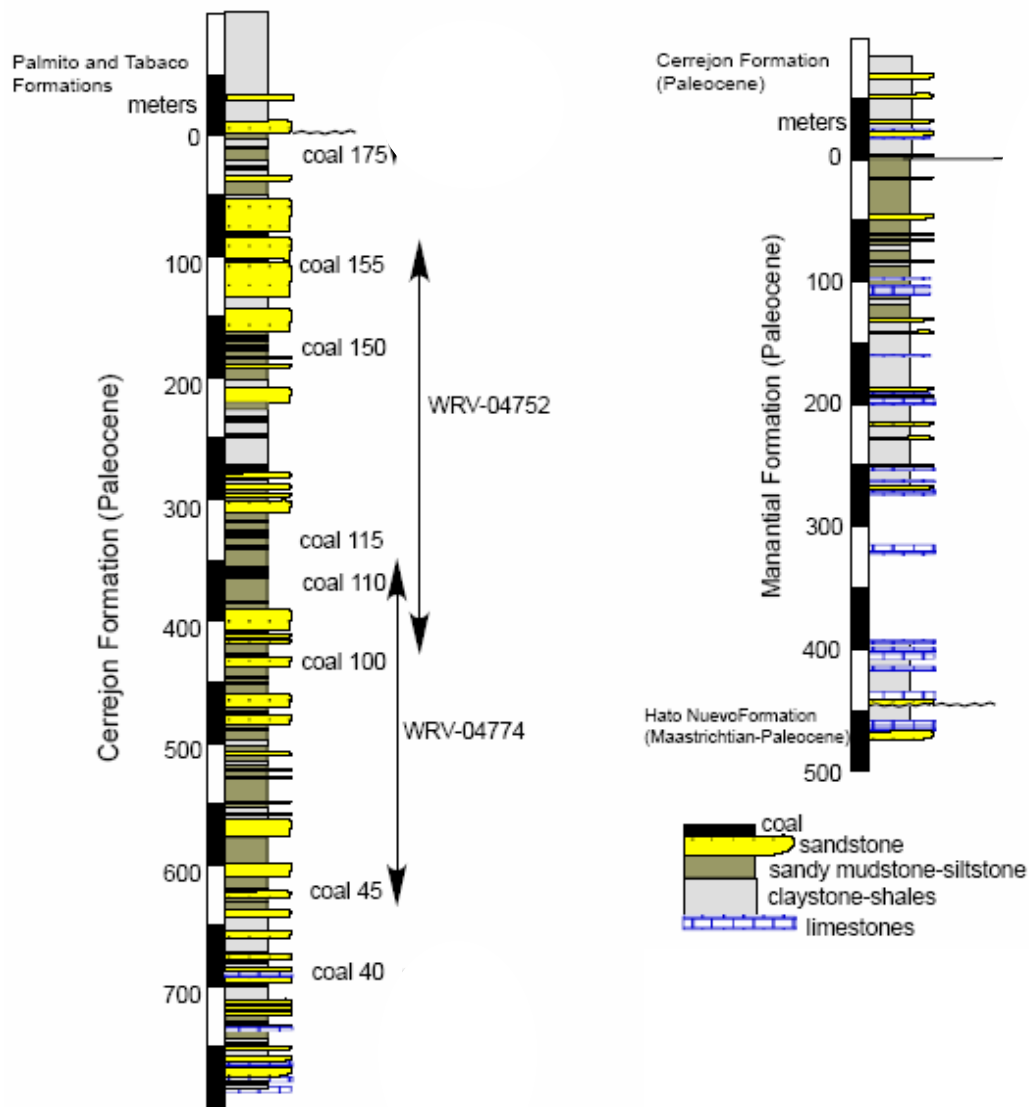
### **Formación Tabaco**

Tschanz (1969, en de Porta, 1974) la describe de forma general como constituida por areniscas y arcillolitas y le asigna una edad de Eoceno Superior. De acuerdo a Van der Merwe (1999, en Quintero & Candela 2004) en la región del Cerrejón aparece como una secuencia de rocas clásticas de grano grueso con estratificación cruzada. Su espesor estimado es de 120m y descansa en un contacto disconforme sobre la Formación Cerrejón (Ramos, 1990 en Bayona et al., 2004) como es mostrado en la figura 3.

### **Formación Palmito**

Van der Merwe (1999) la define en la región Cerrejón como una unidad clástica de grano fino. La base está marcada por areniscas arcillosas de grano fino a medio y

la parte superior esta conformada por areniscas arcillosas y lodolitas, alternando con areniscas lodosas – calcáreas. Esta Formación es claramente continental y tiene un espesor de 300m (Ramos, 1990 en Bayona et al., 2004). Los depósitos recientes corresponden a depósitos aluviales del Río Ranchería.



**Figura 4.** Columna estratigráfica generalizada de la Formación Manantial (modificado de Haight, et al, 1944) y Formación Cerrejón (modificado de carbones del Cerrejón, 2003 y Ramón 1990). Modificado de Bayona, et al, 2004. Las flechas muestran los pozos utilizados en este estudio (manto 45 a manto 155).

## 4.2 Marco Estructural

El campo carbonífero del Cerrejón es un depósito estructuralmente complejo localizado dentro del cinturón de Cabalgamiento del Cerrejón – ranchería (ver figura 2) y esta dominado por los rasgos asociados a ellos que forman parte de los efectos de la orogenia andina en la Zona Norte de Suramérica. (Van der Merwe, 1999 en Quintero, J & Candela, S., 2004).

Según Van der Merwe (1999, en Quintero, J & Candela, S., 2004) La geometría de los cabalgamientos se define por una cuña triangular de escala continental. Dicha cuña tiene su ápice en Santa Marta esta limitada al norte por la Falla de Oca con movimiento dextral y de rumbo E-W aproximadamente, y hacia el sur por la falla Bucaramanga – Santa Marta con movimiento sinextral y fue transportada hacia el NW a lo largo de un “*deep – seated detachment*”. Además de estos rasgos mayores se encuentran fallas transversales menores, como es mostrado en la figura 3.

El sinclinorio de edad Terciaria con flancos Cretácicos, es la estructura de tipo dúctil dominante, enmarcada por algunos de los rasgos estructurales de carácter frágil ya mencionados. Dentro del él se han determinado varios subpliegues entre los cuales están los sinclinales de Sarahita y Tabaco y los Anticlinales de Papayal y Cerrejón (Duran et al., 1981 en Quintero y Candela 2004).

## 4.3 Estratigrafía de la Formación Cerrejón

Con base en las columnas estratigráficas realizadas por Bayona et al. (2004) se agruparon los estratos de acuerdo a patrones de estacamiento, los cuales son descritos a continuación: **Paquete 1**. Ubicado en la base de la Formación, el cual tiene un espesor de aproximadamente 80 m y esta compuesto de mudstone con

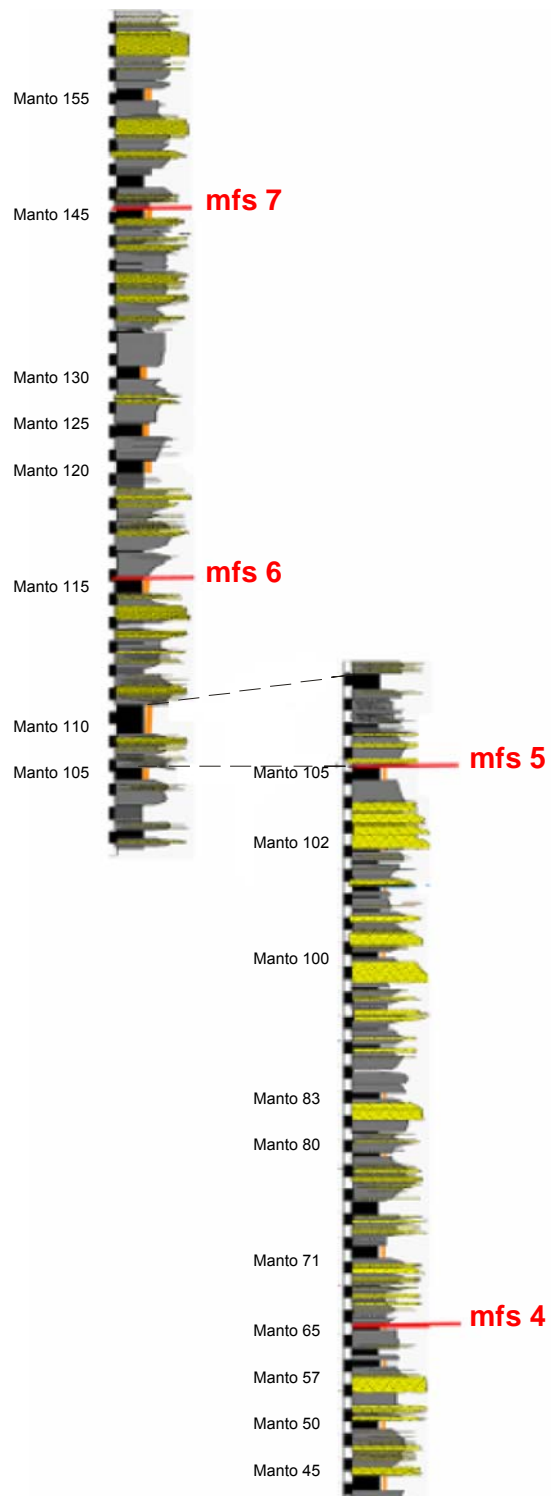
delgadas intercalaciones de areniscas. **Paquete 2.** Consiste de un intervalo de aproximadamente 70 m de espesor en el cual afloran los mantos 30, 40, 45 y 50 todos ellos suprayacidos por capas de areniscas, en este intervalo de la Formación también afloran mudstones los cuales van aumentando de espesor hacia el tope. **Paquete 3.** Con un espesor de 120 metros en donde afloran los mantos 57, 60, 65, 71, 75 y 80. Este paquete es predominantemente arcilloso con delgadas intercalaciones de areniscas. **Paquete 4.** De un espesor de 110 metros en el cual aumenta el espesor las capas de areniscas con respecto al anterior paquete, así mismo, disminuye el número y espesor de los mantos de carbón, los cuales son 83, 85, 100, 101, 102 y 103. **Paquete 5.** Este intervalo tiene 75 m de espesor aproximadamente, se inicia con la presencia de un banco de areniscas de 30 m de espesor el cual suprayace el manto 103 B y es seguido por la presencia de una paquete de arcillolitas en donde afloran dos gruesos mantos con espesores superiores a los 10 m, correspondientes a los mantos 105 y 110. **Paquete 6.** Se observan 55 m principalmente de lodolitas y areniscas con delgadas intercalaciones de carbón. **Paquete 7.** Consiste de 185 m, con predominancia de lutitas con intercalaciones de areniscas de carácter granocreciente, las cuales van aumento su frecuencia de base a techo del paquete, los mantos aflorantes van del 115 al 150. **Paquete 8.** Con 45 m, en el cual las areniscas aumentan de espesor hacia el tope y aflora el manto 155. **Paquete 9.** El tope de la Formación esta compuesto de un paquete principalmente lutítico con delgadas intercalaciones de areniscas donde aflora el manto 175.

Los estudios de Bayona et al, (2004) postulan nueve superficies máximas de inundación (mfs) distribuidas en las Formaciones Manantial, Cerrejón y Palmito. Estas superficies de inundación fueron identificadas por la aparición de *black shales* sobre espesos mantos de carbón. Bayona et al (2004) plantean que los nueve eventos de inundación y / o la tendencia a profundizar de los ambientes depositacionales causan un incremento abrupto en la relación de espacio de

acomodación/suministro de sedimento, y éstas son indicadas como superficies de correlación. Además, interpreta que los mantos de carbón son mas espesos cerca de estas superficies estratigráficas, y llegan a ser mas delgados cuando la relación de espacio de acomodación / suministro de sedimento decrece. Lo anteriormente mencionado corresponde al único criterio empleado en determinar las superficies de inundación, ya que en el estudio no se tiene una discusión detallada de cómo fueron ubicadas dichas superficies.

Como se muestra en la figura 5, de las nueve superficies máximas de inundación identificadas por Bayota et al, (2004) cuatro se encuentran en los pozos muestreados en el presente estudio. En el pozo WRV-04774 las superficies de inundación están ubicadas como sigue (de base a techo): la superficie de inundación número cuatro se encuentra en el tope del manto 65 y la superficie de inundación número cinco en el tope del manto 105. En el pozo WRV-04752 estas superficies están dispuestas de la siguiente manera, en orden cronológico: la superficie de inundación número cinco en el tope del manto 105 número, superficie de inundación la número seis en el tope del manto 115, y superficie de inundación número siete ubicada en el tope del manto 145.

Bayona et al, (2004) determinaron un patrón dominante de depositación para 1 Km. de espesor del Paleoceno Superior como agradacional a levemente progradacional, el cual documentaron por: (1) cambio gradual en marcos depositacionales desde una mezcla de plataforma marina somera en la Formación Manantial (parte superior) a mareal y llanuras costeras en las Formaciones Cerrejón y Palmito; (2) La programación y tendencia granocreciente hacia el tope de los estratos entre superficies estratigráficas de correlación, 3. El incremento gradual del tamaño de grano entre las areniscas de la Formación Cerrejón superior y Palmito inferior como resultado de la progradación de sistemas depositacionales.



**Figura 5.** Máximas superficies de inundación (mfs, líneas rojas) identificadas por Bayona et al (2004) en la Formación Cerrejón, pozos WRV-04752 (superior) y WRV-04774 (inferior). Los mantos muestreados están indicados por la línea naranja. Modificado de Bayota et al (2004).

El espesor de >1.Km. de la sucesión del Paleoceno Superior, el patrón agradacional de depositación y la composición de las areniscas soportan la interpretación de una depositación sinorogénica con respuesta del (uplift) levantamiento inicial de la Sierra Nevada de Santa Marta durante el paleoceno tardío (Bayona et. al, 2004).

## **5. METODOLOGÍA**

### **5.1 SELECCIÓN DE MUESTRAS**

Para la realización de este proyecto de investigación fueron analizadas muestras de carbón tomadas de núcleos de dos pozos perforados en el Cerrejón. Estos pozos son: Pozo WRV-04752 en donde se presentan los mantos 103 a 155 según la nomenclatura de la empresa Cerrejón LLC con coordenadas 1152618 E, 1714524 N); y el Pozo WRV-04774 en donde se presentan los mantos de carbón 45 a 110 con coordenadas 1151689 E, 1715562 N (ver figura 5).

El muestreo de los mantos de carbón se efectuó teniendo en cuenta su posición estratigráfica a fin de muestrear la mayoría de la secuencia del Cerrejón, para esto se tuvo en cuenta el estudio estratigráfico de Bayona et al (2004).

En los dos pozos anteriormente mencionados se muestrearon todos los mantos de carbón excluyéndose únicamente delgadas intercalaciones de carbón. En cada manto seleccionado se tomaron de dos a tres muestras de base a techo, dependiendo del espesor del mismo. En total se tomaron 53 muestras de carbón correspondientes a los siguientes mantos: 45, 50, 57, 65, 71, 80, 83, 100, 102, 103, 103B y 105 para el pozo WRV-04774 y mantos 105, 110, 114, 115, 120, 125, 130, 145 y 155 para el pozo WRV-04752.

### **5.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS**

De las muestras tomadas se conservó la mitad de cada una de ellas como testigo y la otra mitad fue preparada para realizar análisis proximales y de petrografía.

### **Preparación de la muestra para análisis proximales**

Para la realización de los análisis proximales el carbón se trituró en un mortero de acero y se pasó por tamiz 120, obteniéndose aproximadamente 10 g por muestra.

### **Preparación de la muestra para petrografía y reflectancia de vitrinita (Secciones Pulidas)**

El carbón ya triturado, se pasó por los tamices 20 y 30, y se tomaron aproximadamente 10 g retenidos en la malla 30. Con la muestra tamizada, se llenaron las copas (moldes) con un tercio de la muestra y dos tercios de resina epóxica (1:4). Después de 24 horas se desmoldaron y fueron pulidas empleando una pulidora automática Wurtz.

## **5.3 ANÁLISIS PROXIMALES**

Los análisis proximales fueron diseñados específicamente para caracterizar los rangos del carbón, sin embargo, sus resultados pueden ser empleados para evaluar el grado de madurez termal de los carbones. Por otra parte, variaciones en el contenido de materia volátil y de cenizas se pueden asociar a cambios en su medio de depositación.

### **5.3.1 Determinación de las Cenizas en carbón**

El contenido de ceniza representa la cantidad de impurezas en la muestra y el carbón efectivo disponible, con el cual podemos determinar la calidad del carbón, siendo el 12% el límite máximo permitido en carbones de buena calidad. El porcentaje de cenizas fue hallado según lo planteado por la norma ASTM D 3174 – 73.

### **5.3.2 Determinación de la humedad en carbón**

El objetivo de la prueba de humedad es eliminar el agua (H<sub>2</sub>O) presente en la muestra secándola a una temperatura de 110 °C. El porcentaje de humedad fue hallado según lo planteado por la norma ASTM D 3173 – 73 (ver anexo 1).

### **5.3.3 Determinación del contenido de materia volátil en carbón**

La materia volátil ayuda a identificar el grado de carbonificación de los carbones, el rango coquizable y es un indicativo del grado de madurez termal de los mismos. El contenido de materia volátil fue hallado según lo planteado por la norma ISO 562 – 74. (Ver anexo 2)

### **5.3.4 Determinación del Índice de hinchamiento en carbón**

El índice de hinchamiento permite conocer el grado de coquización de los carbones, éste depende del contenido materia volátil, liptinitas y del grado de madurez del carbón. Para este estudio también se evaluó su variación en la sección estratigráfica. El índice de hinchamiento fue hallado por el método descrito en la norma ASTM D 720-67 (Ver anexo 3).

## **5.4 DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA**

Los estudios petrográficos fueron elaborados con un microscopio de luz reflejada Zeiss Modelo MPM400 usando luz blanca y azul ( $\lambda = 546 \text{ nm}$ ), y objetivos de inmersión en aceite sobre secciones pulidas de carbones a 20X. Las descripciones petrográficas comprenden identificación de macerales y conteo de puntos.

El análisis de macerales consiste en identificar y cuantificar los diferentes tipos de macerales del carbón mediante el conteo de puntos. En el conteo de macerales se

emplearon 200 puntos en total los cuales cubrieron toda la superficie de la sección pulida. El objetivo del conteo es identificar los porcentajes de los tres grupos de macerales presentes en las muestras de carbón; indicados en la tabla 1.

**Tabla 1.** Grupos de macerales y tipos de macerales empleados e identificados en la presente investigación.

<b>Grupo maceral</b>	<b>Tipo de maceral</b>
Vitrinita	Desmocolinita
	Telinita
	Pseudovitrinita
Liptinita	Esporinita
	Cutinita
	Resinita
	Alginita
	Pirobitumen
Inertinita	Fusinita
	Semifusinita
	Micrinita
	Esclerotinita
Materia mineral	Cuarzo
	Pirita
	Arcilla

La caracterización petrográfica de carbones a diferentes profundidades suministra información sobre la evolución de la composición maceral como del rango o estado de madurez del carbón. La manera como el porcentaje de macerales va variando en un manto de carbón a través de la sección estratigráfica en los respectivos mantos de carbón es de gran importancia, ya que esto brinda información acerca del ambiente bajo los cuales se depositaron dichos mantos.

#### **5.4.1 Reflectancia de vitrinita (Ro)**

La reflectancia de vitrinita (%Ro), es un parámetro que indica la madurez termal del carbón. Las medidas de Reflectancia de vitrinita (Ro) se tomaron empleando un microscopio de luz reflejada Zeiss Modelo Axiotron equipado con un fotómetro MPM400. Para la toma de los datos de reflectancia se utilizaron objetivos de inmersión de 20 y 50 aumentos y oculares de 10 aumentos. La calibración del instrumento se realizó empleando el estándar de zafiro de 0.57% en la longitud de onda de 546 nm. A su vez, el manejo del fotómetro y el procesamiento de los datos de reflectancia se realizaron a través del software PHOTAN. El método para la toma de datos de Ro sigue los lineamientos de la norma ASTM D 2798. El procedimiento y el equipo empleado aseguraron una excelente calidad de datos con baja dispersión (ver anexo 4).

### **5.5 ANÁLISIS GEOQUÍMICOS**

#### **5.5.1 Azufre Total**

El cálculo del porcentaje de Azufre fue realizado en el analizador de Carbono-Azufre LECO Modelo SC144R el cual emplea un horno de alta temperatura hasta 1500°C en una atmósfera oxidante. Los vapores de la combustión de la muestra son pasados a través de una celda de espectro infrarrojo, que analiza la cantidad de SO<sub>4</sub> producido durante la combustión. Los datos fueron procesados con el software SC144R del analizador LECO.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 ANÁLISIS PROXIMALES

Los resultados de los análisis proximales en el pozo WRV-04752 se presentan en la tabla 2. El contenido de cenizas en los mantos pertenecientes a este pozo tiene un máximo de 5.335% (base del manto 125), y un mínimo de 0.439% (base del manto 145) como es ilustrado en la figura 12. Los contenidos de humedad hallados en este pozo son considerablemente altos, esto se debe al mal trato de los corazones ya que en el momento de muestrearse se encontraban en un medio con una humedad muy alta; la humedad de los carbones varía de 3.665% (base del manto 125) a 9.890% (base del manto 145). La materia volátil varía de 26.415% (base del manto 125) a 44.064% (mitad del manto 130).

**Tabla 2.** Análisis proximales de la Formación Cerrejón en el pozo WRV-04752

Manto	Profundidad (m)	%Cenizas	%Húmedad	Materia Volátil
Manto 155	49.27	0.65	7.65	32.77
	51.06	1.03	6.99	35.17
	53.42	0.89	9.83	38.64
Manto 145	98.93	5.22	6.89	34.22
	102.12	2.75	8.10	34.96
	102.61	0.44	9.89	38.12
Manto 130	165.95	1.10	9.27	34.04
	168.55	1.14	4.42	44.06
	170.21	0.85	9.06	36.09
Manto 125	190.74	1.63	7.83	36.50
	193.14	3.76	8.15	27.72
	194.54	5.34	3.67	26.42
Manto 120	204.30	7.74	7.33	30.91
	206.50	0.74	8.20	34.23
	209.50	0.93	8.31	33.61
Manto 115	254.96	0.69	7.05	35.71
	258.54	1.36	8.64	36.09
	258.95	3.98	9.22	31.87
Manto 114	272.46	1.04	5.16	37.66
Manto 110	308.53	2.01	5.25	36.88
	311.08	0.77	6.68	33.03
	316.34	0.61	5.90	36.80
Manto 105	334.70	1.45	6.79	35.53
	336.20	1.40	7.29	36.00
	338.29	1.09	8.47	35.70
Promedio		1.94	7.44	34.91

Los resultados de los análisis proximales realizados en el pozo WRV-04774 son mostrados en la tabla 3. El porcentaje de cenizas en los mantos de este pozo es muy variado, en un rango de 0.49% (base del manto 50) a 8.74% (mitad del manto 105). Los contenidos de humedad, al igual que en el pozo anterior, son altos por las mismas circunstancias; estos datos varían de 12.58% (tope del manto 45) a 2.64% (mitad del manto 45). El contenido de materia volátil no varía drásticamente para este pozo respecto a los demás análisis (humedad y ceniza), un contenido de 23.25% (mitad del manto 100) representa el mínimo valor de materia volátil, y 39.85% (base del manto 100) representa el valor máximo.

**Tabla 3.** Análisis proximales de los mantos de Carbón en el pozo WRV 04774.

Manto	Profundidad (m)	%Cenizas	%Humedad	MV
Manto 105	60,05	1,45	7,33	33,31
	62,18	8,73	7,25	36,77
	62,82	2,28	6,01	33,38
Manto 103B	91,96	4,51	4,59	30,34
Manto 103	97,20	3,09	5,54	31,81
	107,16	0,62	6,09	32,90
Manto 102	108,30	1,01	7,52	36,49
	109,14	2,81	8,95	33,44
	133,64	3,85	5,80	38,18
Manto 100	135,98	2,17	6,31	23,25
	136,45	1,10	6,25	39,85
	191,56	2,41	3,66	37,17
Manto 83	192,90	1,00	5,57	36,31
	193,00	2,43	5,53	35,53
	216,49	1,82	6,54	35,94
Manto 80	217,55	4,10	6,12	39,31
	253,70	1,20	4,76	36,13
Manto 71	257,45	0,30	5,27	35,75
	286,80	5,22	5,11	32,61
Manto 65	287,70	1,16	4,53	35,23
	301,63	6,92	4,95	35,59
Manto 57	302,40	4,88	4,41	39,33
	324,59	0,72	3,37	28,99
Manto 50	326,00	2,56	4,22	34,27
	328,00	0,49	4,56	37,46
	347,44	1,87	12,58	28,04
Manto 45	349,50	2,71	2,64	32,48
	352,95	1,024	4,906	35,549
	Promedio	2,587	5,728	34,479

La variación de los análisis proximales en toda secuencia para la Formación Cerrejón (mantos 45 – 155) corresponde a un rango de 8.735% (mitad del manto 105) a 0.439% (base del manto 145) para las cenizas; un rango de 12.577% (tope del manto 45) a 2.637% (mitad del manto 45); y un rango de 23.251 (en la mitad del manto 100) a 44.064% (en la mitad del manto 130).

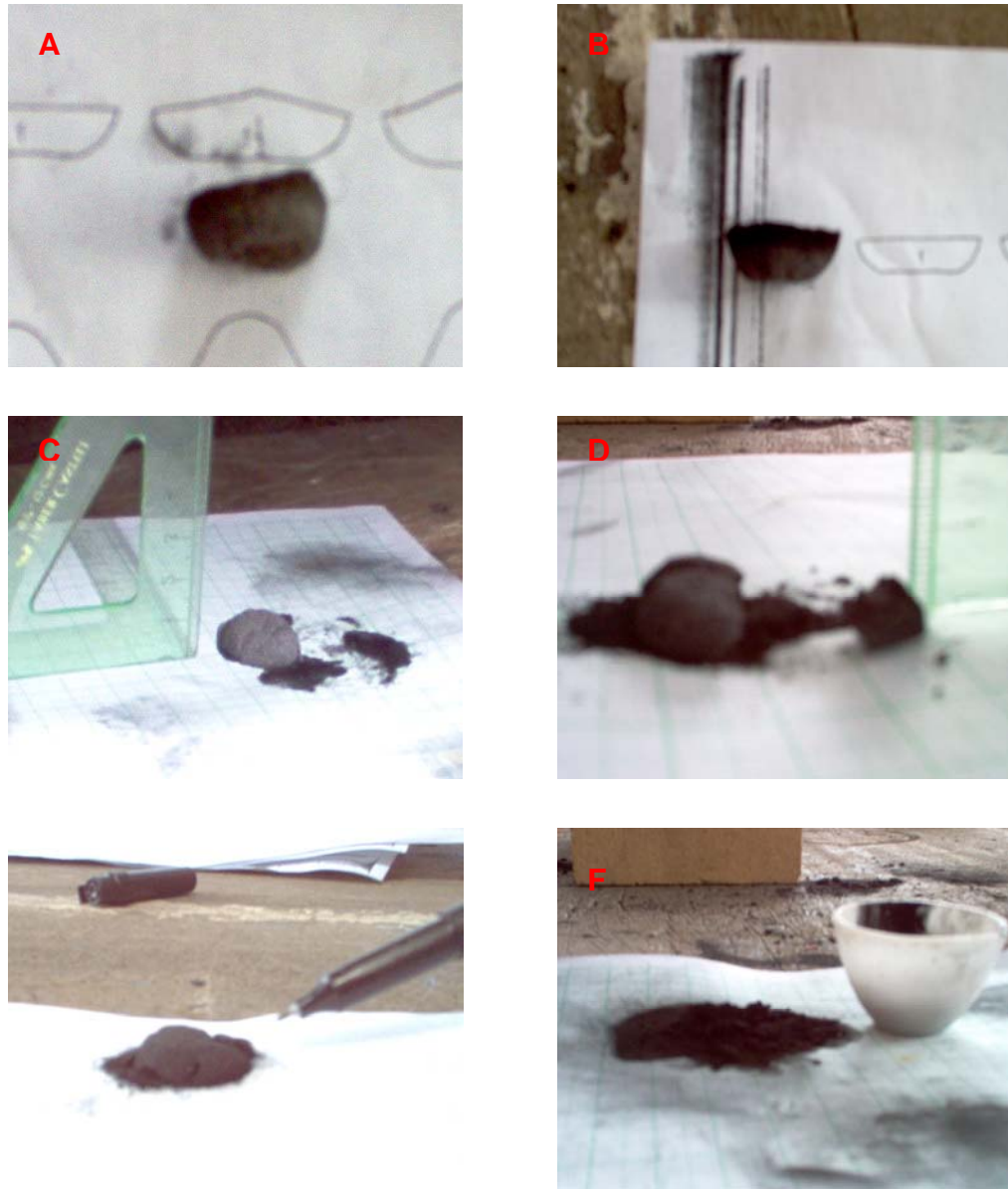
## 6.2 ÍNDICE DE HINCHAMIENTO

El índice de hinchamiento además de ser un parámetro para determinar las propiedades de coquización de los carbones, también refleja el contenido de macerales reactivos (liptinitas y vitrinitas), en consecuencia puede emplearse como indicador de condiciones de depósito.

Los resultados del índice de hinchamiento obtenido de los mantos de carbón muestreados en el pozo WRV-04752 son mostrados en la tabla 4. Los carbones de la base de este pozo (manto 105) muestran un índice de hinchamiento de 1 a 1.5, mientras que es nulo en el resto del pozo.

**Tabla 4.** Datos de Índice de hinchamiento (IH) en los mantos de carbón del pozo WRV-04752.

Manto	Profundidad (m)	IH	Observaciones
Manto 155	49.27	0	No se aglomeró, salió como ingreso.
	51.06	0	Se trata de aglomerar un poco pero se desmorona al salir del crisol.
	53.42	0	Indicio de aglomeración pero al salir del crisol se desmorona un poco. .
Manto 145	98.93	0	No se aglomeró, salió como ingreso.
	102.12	0	Indicio de aglomeración pero al salir del crisol se desmorona un poco un poco.
	102.61	0	Indicio de aglomeración pero al salir del crisol se desmorona un poco.
Manto 130	165.95	0	Indicio de aglomeración pero al salir del crisol se desmorona un poco.
	168.55	0	Indicio de aglomeración pero al salir del crisol se desmorona un poco, H=0,7
	170.21	0	Indicio de aglomeración pero al salir del crisol se desmorona un poco.
Manto 125	190.74	0	Se aglomera pero no se deja manipular, H=0,8, buena forma
	193.14	0	No se aglomeró, salió como ingreso.
	194.54	0	No se aglomeró, salió como ingreso.
Manto 120	204.3	0	Se aglomera pero no se deja manipular, H=0,2
	206.5	0	Indicio de aglomeración pero al salir del crisol se desmorona un poco. .H=0,7cm
	209.5	0	Indicio de aglomeración pero al salir del crisol se desmorona un poco. .
Manto 115	254.96	0	Indicio de aglomeración pero al salir del crisol se desmorona un poco. .H=0,8cm
	258.54	0	Indicio de aglomeración pero al salir del crisol se desmorona un poco. .H=0,8cm
	258.95	0	Indicio de aglomeración pero al salir del crisol se desmorona un poco. .H=0,8cm
Manto 14	272.46	0	Buena forma pero no se deja manipular, H=0,9cm
Manto 110	308.53	0	Indicio de aglomeración pero al salir del crisol se desmorona un poco. .
	311.08	0	Indicio de aglomeración pero al salir del crisol se desmorona un poco. . H=0,7cm
	316.34	0	Indicio de aglomeración pero al salir del crisol se desmorona un poco. . H=0,7cm
Manto 105	334.7	0	Indicio de aglomeración pero al salir del crisol se desmorona un poco. H=0,8
	336.2	1.5	Índice de hinchamiento bajo (escala de 0 a 10)
	338.29	1	Índice de hinchamiento bajo (escala de 0 a 10)



**Figura 6. Variación en índice de hinchamiento, carbones después del horno. A.** Manto 105 Mitad, IH=1.5. **B.** Manto 105 Base, IH=1. **C.** Manto 125 tope, IH=0. **D.** Manto 120 Mitad, IH=0. **E.** Manto 120 tope, IH=0. **F.** Manto 155 tope, IH=0. Nótese la disminución en la forma del carbón a medida que disminuye la profundidad (IH= índice de Hinchamiento).

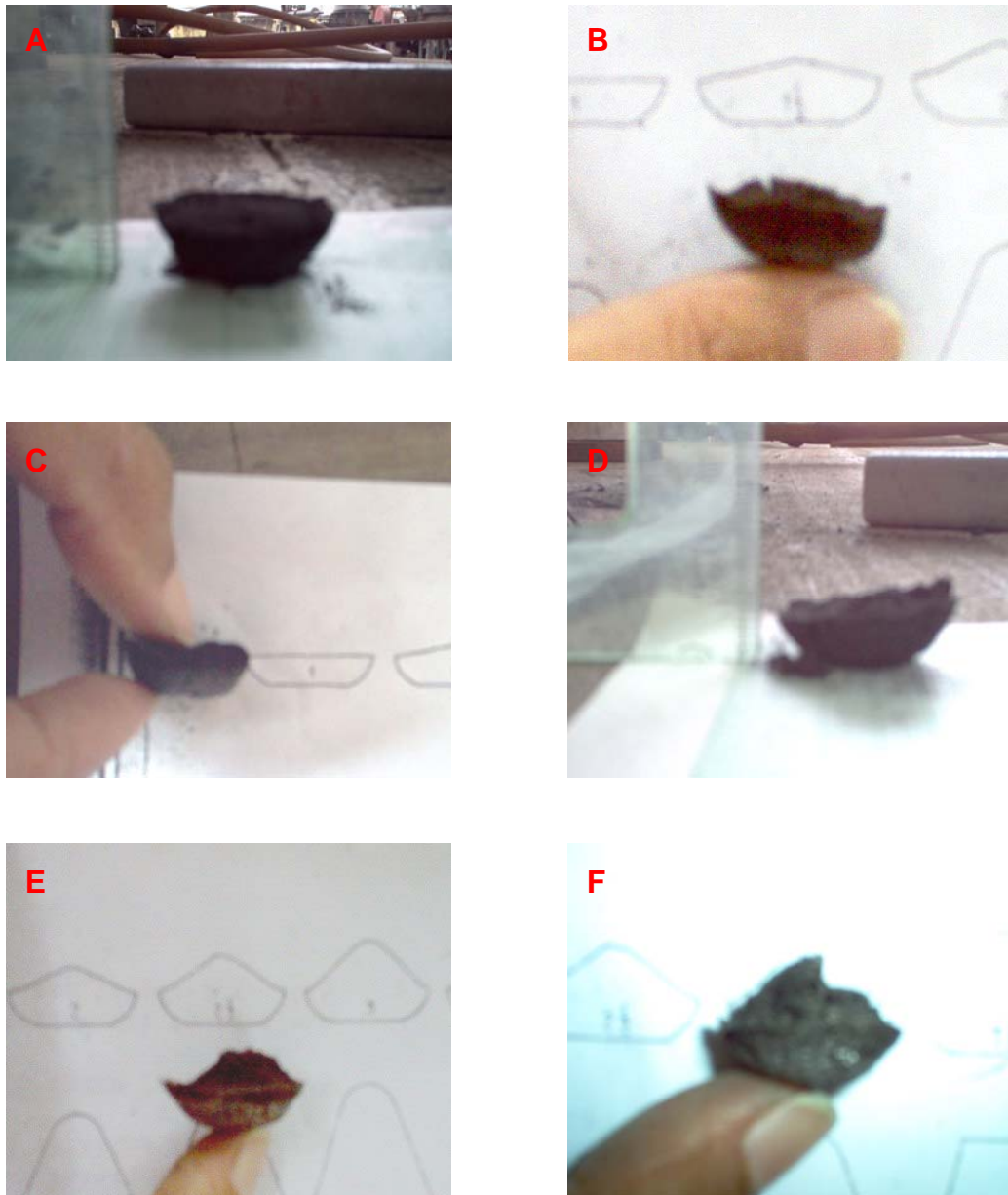
Como se muestra en la tabla a pesar de que los carbones no muestran la consistencia suficiente como para medir el índice de hinchamiento, los carbones de este pozo (a excepción del manto 105) tratan de aglomerarse y adquieren una

forma en la cual es posible medir la altura (ver tabla 4 y figura 6). Esta altura va disminuyendo con la profundidad desde el tope del manto 105 hasta el manto 155 (ver figura 6) en donde se pueden observar alturas que van de 0.7 a 0.9 cm. hasta que finalmente, en el manto 155 el carbón no sufre ningún tipo de aglomeración.

El índice de hinchamiento en los carbones del pozo WRV-04774 es mostrado en la tabla 5. Contrario al pozo WRV- 04752 la mayoría de los carbones para el pozo WRV-04774 se hinchan, y muestran una tendencia (no muy clara) de disminución del índice de Hinchamiento con la profundidad, como se muestra en figura 7.

**Tabla 5.** Datos de Índice de hinchamiento (IH) de los mantos de carbón en el pozo WRV-04774.

Manto	Profundidad (m)	IH	Observaciones
Manto 105	60,05	1	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
	62,18	1	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
	62,82	0	Buena forma pero no se deja manipular, H=0,8cm
Manto 103B	91,96	0	Buena forma pero no se deja manipular, H=0,8cm
Manto 103	97,2	0	Buena forma pero no se deja manipular, H=0,8cm
Manto 102	107,16	0	Buena forma pero no se deja manipular, H=0,8cm
	108,3	1	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
	109,14	1	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
Manto 100	133,64	1,5	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
	135,98	0	Buena forma pero no se deja manipular.
	136,45	1	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
Manto 83	191,56	1	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
	192,9	1	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
	193	1,5	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
Manto 80	216,49	1	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
	217,55	1,5	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
Manto 71	253,7	2,5	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
	257,45	1,5	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
Manto 65	286,8	1,5	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
	287,7	1,5	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
Manto 57	302,4	2,5	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
	309,63	1,5	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
Manto 50	324,59	0	Buena forma pero no se deja manipular, H=0,7cm
	326	1	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
	328	1,5	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
Manto 45	347,44	3	Índice de hinchamiento medio (escala 0 a 10)
	349,5	2	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)
	352,95	1,5	Índice de hinchamiento bajo (escala 0 a 10)



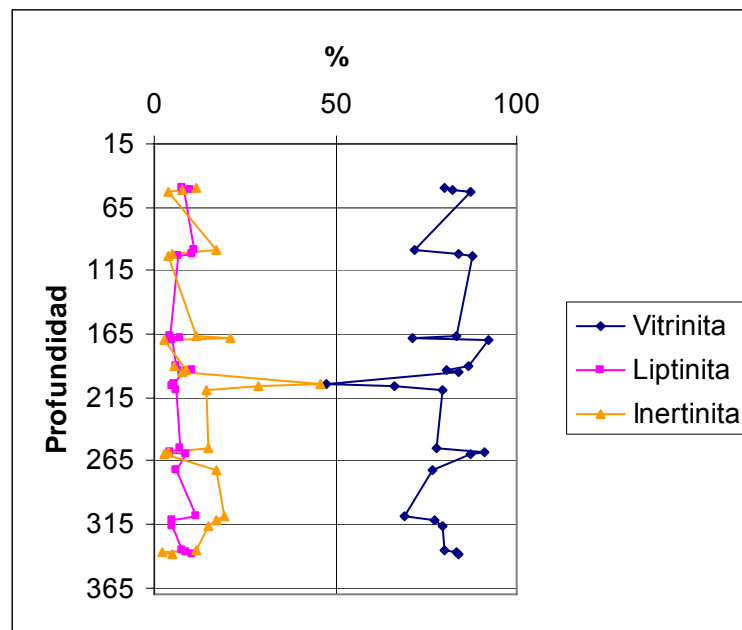
**Figura 7. Variación en índice de hinchamiento, carbones después del horno. A.** Manto 105 Base, IH=0. **B.** Manto 100 tope, IH=1.5. **C.** Manto 83 tope, IH=1. **D.** Manto 80 tope, IH=1. **E.** Manto 57 tope, IH=2.5. **F.** Manto 45 tope, IH=3. (IH= Índice de Hinchamiento).

La variación de los índices de hinchamiento en toda la secuencia muestreada, manto 45 a manto 155, es generalmente decreciente hacia el tope.

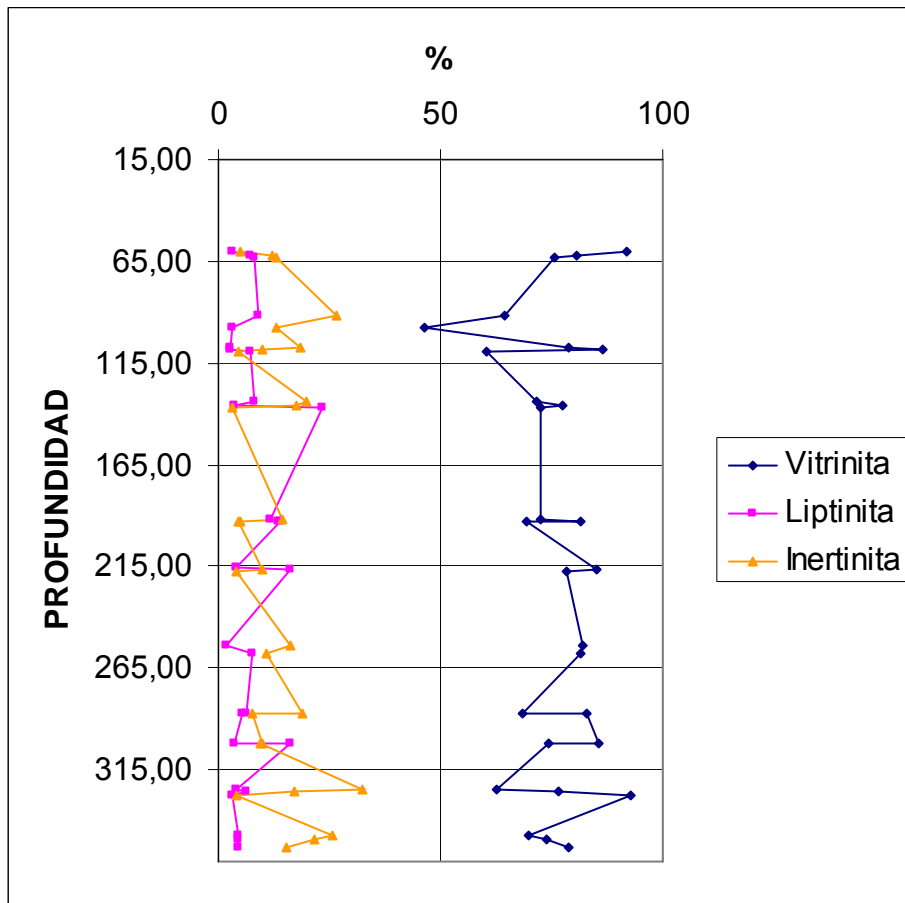
Encontrándose el máximo índice de hinchamiento (3) en la base de la secuencia (manto 45) y disminuyendo hasta cero (manto 155). Localmente, los mantos 45 y 57 muestran un comportamiento contrario al general, es decir, el índice de hinchamiento aumenta a medida que disminuye la profundidad.

## 6.2 PETROGRAFÍA DEL CARBÓN

La composición de los carbones en la Formación Cerrejón, pozos WRV-04752 y WRV-04774 varía ampliamente de manto a manto y dentro del mismo manto, como es ilustrado en las tablas 6 y 7. El grupo maceral mas abundante presente en los mantos de la secuencia analizada corresponde al grupo de la vitrinita (ver figuras 8 y 9), variando de 47.5% en el tope del manto 120 (pozo WRV-04752) a 93% en la base del manto 50 (pozo WRV-04774), y es representado principalmente por desmocolinita (figura 9D, seguida de telinita y pseudovitrinita (figura 9 A, B, C).



**Figura 8.** Contenido maceral en el pozo WRV-04752.



**Figura 9.** Contenido maceral en el pozo WRV-04774.

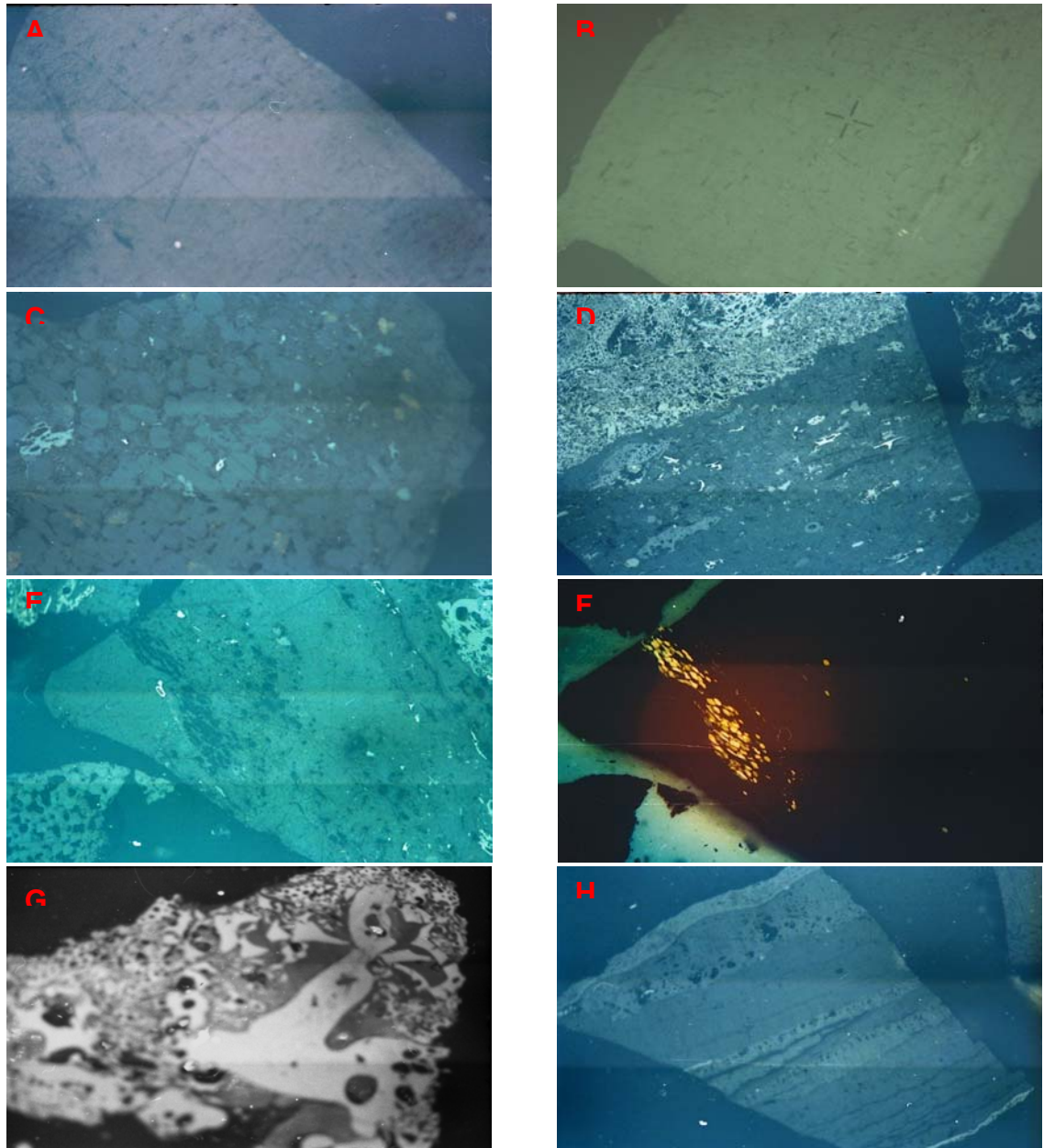
El grupo de inertinita es el segundo maceral en abundancia para los carbones de la sección estudiada de la Formación Cerrejón. El porcentaje de inertinita total varía de 2% en la mitad del manto 105 (pozo WRV-04752) a 46% (tope del manto 120, pozo WRV-04752), cabe resaltar que este porcentaje máximo de inertinita coincide con el porcentaje mínimo de vitrinita como se muestra en la figura 7. Este grupo maceral esta compuesto por fusinita, semifusinita, micrinita y esclerotinita de los cuales la fusinita (figura 10 G y H) y semifusinita son los más abundantes y se encuentran en la gran mayoría de los mantos analizados.

**Tabla 6.** Análisis de Macerales en el Pozo WRV-04752.

Manto	Profundidad m	Desmocolinita %	Telinita %	Pseudovitrinita %	Esporinita %	Cutinita %	Resinita %	Alginita %	Pirobitumen %	Fusinita %	Semifusinita %	Micrinita %	Esclerotinita %	Pirita %	MM %	TOTAL %
Manto 155	49,27	52	27,5	0,5	1	3,5	3	0	0	6	5,5	0	0	0	1	100,00
	51,06	41	40	1,5	1	1,5	7,5	0	0	3,5	2,5	1	0,5	0	0	100,00
	53,42	32,5	45	10	0,5	4,5	3,5	0	0	0	0,5	1	2,5	0	0	100,00
Manto 145	98,93	69	2,5	0,5	1	1,5	8,5	0	0	9	7	0	1	0	0	100,00
	102,12	51,5	32	0,5	3	1,5	6	0	0,5	2	1,5	0	1,5	0	0	100,00
	102,61	43,5	39	5,5	1,5	2	3	0	0	2	1	0,5	0,5	1,5	0	100,00
Manto 130	165,95	64,5	12,5	6,5	0,5	2	2	0	0	5	6	0	0,5	0,5	0	100,00
	168,55	57,5	12,5	1,5	3,5	0,5	3	0	0	12,5	8	0	0,5	0,5	0	100,00
	170,21	56	28	8	0,5	1	3,5	0	0	0,5	1,5	0,5	0,5	0	0	100,00
Manto 125	190,74	37	49,5	0	2	3,5	0,5	0	0	4	0,5	0	1	2	0	100,00
	193,14	60,5	8,5	11,5	1	0,5	9	0	0	2	5	1	1	0	0	100,00
	194,54	44,5	32	7,5	0	2,5	5,5	0	0	2,5	3	1	1	0	0,5	100,00
Manto 120	204,30	34	13	0,5	1	0,5	4	0	0	24	21,5	0	0,5	0	1	100,00
	206,50	51,5	10,5	4,5	1,5	0,5	3	0	0	14,5	13	0,5	0,5	0	0	100,00
	209,50	56	15	8,5	1,5	1,5	3	0	0	8	4,5	1	1	0	0	100,00
Manto 115	254,96	37	29	12	0	4,5	2,5	0	0	5,5	8	1	0,5	0	0	100,00
	258,54	42	39,5	9,5	0	2,5	2	0	0	2	0,5	1	0,5	0	0,5	100,00
	258,95	66,5	15	6	1	4	3,5	0,5	0	0,5	0	1,5	0,5	1	0	100,00
Manto 114	272,46	65	10	2	1,5	1,5	3	0	0	10	6,5	0	0,5	0	0	100,00
Manto 110	308,53	51,5	17,5	0	2	3,5	6	0	0	9	10	0	0,5	0	0	100,00
	311,08	47,5	25,5	4,5	1	2,5	1,5	0	0	12,5	3	1	0,5	0	0,5	100,00
	316,34	57,5	18,5	3,5	1	2,5	1,5	0	0	11	3,5	0	0,5	0	0,5	100,00
Manto 105	334,70	65,5	12	2,5	3,5	2	2,5	0	0,5	6,5	4,5	0	0,5	0	0	100,00
	336,20	59	16	8,5	0,5	3,5	5	0	0	0,5	0,5	0	1	0	5,5	100,00
	338,29	55,5	22,5	6	2	5	3,5	0	0	2,5	1,5	0	1	0	0,5	100,00

**Tabla 7.** Análisis de macerales en el pozo WRV-04774.

Manto	Profundidad m	Desmocolinita %	Telinita %	Pseudovitrinita %	Esporinita %	Cutinita %	Resinita %	Alginita %	Pirobitumen %	Fusinita %	Semifusinita %	Micrinita %	Esclerotinita %	Pirita %	MM %	TOTAL %
Manto 105	60,05	49	36	7	0	2,5	0,5	0	0	2,5	2	0	0,5	0	0	100,00
	62,18	59	10	11,5	2,5	2	2	0,5	0	8	3,5	0	0,5	0	0,5	100,00
	62,82	34,5	33	8	0,5	4,5	3	0	2,5	8,5	4	0	0,5	0	1	100,00
Manto 103B	91,96	57	7	0,5	4	1	4	0	0	13	12,5	0	1	0	0	100,00
Manto 103	97,20	40,5	6	0	1,5	0	1,5	0	0	10	2,5	0	0,5	4,5	33,5	100,50
Manto 102	107,16	43	31,5	4,5	0,5	1	1	0	0	11	7	0	0,5	0	0	100,00
	108,80	66,5	19,5	0,5	1,5	0	1	0	0	5	4	0	1	0	1	100,00
	109,14	22,5	38	0	1	4,5	1,5	0	0	2	1,5	0	1	2,5	25,5	100,00
Manto 100	133,64	65	6	0,5	1,5	2,5	4	0	0	13	6	0	1	0	0,5	100,00
	135,98	30	45	2,5	0,5	2,5	0,5	0	0	14	3,5	0	0	1,5	0	100,00
	136,45	27,5	39	6	7,5	8	8	0	0	0,5	0,5	1	1	0	1	100,00
Manto 83	191,56	52	20,5	0	7	1	3	0,5	0	3,5	9	0,5	1,5	0	1,5	100,00
	192,90	37	38	6,5	8	3	2,5	0	0	3,5	0	0,5	1	0	0	100,00
	193,00	31,5	31	7	5	8	1	0	6,5	2	1	1	0,5	4	1,5	100,00
Manto 80	216,49	41	34	10	1	0	2,5	0,5	0,5	6	3	0	1	0	0,5	100,00
	217,55	26	39	13,5	5	9,5	1,5	0	0	1	0	0,5	2,5	0,5	1	100,00
Manto 71	253,70	67,5	13	1,5	2	0	0	0	0	10,5	5	0,5	0	0	0	100,00
	257,45	64	15	2,5	4,5	1	2	0	0	7,5	2	1	0,5	0	0	100,00
Manto 65	286,80	28,5	31	9	2	3	1,5	0	0	7,5	8,5	2,5	0,5	0	6	100,00
	287,70	43	40	0	0,5	1,5	3,5	0	2,5	3,5	3	1	0	0	1,5	100,00
Manto 57	301,63	75,5	8	2	3	0	0	0,5	0	4	4	1	1	0	1	100,00
	302,40	60,5	12,5	1,5	10	0,5	4,5	1	0	4,5	2,5	1,5	1	0	0	100,00
Manto 50	324,59	53	8,5	1	3	0	1	0	0	22,5	8,5	1	0,5	0	1	100,00
	326,00	62	13,5	1	3,5	1	2	0	0	11	5,5	0	0,5	0	0	100,00
	328,00	80,5	12,5	0	2,5	0,5	0	0	0	2,5	0,5	0,5	0,5	0	0	100,00
Manto 45	347,44	51,5	18,5	0	1	3	0,5	0	0	15	10	0,5	0	0	0	100,00
	349,50	64,5	9,5	0	0,5	2,5	1,5	0	0	15	6,5	0	0	0	0	100,00
	352,95	64,5	14,5	0	2,5	2	0	0	0	8,5	6,5	0	0,5	0	1	100,00



**Figura 10. Principales macerales encontrados en los mantos de la Formación Cerrejón. A y B. Telinita**, manto 102 tope, pozo WRV-04774. **C. Pseudovitrinita y micrinita**, manto 120 mitad, pozo WRV-04752. **D. Desmocollinita**. Manto 105 tope, pozo WRV-04752. Se observa esporinita, fusinita, semifusinita y esclerotinita en la matriz de vitrinita. **E. Resinita**, manto 120 tope, pozo WRV-04752. **F. Resinita E** en luz azul, obsérvese su alta fluorescencia, manto 50 mitad, pozo WRV-04774. **G. Fusinita**, manto 100 mitad, pozo WRV-04774. **H. Bandas de telinita, semifusinita y cutinita**, manto 145 mitad, pozo WRV-04752. Aumento 20X.

Como se muestra en las figuras 8 y 9, el maceral de liptinita se encuentra en menor proporción que los macerales de vitrinita e inertinita en los mantos estudiados. Los porcentajes de liptinita varían en un rango muy amplio, de 2% (tope del manto 71, pozo WRV-04774) a 23.5% (base del manto 100, pozo WRV-04774). El grupo de liptinita en los mantos estudiados está compuesto por esporinita, cutinita, resinita, alginita y pirobitumen (figura 10 E, F y H), de los cuales, la alginita y el pirobitumen se encuentran en una cantidad muy baja; mientras que cutinita, resinita y esporinita son más abundantes (ver tabla). El contenido de liptinita en la parte inferior de la sección de la Formación Cerrejón estudiada (pozo WRV-04774) muestra valores en un rango muy similar al grupo de inertinita, mientras que en la parte superior (pozo WRV-04752) presenta un rango de valores menores.

### **Reflectancia de vitrinita (Ro)**

La reflectancia de vitrinita de las muestras estudiadas de la Formación Cerrejón (mantos 45-155) varía entre un mínimo de 0.35% (tope del manto 105, pozo WRV-04774) a un máximo de 0.547% (tope del manto 57, pozo WRV-04774). También se estudio la variación de la reflectancia de vitrinita en cada manto, para esto se analizaron tres muestras en la mayoría de los mantos provenientes de la base, zona intermedia y tope del manto, las tablas 8 y 9 muestran los resultados obtenidos.

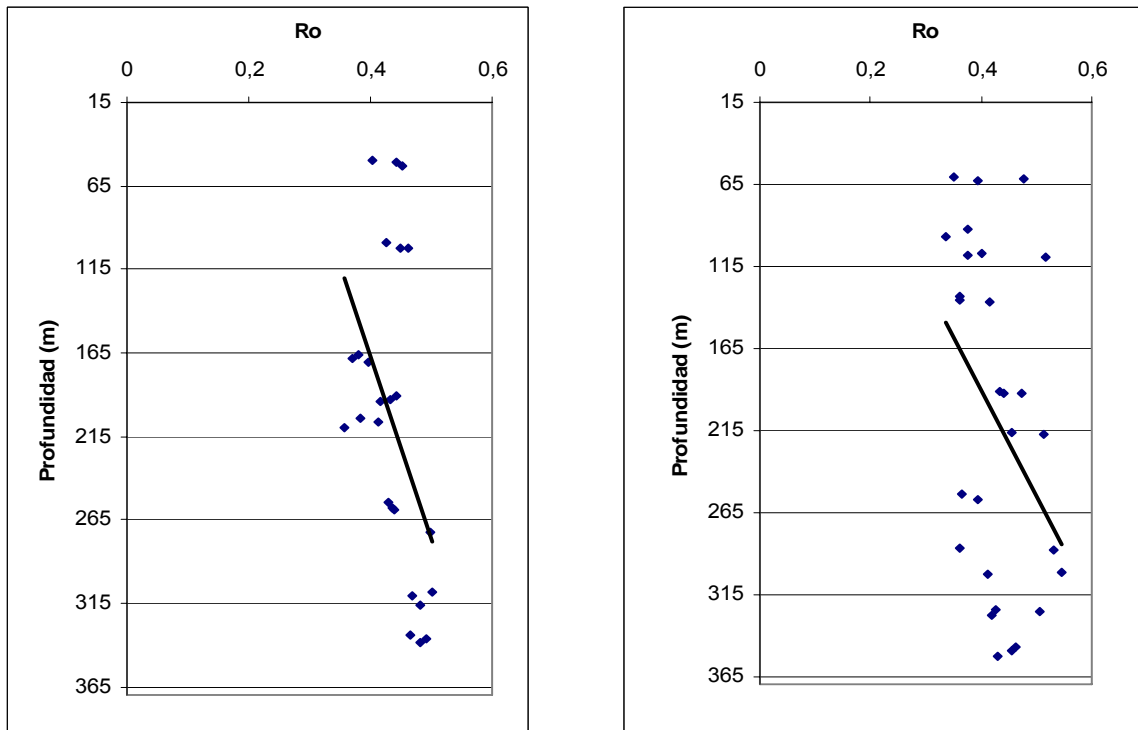
Como se ilustra en las figuras 11 y 12 la reflectancia de vitrinita se incrementa con la profundidad, esta situación es normal debido a que la madurez termal de los carbones se incrementa hacia la base de las secuencias. La reflectancia de vitrinita es un parámetro de maduración termal que también puede emplearse como indicador de ambientes de depósito. Diessel (1992) ilustra que la reflectancia de vitirinita en un manto disminuye de base a tope cuando el manto

esta suprayacido por shales marinos y lo contrario cuando el manto esta suprayacido por sedimentos continentales.

**Tablas 8 y 9.** Datos de reflectancia de vitrinita de la Formación Cerrejón en el pozo WRV-04752 (izquierda) y en el pozo WRV-04774 (derecha).

Manto	Profundidad	Ro	Manto	Profundidad (m)	% Ro
Manto 155	49,27	0,402	Manto 105	60,05	0,350
	51,06	0,441		62,18	0,476
	53,42	0,451		62,82	0,395
Manto 145	98,93	0,425	Manto 103 B	91,96	0,375
	102,12	0,462	Manto 103	97,20	0,336
	102,61	0,448	Manto 102	107,16	0,401
165,95	0,379	108,80		0,377	
Manto 130	168,55	0,371		109,14	0,516
	170,21	0,397	Manto 100	133,64	0,361
	Manto 125	190,74		0,441	135,98
193,14		0,433		136,45	0,414
194,54		0,418	Manto 83	191,56	0,435
Manto 120	204,30	0,385		192,90	0,441
	206,50	0,412		193,00	0,474
	209,50	0,357	Manto 80	216,49	0,454
Manto 115	254,96	0,429		217,55	0,513
	258,54	0,436	Manto 71	253,70	0,366
	258,95	0,438		257,45	0,394
Manto 114	272,46	0,499	Manto 65	286,80	0,360
	Manto 110	308,53		0,503	287,70
311,08		0,468	Manto 57	301,63	0,547
316,34		0,482		302,40	0,411
Manto 105	334,70	0,464	Manto 50	324,59	0,427
	336,20	0,492		326,00	0,507
	338,29	0,483		328,00	0,419
			Manto 45	347,44	0,461
				349,50	0,455
				352,95	0,430

Los resultados de reflectancia de vitrinita obtenidos permiten clasificar los carbones estudiados en los rangos de sub-bituminosos altos en volátiles y sub-bituminosos alto en volátiles tipo C, como es ilustrado en la tabla 10.



**Figura 11.** Reflectancia de vitrinita de los mantos 45-155 en la Formación Cerrejón. Izquierda pozo WRV-04752 y WRV-04774 derecha.

**Tabla 10.** Límites ASTM de Romax para rangos del carbón.

Rango del carbón	(%Romax)
Sub-bituminoso alto en Volátiles	<0.47
Sub-bituminoso alto en Volátiles tipo C	0.47 – 0.57
Sub-bituminoso alto en Volátiles tipo B	0.57 – 0.71
Sub-bituminoso alto en Volátiles tipo A	0.71 – 1.10
Bituminoso medio en Volátiles	1.10 – 1.50
Bituminoso bajo en Volátiles	1.05 – 2.05
Semi-antracita	2.05 – 3.00 aprox.
Antracita	> 3.0

## Índice de Gelificación

Los resultados del índice de gelificación de los mantos muestreados son presentados en las tablas 11 y 12.

**Tabla 11.** Índice de gelificación en los mantos muestreados del pozo WRV -04752.

Manto	Profundidad m	Índice de Gelificación
Manto 155	49,27	6,96
	51,06	12,69
	53,42	29,17
Manto 145	98,93	4,24
	102,12	16,80
	102,61	25,14
Manto 130	165,95	7,26
	168,55	3,40
	170,21	36,80
Manto 125	190,74	15,73
	193,14	10,06
	194,54	12,92
Manto 120	204,30	1,03
	206,50	2,38
	209,50	5,89
Manto 115	254,96	5,57
	258,54	30,33
	258,95	87,50
Manto 114	272,46	4,53
Manto 110	308,53	3,54
	311,08	4,84
	316,34	5,30
Manto 105	334,70	6,96
	336,20	41,75
	338,29	16,80

El índice de gelificación en la sección muestreada de la Formación Cerrejón (mantos 45-155) varía en un amplio rango de valores, desde 1.03 (techo del manto 120) a 87.50 (mitad del manto 115). El valor del índice de gelificación además de variar drásticamente en toda la sección estudiada de la formación Cerrejón también varía en un mismo manto de carbón como es indicado en las tablas 11 y 12.

Tabla 12. Índice de gelificación en los mantos muestreados del pozo WRV -04774.

<b>Manto</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Índice de Gelificación</b>
Manto 105	60,05	18,40
	62,18	6,71
	62,82	5,81
Manto 103B	91,96	2,43
Manto 103	97,20	3,58
Manto 102	107,16	4,27
	108,30	8,65
	109,14	13,44
Manto 100	133,64	3,58
	135,98	4,43
	136,45	36,25
Manto 83	191,56	5,18
	192,90	18,11
	193,00	19,86
Manto 80	216,49	8,50
	217,55	22,43
Manto 71	253,70	5,29
	257,45	8,15
Manto 65	286,80	4,15
	287,70	12,77
Manto 57	301,63	9,50
	302,40	9,31
Manto 50	324,59	1,98
	326,00	4,50
	328,00	26,57
Manto 45	347,44	2,80
	349,50	3,44
	352,95	5,10

### 6.3 ANÁLISIS GEOQUÍMICOS

#### Contenido de azufre

El contenido de azufre en los pozos estudiados no muestra un patrón de variación definido, se observan variaciones locales en los cuales se incrementa o disminuye el contenido de azufre. Los resultados de los análisis de azufre se ilustran en las tablas 13 y 14.

**Tablas 13.** Porcentaje de azufre de la Formación Cerrejón en el pozo WRV-04752.

Manto	Profundidad (m)	% Azufre
Manto 155	49,27	0,48
	51,06	0,39
	53,42	0,71
Manto 145	98,93	0,84
	102,02	0,48
	102,61	0,48
Manto 130	165,93	0,63
	168,55	0,46
	170,21	0,66
Manto 125	190,74	1,19
	193,14	0,32
	194,54	0,29
Manto 120	204,30	0,48
	206,50	0,51
	209,50	0,64
Manto 115	254,93	0,44
	258,54	0,72
	258,95	1,08
Manto 114	272,46	0,60
Manto 110	308,53	0,52
	311,08	0,37
	316,34	0,33
Manto 105	334,70	0,43
	336,20	0,47
	338,29	0,53

**Tablas 14.** Porcentaje de azufre de la Formación Cerrejón en el pozo WRV-04774.

Manto	Profundidad (m)	% Azufre
Manto 105	60,05	0,43
	62,18	0,45
	62,82	0,34
Manto 103B	91,96	0,55
Manto 103	97,20	0,76
Manto 102	107,16	0,66
	108,30	0,61
	109,14	0,86
Manto 100	133,64	0,71
	135,98	0,53
	136,45	0,60
Manto 83	191,56	1,13
	192,90	0,66
	193,00	2,37
Manto 80	216,49	0,69
	217,55	0,86
Manto 71	253,70	0,99
	257,45	0,47
Manto 65	286,80	2,66
	287,70	0,63
Manto 57	301,63	0,86
	302,14	0,64
Manto 50	324,59	0,47
	326,00	0,55
	328,00	0,66

Al observar la variación del contenido de azufre por segmentos de cada pozo se observa que dicha variación puede estar ligada a condiciones de depósito como se discute mas adelante.

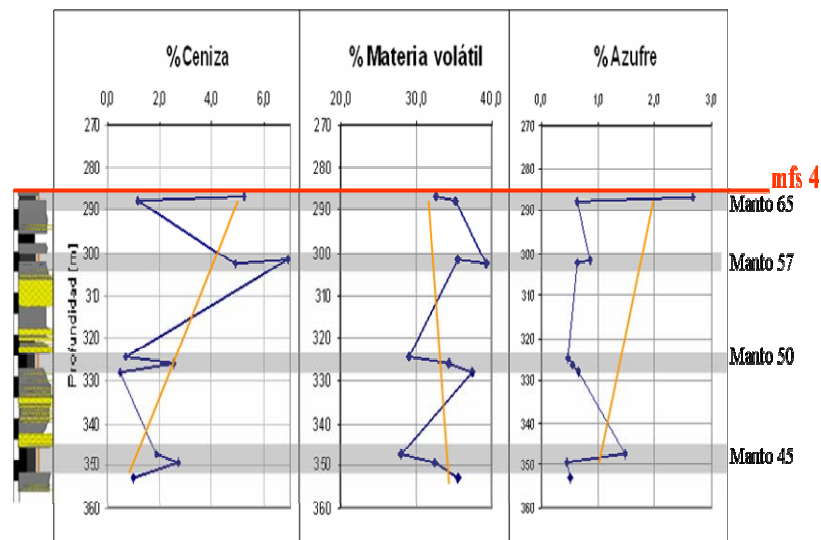
## 7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos fueron analizados uno a uno en cada manto para poder identificar máximas superficies de inundación o subidas del nivel del mar, y si existían, superficies de regresión. Este análisis fue realizado sin observar los resultados estratigráficos obtenidos por Bayona et al. (2004), después de realizado se compararon con la interpretación ya propuesta por los autores mencionados y son discutidos a continuación.

De acuerdo con Bayona et al. (2004) la sección estudiada de la Formación Cerrejón (mantos 45 – 155, figura 5) presenta una secuencia que esta dividida por cuatro superficies máximas de inundación (ver figuras 5, anexos 5 y 6). Estas superficies fueron ubicadas de las siguiente manera: La superficie mas antigua (número cuatro) esta ubicada en el tope del manto 65 (pozo WRV-04774), sigue la superficie de inundación número cinco ubicada en el tope del manto 105 (pozo WRV-04774), posteriormente esta la superficie de inundación número seis en el tope del manto 115 (pozo WRV-04752) y por último está la superficie de inundación mas reciente (número siete) que fue ubicada en el tope del manto 145 (pozo WRV-04752).

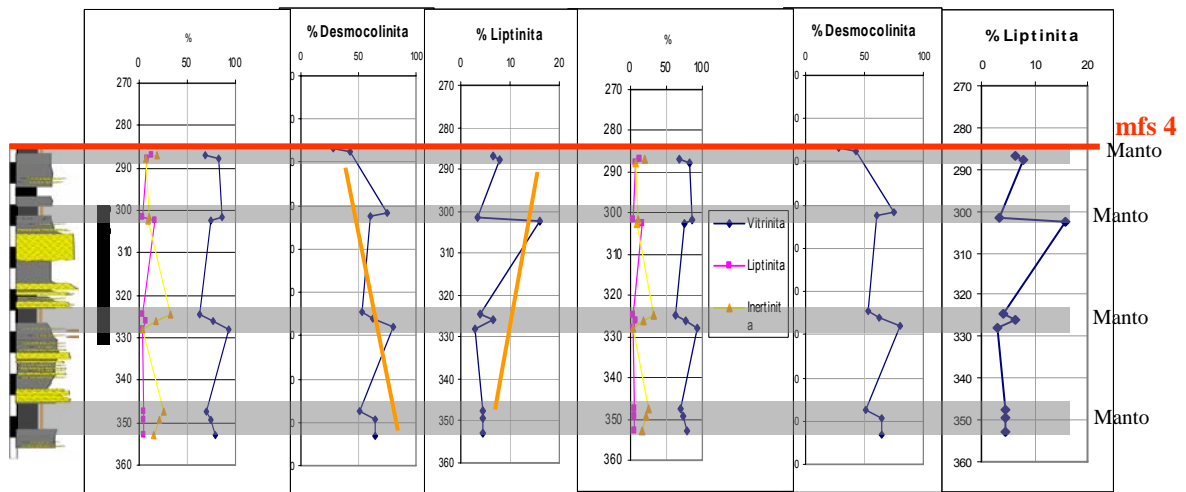
La anterior interpretación utiliza criterios netamente estratigráficos los cuales a menudo son subjetivos dependiendo del estratígrafo, por esta razón, se propone utilizar los parámetros planteados en el capítulo 3, y la metodología empleada por García-González (2004) quien utilizó análisis geoquímicos y petrográficos y sus variaciones de manto a manto los cuales se pueden utilizar como indicadores de ambientes de depósito para diferenciar carbones suprayacidos por shales marinos o por lutitas o areniscas fluviales. Esta metodología utiliza resultados de análisis independientes de la interpretación subjetiva del estratígrafo, en consecuencia son

útiles para validar o invalidar los límites de parasecuencias identificados con criterios sedimentológicos. A continuación se discute la interpretación de Bayona et al,(2004) utilizando los resultados de los análisis geoquímicos y petrográficos, así como de otras superficies identificadas.



**Figura 12.** Variación en los parámetros geoquímicos en la sección infrayacente a la máxima superficie de inundación número 4 (mfs 4). Las áreas grises indican los mantos muestreados y los puntos las muestras de cada manto.

En el manto 65 los resultados de los análisis geoquímicos muestran un aumento hacia el tope en el contenido de cenizas que coincide con un incremento del contenido de materia mineral y disminución en el contenido de materia volátil hacia el tope del mismo manto. El contenido de azufre aumenta de base a techo, siendo el porcentaje del techo el valor de azufre más alto registrado en toda la sección estudiada (mantos 45 – 155). Las características petrográficas de este manto son las siguientes: el contenido de liptinita y desmocolinita disminuye de base a techo; el contenido de vitrinita es relativamente constante mientras que el contenido de inertinita disminuye hacia el tope del manto. El índice de gelificación aumenta de base a techo del manto y la reflectancia de vitrinita disminuye en la misma dirección. Los parámetros anteriores son mostrados en las figuras 12 y 13.

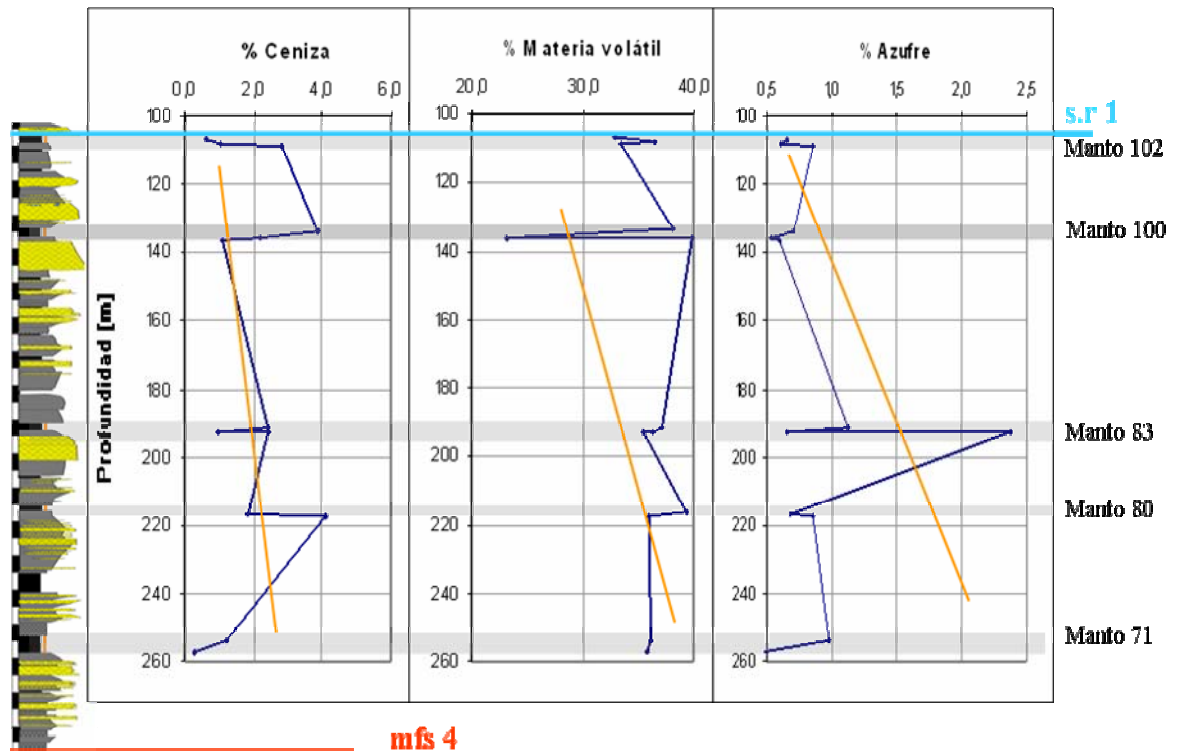


**Figura 13.** Variación en los parámetros petrográficos en la sección infrayacente a la máxima superficie de inundación número 4 (mfs 4). Las áreas grises indican los mantos muestreados y los puntos las muestras de cada manto.

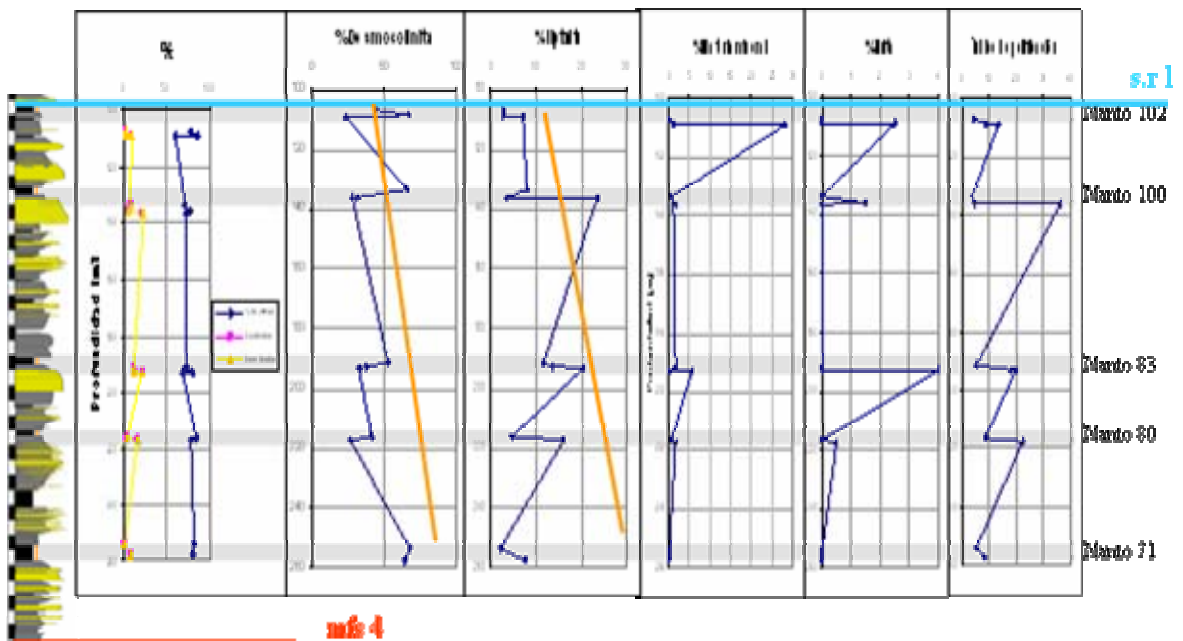
De acuerdo a los criterios planteados en el marco teórico todos los parámetros geoquímicos y petrográficos descritos en el párrafo anterior, a excepción de la disminución en el contenido de desmocolinita y liptinita indican la existencia de una superficie máxima de inundación en el tope del manto 65, identificada por Bayona et al (2004) como superficie de inundación número cuatro. La sección infrayacente al manto 65 del pozo WRV-04774 (de 352.95 m a 286.80 m de profundidad) presenta un patrón de incremento del contenido de liptinita, una disminución del contenido de desmocolinita, un incremento en el contenido de pirita, azufre y cenizas (figuras 12 y 13). Todos estos parámetros soportan la interpretación de una superficie de inundación en el tope del manto 65.

En el tope del manto 102 (pozo WRV-04774) se identifica una superficie de regresión (ver figura 14 y 15) identificada como superficie de regresión uno (sr1) debido a un descenso en el nivel base de erosión y por lo tanto del espacio de acomodación (late highstand) que es soportada con los siguientes argumentos: 1) El manto 102 está directamente suprayacido por una arenisca con estratificación

ondulosa y con ondulitas de corriente (ripples); 2) El contenido de azufre de la sección infrayacente (entre 286.80 y 107.16 metros de profundidad, figura 13) disminuye hacia el tope de la misma y como también de base a tope del manto 102; 3) las cenizas aumentan de base a tope del manto 102 y de la sección infrayacente (figura 14); 4) el contenido de inertinita aumenta hacia el tope del manto y hacia el tope de la sección infrayacente; 5) el contenido de pirita disminuye hacia el tope del manto (figura 15); 6) el porcentaje de reflectancia de vitrinita disminuye hacia el tope de la sección infrayacente y del manto, y, 7) El índice de gelificación disminuye de base a tope del mismo manto (102) y en la sección infrayacente.

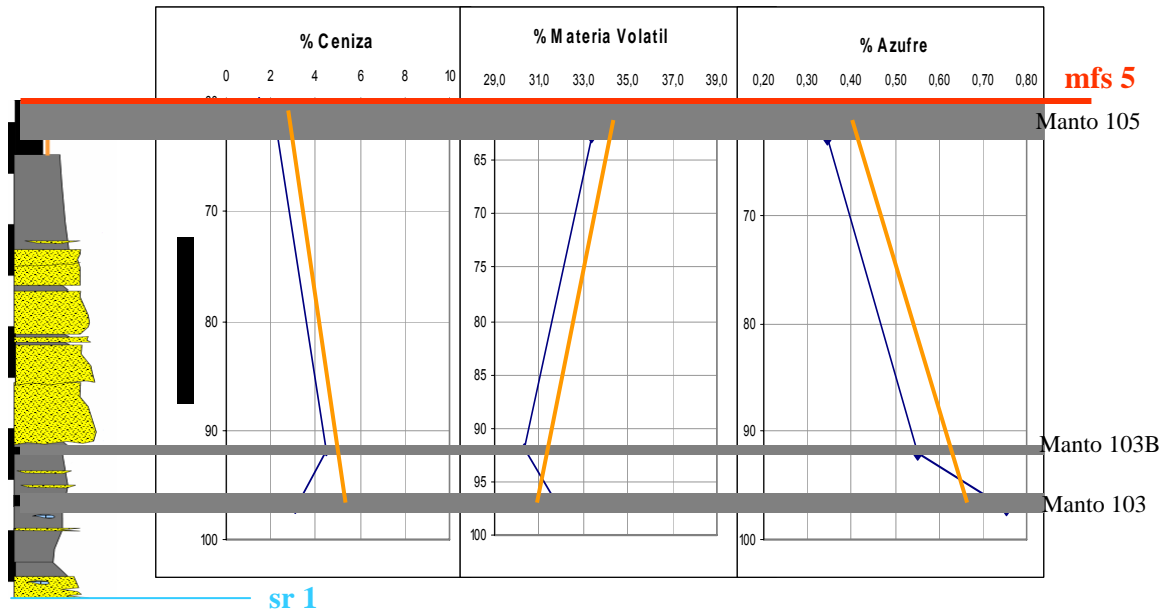


**Figura 14.** Variación en los parámetros geoquímicos en la sección comprendida entre la superficie de inundación numero 4 (mfs 4) y la superficie de regresión numero 1 (s.r 1). Las áreas grises indican los mantos muestreados y los puntos las muestras analizadas en cada manto, las líneas naranjas muestran las tendencias en la sección infrayacente.

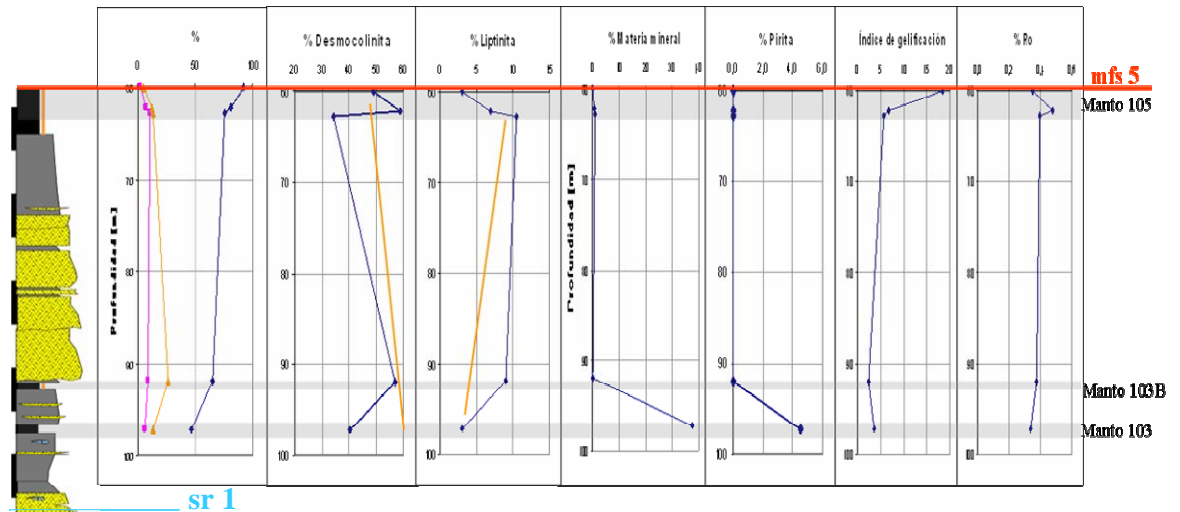


**Figura 15.** Variación en los parámetros petrográficos en la sección comprendida entre la superficie de inundación número 4 (mfs 4) y la superficie de regresión número 1 (sr1). Las áreas grises indican los mantos muestreados y los puntos las muestras de cada manto.

En el tope del manto 105 (pozo WRV-04774) esta ubicada la superficie de inundación número cinco propuesta por Bayona et al (2004). Los resultados obtenidos (ver figuras 16 y 17) en este manto muestran las siguientes características geoquímicas de base a tope del manto: 1) disminución en el contenido de cenizas, 2) disminución de materia mineral, 3) aumento del contenido de materia volátil y 4) aumento del azufre. Por otra parte, las características petrográficas varían de la siguiente manera de base a tope del manto 105: 1) disminución en el contenido de liptinita, 2) aumento de desmocolinita, 5) disminución de inertinita y 4) aumento en el índice de gelificación. En la sección infrayacente a este manto (107.16 metros a 60.05 metros) las tendencias en las características geoquímicas y petrográficas se comportan de la misma manera que en el manto 105 por lo tanto estas tendencias soportan nuevamente la existencia de una superficie de inundación en el tope del manto 105.



**Figura 16.** Variación en los parámetros geoquímicos en la sección comprendida entre la superficie de inundación numero 5 (mfs 5) y la superficie de regresión numero 1 (sr1). Las áreas grises indican los mantos muestreados y los puntos las muestras analizadas en cada manto.

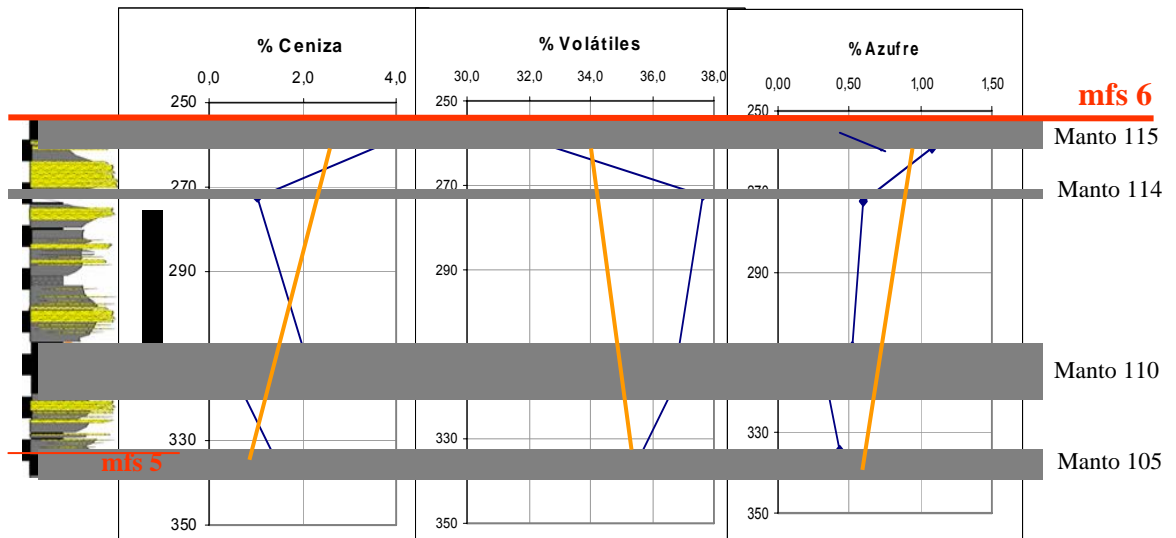


**Figura 17.** Variación en los parámetros petrográficos en la sección comprendida entre la superficie de inundación numero 5 (mfs 5) y la superficie de regresión numero 1 (sr1). Las áreas grises indican los mantos muestreados y los puntos las muestras de cada manto.

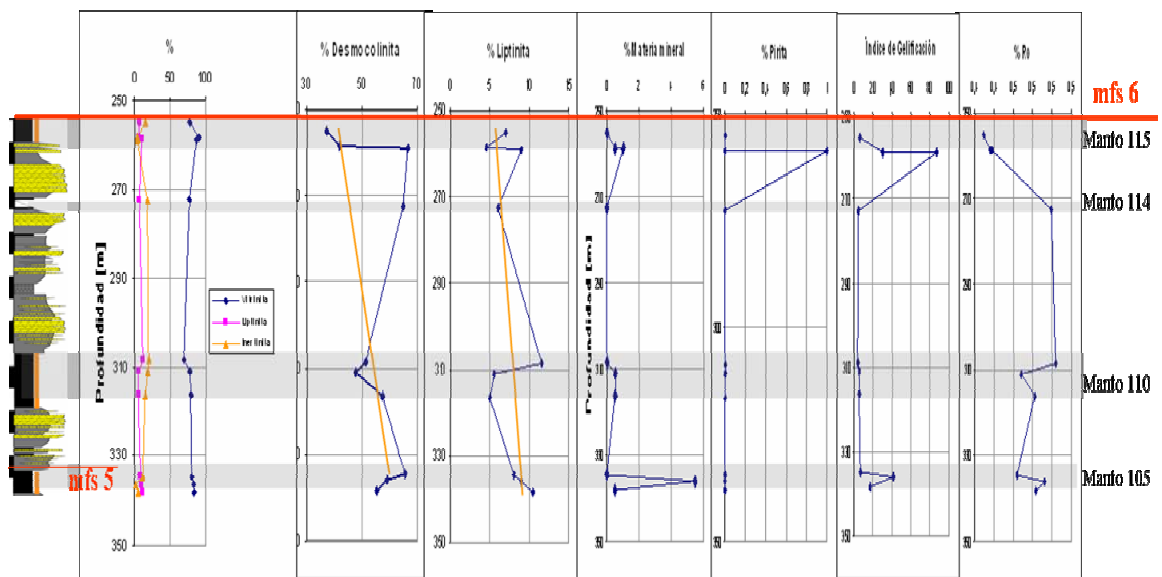
De acuerdo a los parámetros planteados en el marco teórico de las tendencias mencionadas anteriormente, el único parámetro que no coincide con un levantamiento en el nivel del mar es la disminución de cenizas hacia el tope del manto, los demás parámetros corroboran la existencia de una superficie máxima de inundación en el tope del manto 105 (pozo WRV-04774) identificada por Bayota et al, 2004 como superficie de inundación cinco.

En el tope del manto 115 (pozo WRV-04752) se encuentra ubicada la superficie de inundación número seis (figuras 18 y 19). En este manto las características geoquímicas (figura 18) varían de la siguiente manera de base a techo del manto: 1) aumento en el contenido de cenizas, 2) aumento materia volátil y disminuye el contenido de azufre. Las características petrográficas (figura 19) dentro de este manto están dadas por una disminución hacia el tope de liptinita, desmocolinita, pirita, e índice de gelificación y un aumento hacia el tope de inertinita.

La sección infrayacente a la superficie de inundación número seis (338.29 metros a 254.96 metros de profundidad, figuras 18 y 19) presenta las siguientes variaciones geoquímicas de base a tope de la sección: disminución en el contenido de cenizas y aumento en el contenido de azufre; por otro lado en cuanto a las variaciones petrográficas se tienen: disminución de liptinita, desmocolinita, reflectancia de vitrinita e índice de gelificación. Cabe resaltar que aunque la tendencia general del contenido de azufre en la sección es de un aumento a medida que disminuye la profundidad lo que indicaría un ascenso del nivel del mar el contenido de azufre en el manto 115 disminuye drásticamente hacia el tope indicando lo contrario. Las características geoquímicas y petrográficas en el manto 115 y en la sección infrayacente indican que el manto 115 no se depositó en un ambiente en el cual el nivel del mar estaba subiendo, por lo tanto esta superficie de inundación identificada por Bayona et al (2004) queda descartada en el presente estudio.

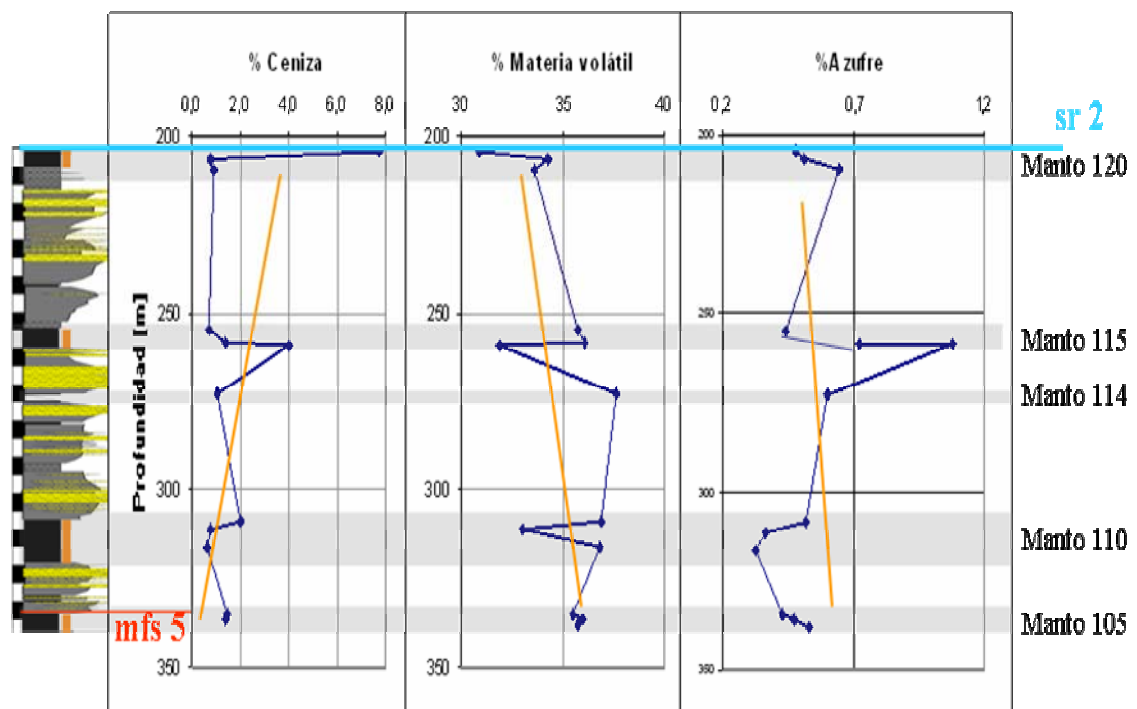


**Figura 18.** Variación en los parámetros geoquímicos en la sección comprendida entre la superficie de inundación numero 6 (mfs 6) y la superficie de inundación numero 5 (mfs 5). Las áreas grises indican los mantos muestreados y los puntos las muestras analizadas en cada manto.

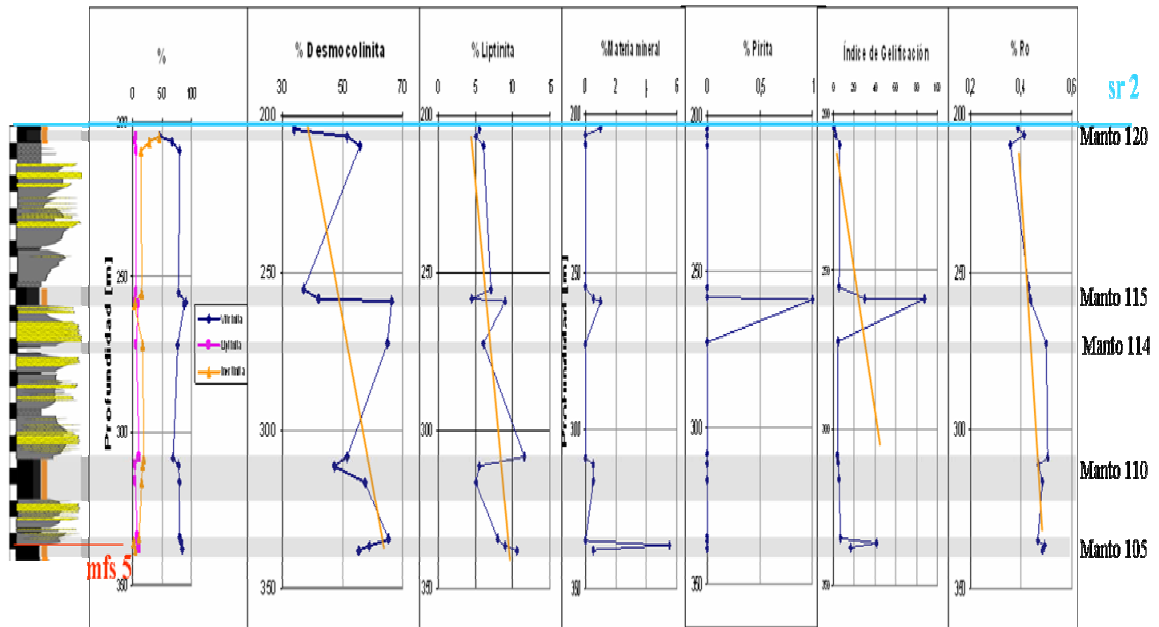


**Figura 19.** Variación en los parámetros petrográficos en la sección comprendida entre la superficie de inundación numero 6 (mfs 6) y la superficie de inundación numero 5 (mfs 5). Las áreas grises indican los mantos muestreados y los puntos las muestras analizadas en cada manto.

Una segunda superficie de regresión es identificada sobre el tope del manto 120 (pozo WRV-04752) en base a los siguientes criterios geoquímicos y petrográficos, los cuales son mostrados en las figuras 20 y 21 : 1) En la sección infrayacente a esta sección (204.3 a 338.29 metros de profundidad) y en el manto 120 de liptinita presenta una tendencia de disminución hacia el tope; 2) El contenido de desmocolinita presenta una tendencia igual a la liptinita tanto para la sección infrayacente como para el manto; 3) El contenido de inertinita en este manto es el máximo en toda la sección estudiada (mantos 45 – 155) y coincide con el mínimo contenido de vitrinita presente en toda la sección estudiada; 4) El grupo maceral de inertinita muestra una tendencia de aumentar hacia el tope del manto 120 y en la sección infrayacente. 5) El contenido de azufre disminuye de base a tope del manto 120 y de la sección infrayacente.



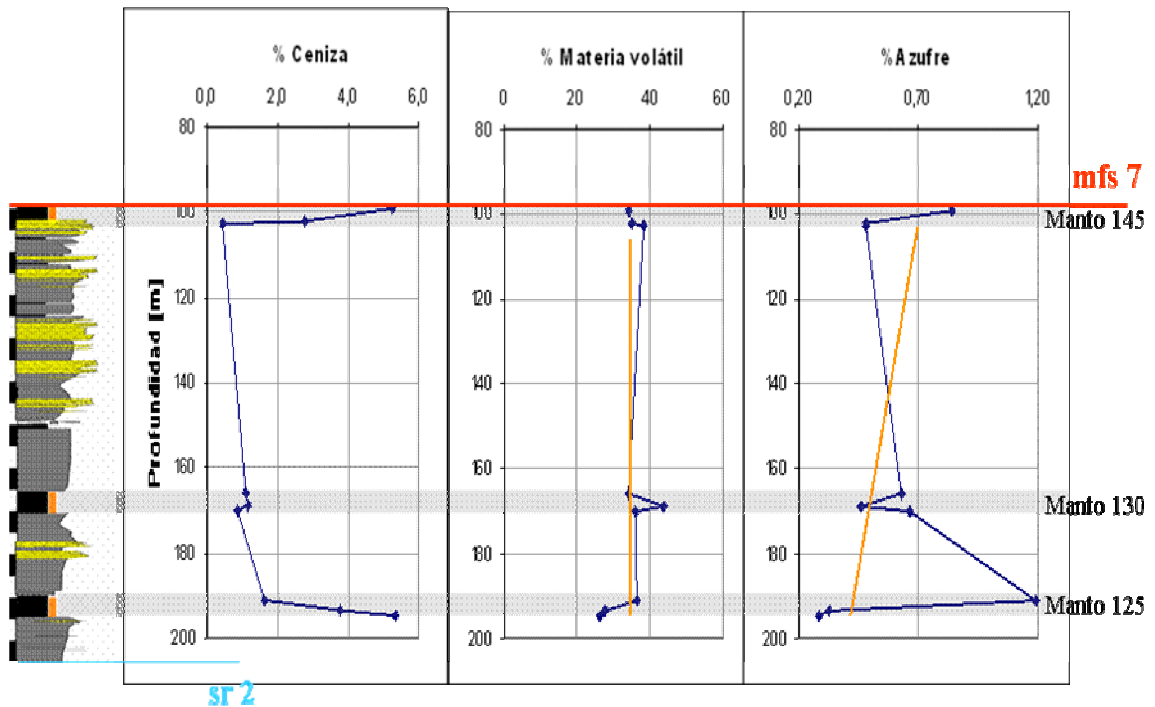
**Figura 20.** Variación en los parámetros geoquímicos en la sección comprendida entre la superficie de inundación número 5 (mfs 6) y la superficie de regresión 2 (sr 2). Las áreas grises indican los mantos muestreados y los puntos las muestras analizadas en cada manto.



**Figura 21.** Variación en los parámetros petrográficos en la sección comprendida entre la superficie de inundación número 5 (mfs 6) y la superficie de regresión 2 (sr 2). Las áreas grises indican los mantos muestreados y los puntos las muestras analizadas en cada manto.

La superficie de inundación más reciente corresponde a la número siete la cual esta ubicada en el tope del manto 145 (ver figuras 22 y 23), los parámetros geoquímicos empleados muestran que: el contenido de cenizas y materia volátil disminuyen hacia el tope del manto 145 mientras que el contenido de azufre aumenta en la misma dirección. Las características petrográficas varían de base a tope del manto de la siguiente manera: el contenido de liptinita y desmocolinita aumentan mientras que la reflectancia de vitrinita e índice de gelificación disminuyen. La sección infrayacente a este manto (figuras 22 y 23) presenta las siguientes tendencias: Una disminución hacia el tope del contenido de cenizas y un aumento en el contenido de azufre en la misma dirección, el contenido de materia volátil no muestra una tendencia marcada. Las tendencias observadas en las características petrográficas son las siguientes: aumento en el contenido de liptinita, desmocolinita, pirita y una disminución en el índice de gelificación

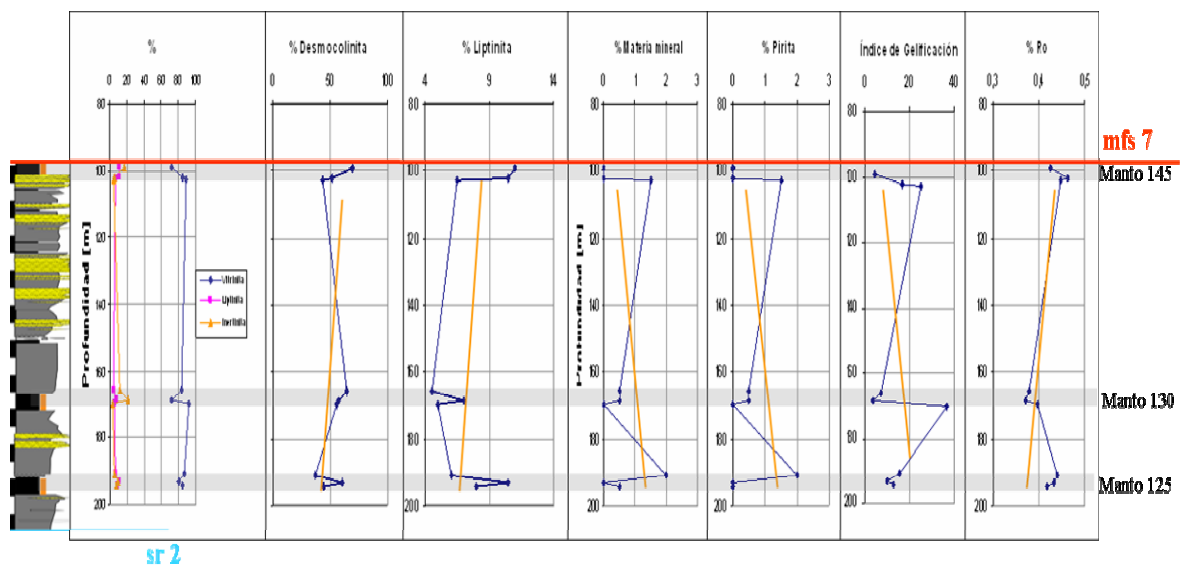
mientras que la reflectancia de vitrinita no muestra una tendencia considerable. A excepción de la tendencia en el contenido de cenizas y el índice de gelificación, todas las características geoquímicas y petrográficas corroboran la existencia de una superficie de inundación sobre el manto 145, identificada como superficie de inundación número siete por Bayona et al (2004).



**Figura 22.** Variación en los parámetros geoquímicos en la sección comprendida entre la superficie de inundación número 7 (mfs 7) y la superficie de regresión 2 (sr 2). Las áreas grises indican los mantos muestreados y los puntos las muestras analizadas en cada manto.

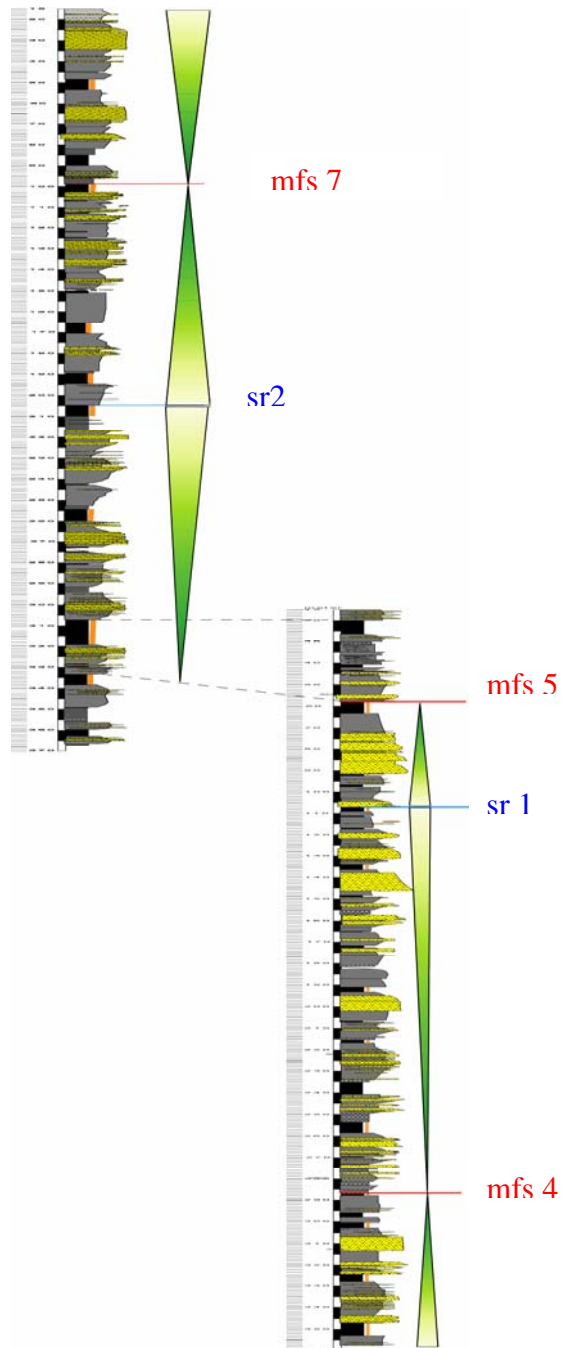
En suma se corroboraron tres de las cuatro superficies de inundación identificadas por Bayona et al (2004) y se identificaron dos superficies de regresión o descensos del nivel del mar, en las cuales el nivel base desciende al igual que el espacio de acomodación (figura 24). En consecuencia la Formación Cerrejón se formó durante dos ciclos de fluctuaciones eustáticas, como se ilustra en la figura 24; a pesar de que aparentemente son tres ciclos en lugar de dos, solo los que

están limitados por superficies de inundación y regresión son corroborados en el presente estudio. Por lo tanto la depositación de la Formación Cerrejón se inicio con una superficie máxima de inundación (superficie de inundación número cuatro) la cual ocurre debido a una transgresión; es seguida de una superficie de regresión (ubicada en el tope del manto 102, pozo WRV-04774); sigue nuevamente una superficie de máxima inundación (numero cinco); a la cual sigue un estado regresivo identificado en el techo del manto 120 (pozo WRV-04752) y finalmente se termina con el ultimo evento de máxima inundación identificado como superficie de inundación numero siete.



**Figura 23.** Variación en los parámetros petrográficos en la sección comprendida entre la superficie de inundación número 7 (mfs 7) y la superficie de regresión 2 (sr 2). Las áreas grises indican los mantos muestreados y los puntos las muestras analizadas en cada manto.

La Formación de depósitos de turba durante los ascensos y descensos del nivel base de erosión le imprimió características geoquímicas y petrográficas particulares a los diferentes mantos de la secuencia del Cerrejón como es mostrado en las figuras 12-23 y en los anexos 5 y 6, en donde existen al menos seis para-secuencias limitadas por tres superficies de inundación y dos superficies de regresión.



**Figura 24.** Columnas estratigráficas de los pozos WRV -04752 (superior) y WRV-04774 (inferior) con las superficies de máxima inundación (msf) y de regresión (sr) en la sección estudiada de la Formación Cerrejón y los ciclos respectivos de nivel base. Las líneas naranjas verticales indican los mantos muestreados.

## 8. CONCLUSIONES

La petrográfica y geoquímica orgánica son una herramienta muy útil en la estratigrafía de secuencias ya que permiten identificar límites de parasecuencias con mayor precisión.

Tres superficies máximas de inundación (mfs) y dos superficies de regresión (sr) fueron identificadas empleando criterios de petrografía y geoquímica orgánica para la sección estudiada de la Formación Cerrejón. En base a esta interpretación se concluye que la Formación Cerrejón fue depositada durante dos ciclos de fluctuaciones eustáticas y por lo tanto del nivel base.

La depositación de la sección estudiada de la Formación Cerrejón empieza con una superficie máxima de inundación (superficie de inundación número cuatro) la cual ocurre debido a una transgresión; es seguida de una superficie de regresión (ubicada en el tope del manto 102, pozo WRV-04774); sigue nuevamente una superficie de máxima inundación (numero cinco); a la cual sigue un estado regresivo identificado en el techo del manto 120 (pozo WRV-04752) y finalmente se termina con el ultimo evento de máxima inundación identificado como superficie de inundación numero siete.

Los ciclos planteados en el presente estudio en base a subidas y bajadas del nivel del mar y por lo tanto del espacio de acomodación, pueden usarse como buenas herramientas de correlación en la Formación Cerrejón para lograr entender mejor la estratigrafía de esta Formación y evitar correlaciones erróneas.

Las propiedades petrográficas y geoquímicas orgánicas de un manto de carbón están relacionadas a su ambiente de depositación. Por lo tanto, cambios en el nivel del mar afectan la preservación o destrucción de la turba.

Consecuentemente las características petrográficas y geoquímicas de un manto de carbón con techo marino presentan un incremento gradual, de base a tope, en el contenido de liptinita, desmocolinita, azufre, índice de gelificación, cenizas, pirita y materia mineral; y una tendencia decreciente desde la base al tope de la reflectancia de vitrinita, inertinita y contenido de materia volátil.

De las cuatro superficies de inundación identificadas por Bayota et al (2004), se corrobora la existencia de tres: las superficies identificadas con los números cuatro, cinco y siete. A estas superficies se encuentran mantos de carbón que presentan características geoquímicas y petrográficas propias de carbones formados en ambientes de depósito asociados al ascenso del nivel del mar.

## 9. REFERENCIAS

**Alves, R.G. & Ade, M. (1996)** Sequence stratigraphy and coal petrography applied to the Candiota Coal Field, Rio Grande do Sul, Brazil: A depositional model. *International Journal of Coal Geology*. Vol. 30, pp. 231-248.

**Bayona, G., Jaramillo, C., Rueda, M., Pardo, A., Christie, A. & Hernandez, G. (2004)** Important Paleotectonic and Chronostratigraphic Considerations of the Late Paleocene in the Northernmost Andes as Constrained by Paleocene Rocks in the Cerrejón Coal Mine, Guajira, Colombia. *Tercera Convención técnica de la ACGGP*.

**Bohacs, K. & Suter, J., 1997.** Sequence stratigraphic distribution of coaly rocks: fundamental controls and paralic examples. *AAPG Bulletin*. Vol. 81, pp.1612–1639.

**Buillit, N., Lallier-Verge`s, E., Pradier, B., Nicolas, G. (2002).** Coal petrographic genetic units in deltaic-plain deposits of the Campanian Mesa Verde Group (New Mexico, USA). *International Journal of Coal Geology*. Vol.51, pp.93-110.

**Coger, J.C. (2004)** Coal facies studies in the eastern United States. *International Journal of Coal Geology*. Vol. 58, pp. 3-22.

**Davies, R., Diessel, C., Howell, J., Flinta, S., Boydb, R. (2005)** Vertical and lateral variation in the petrography of the Upper Cretaceous Sunnyside coal of eastern Utah, USA—implications for the recognition of high-resolution accommodation changes in paralic coal seams. *International Journal of Coal Geology*. Vol. 61, pp. 13-33.

**De Porta, J. (1974)** Léxico estratigráfico internacional, Colombia. Union Internationale des sciences géologiques. Vol. 5, Fasciculo 4. Paris 621 paginas.

**Diessel, C. (1992).** Coal – Bearing Depositional Systems. Springer, Berlin, 721 pp.

**García, M. (2004)** Organic matter variations in a trasgressive system track: An example of the Almond Formation, Rock Springs Uplift, Wyoming (USA). Boletín de Geología. Vol. 26, No. 43, pp. 83-102.

**Holz, M., Kalkreuth, W. & Banerjee, I. (2002)** Sequence stratigraphy of paralic coal-bearing strata: an overview. International Journal of Coal Geology. Vol. 48, pp. 147-179.

**Ingeominas & Minercol (2004)** El carbón Colombiano, recursos, reservas y calidad. Bogotá, 470 pps.

**Julivert, M. (1968)** Léxico estratigráfico internacional, Colombia. Union Internationale des sciences géologiques. Vol. 5, Fasciculo 4a. Paris 574 paginas.

**Markic, M. & Sachsenhofer, R. F. (1997).** Petrographic composition and depositional environments of the Pliocene Velenje lignite seam (Slovenia). International Journal of Coal Geology. Vol. 33. pp. 229-254.

**Marquez, M. (2002).** Coal facies and depositional environments of the Aurora and Cabeza de Vaca Units, Pen~arroya–Belmez–Espiel Coalfield (Cordoba, Spain). International Journal of Coal Geology. Vol.48, pp. 197-216.

**Misiak, J. (2006)** Petrography and depositional environment of the No. 308 coal seam (Upper Silesian Coal Basin, Poland)—a new approach to maceral

quantification and facies analysis. *International Journal of Coal Geology*. Manuscrito en imprenta. 10 pps.

**Quintero, J. & Candela, S. (2004)** Cartografía de las zonas de clinker en las áreas de minería de la mina El Cerrejon, Albania, Guajira. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Tesis de pregrado, Bucaramanga, 64 pps.

**Silva, M. (2005)** Petrological and geochemical characterization of Candiota coal seams, Brazil — Implication for coal facies interpretations and coal rank. *International Journal of Coal Geology*. Vol. 64, pp. 217-238.

**Singh, M. & Kalkreuth, W. (2004)** Petrographic characteristics and depositional conditions of Permian coals of Pench, Kanhan, and Tawa Valley Coalfields of Satpura Basin, Madhya Pradesh, India. *International Journal of Coal Geology*. Vol. 59, pp. 209-243.

**Staub, J. (2002).** Marine flooding events and coal bed sequence architecture in southern West Virginia. *International Journal of Coal Geology*. Vol. 49, pp. 123-145.

## ANEXO 1. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD EN LA MUESTRA PARA ANÁLISIS DE CARBÓN Y COQUE

Según norma ASTM D 3173 – 73

- EQUIPO

1. Estufa de secado (a 110°C)
2. Crisol de porcelana con tapa (h=22 mm, ø = 44mm)

- PROCEDIMIENTO

1. Pesar un crisol (previamente secado a 110°C y enfriado en el desecador), con su tapa.
2. Poner en el crisol aproximadamente un gramo de carbón, tapar y pesar (estas operaciones se deben llevar a cabo lo más rápido posible).
3. Poner el crisol sin tapa en la estufa y calentar por una hora.
4. Abrir la estufa, tapar rápidamente el crisol, ponerlo en el desecador.
5. Pesar el carbón seco.

- CÁLCULOS

Calcular el porcentaje de humedad en la muestra (M1) con la siguiente formula:

$$M1 = \frac{m2 - m3}{m2 - m1} * 100$$

m1= peso del crisol, con su tapa, vacío (gramos).

m2=peso del crisol con carbón y tapa antes del secado (gramos).

M3= peso del crisol con carbón y tapa después del secado (gramos).

## **ANEXO 2. DETERMINACIÓN DE LA MATERIA VOLÁTIL EN LAS MUESTRAS DE CARBÓN Y COQUE**

Según norma ISO 562 – 74

- **EQUIPO**

1. Mufla
2. Crisol cilíndrico, con tapa muy precisa, de sílice fusa.
3. Soporte del crisol en alambre de acero resistente al calor.

- **REACTIVOS**

Benceno

- **PROCEDIMIENTO**

1. Calentar a  $900 \pm 10^{\circ}\text{C}$  por siete minutos el crisol con su tapa; enfriarlo sobre una placa metálica y luego en el desecador.
2. Pesar el crisol vacío con la tapa, y rápidamente pesar 1.00 – 1.01 gr. de muestra.
3. Poner la tapar y golpear suavemente el crisol sobre una superficie dura y limpia, hasta que la muestra forme una capa de espesor constante. Si la muestra es de coque añadir de dos a cuatro gotas de benceno.
4. Poner el crisol en la mufla (con la tapa) y dejarlo a  $900 \pm 10^{\circ}\text{C}$  exactamente por siete minutos.
5. Enfriar el crisol con la muestra como en el punto uno y pesar.

- **CÁLCULOS**

1. Porcentaje de materia volátil “aire seco”

$$MV_{ad} = \frac{m2 - m3}{m2 - m1} * 100 - M1$$

M1=humedad en la muestra(%)

m1=peso del crisol vacío con su tapa (gramos).

m2=peso del crisol y tapa con la muestra antes del calentamiento (gramos).

m3=peso del crisol con la muestra (y tapa) después del calentamiento (gramos).

2. Porcentaje de la materia volátil “d, af”:

$$MV_{d,af} = MV_{ad} * \frac{100}{100 - (M1 + A)}$$

A=Porcentaje de cenizas.

## ANEXO 3.DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE HINCHAMIENTO LIBRE DEL CARBÓN

Método del calentamiento con gas, según norma ASTM D 720-67

- EQUIPO

1. Crisol de sílice translucido, con tapa plana de sílice provista de una anillo para la manipulación con las siguientes características:

Peso, g	11.0 – 12.75
Diámetro interno de la base, mm	11
Diámetro externo superior, mm	41.0 – 0.75
Capacidad, cm <sup>3</sup>	16.0 – 17.5

2. Ensamblaje del mechero

- 2.1 Mechero (del tipo Tecla o Meker).

- 2.2 Soporte triangular de sílice para el crisol.

- 2.3 Tubo de cemento de asbesto, con tres ranuras de 1 pulgada, donde se pone el soporte de crisol.

- 2.4 Soporte del tubo aislante, que permite regular la distancia entre el crisol y el mechero.

3. Medidor de flujo

4. Termocupla y potenciómetro

5. peso de 500g

6. Tubo de visión.

- CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

1. Arreglar el mechero, el tubo de asbesto y el soporte del crisol. La distancia entre el fondo del crisol y la malla del mechero tiene que ser de aproximadamente 10 mm.
2. Prender el mechero por cerca de 15 minutos para permitir al tubo aislante alcanzar una temperatura de equilibrio.
3. Poner sobre el soporte un crisol, cubierto con una tapa con un hueco redondo al centro. A través de este hueco se introduce en el crisol una termocupla, cuya unión caliente tiene que tocar el fondo del crisol. Conectado a la termocupla hay un potenciómetro que permite determinar la temperatura del fondo del crisol.
4. Regular el flujo de gas de manera tal que la superficie interna del fondo del crisol (frío al comienzo del calentamiento) alcance:  
 $800 \pm 10^{\circ}\text{C}$  en minuto y medio y  $820 \pm 5^{\circ}\text{C}$  en dos minutos y medio.

- PROCEDIMIENTO

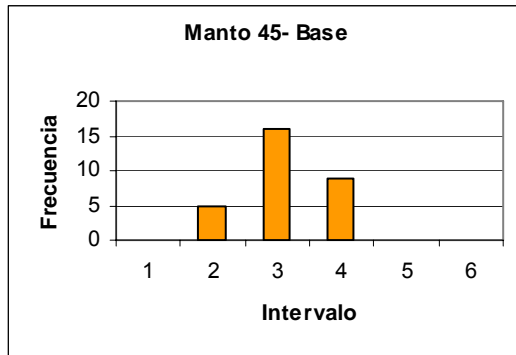
1. Pesar un gramo de carbón en un crisol frío; nivelarlo golpeando suavemente el crisol 12 veces sobre una superficie sólida y rotándolo entre un golpe y otro; tapar el crisol.
2. Poner el crisol sobre el soporte triangular directamente sobre la llama del mechero. Calentar a la rata con que se calibra el equipo hasta cuando no se observe más liberación de materia volátil, pero en todo caso no menos de dos minutos y medio.
3. Extraer cuidadosamente del crisol el botón de coque y el carbón residuo.
4. Hacer de la misma manera tres botones de coque para cada muestra de carbón.

- EXAMEN DEL BOTÓN DE COQUE
  1. Si el residuo de coque no es coherente (polvoriento), se atribuye al carbón un índice de hinchamiento igual a cero.
  2. Si el residuo de coque es coherente, pero no hinchado, ponerlo sobre una superficie plana debajo del peso de 500 g, si no se parte en mas de dos o tres pedazos duros, el índice de hinchamiento será de uno (1) se desintegra el índice de hinchamiento será de medio (1/2).
  3. Si el botón de coque presenta hinchamiento compararlo con los perfiles estándar de la figura 3, de la siguiente manera:
    - Observar el botón con el tubo de visión como en la figura 2.
    - Rotar el botón sobre su eje hasta obtener la sección con máxima área.
    - Comparar con los perfiles estándar y atribuir al botón el índice correspondiente al perfil mas parecido.
  4. Algunos carbones dan una forma no comparable a la de los perfiles estándar, en este caso:
    - Poner el botón de perfil sobre un papel milimetrado.
    - Trazar sobre el papel el perfil del botón mirando a través del tubo de visión.
    - Contar los mm<sup>2</sup> dentro en el perfil trazado sobre el papel.
    - Utilizar la grafica reportada en la figura 4 para deducir el índice de hinchamiento del área medida.
  5. Reportar el índice de hinchamiento promedio de una serie de tres determinaciones.

## ANEXO 4. HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA EN VALORES DE REFLECTANCIA DE VITRINITA

Histogramas de frecuencia en valores de reflectancia de vitrinita para las muestras tomadas. Los intervalos de reflectancia empleados son los siguientes:

Intervalo	Rango Ro
1	0,30-0,349
2	0,350-,399
3	0.40-0,449
4	0.45-0,499
5	0.50-0,549
6	0.55-0,599



Pozo: WRV-04774

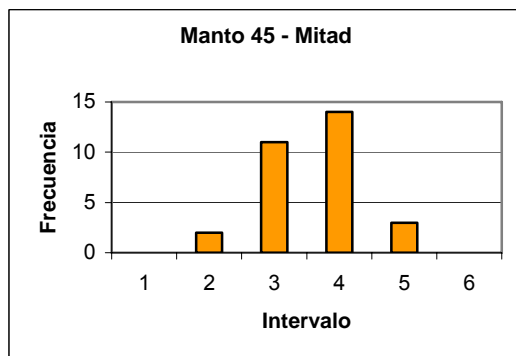
Profundidad: 352.95 m

Valor Mínimo Ro (%): 0.370

Valor Máximo Ro (%): 0.474

Valor promedio Ro (%): 0.430

Desviación estándar: 0.028



Pozo: WRV-04774

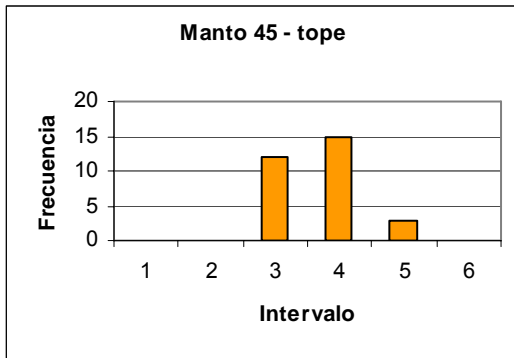
Profundidad: 349.50 m

Valor mínimo Ro (%): 0.389

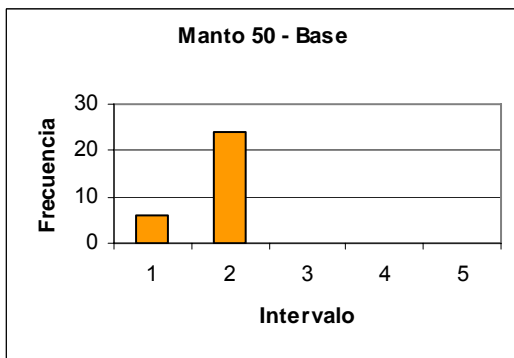
Valor máximo Ro (%): 0.414

Valor promedio Ro (%): 0.455

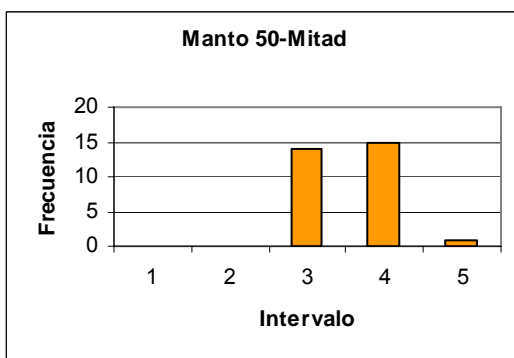
Desviación estándar: 0.029



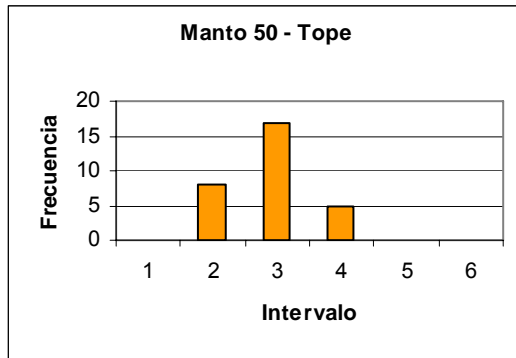
Pozo: WRV-04774  
 Profundidad: 347.44 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.409  
 Valor máximo Ro (%): 0.523  
 Valor promedio Ro (%): 0.461  
 Desviación estándar: 0.028



Pozo: WRV-04774  
 Profundidad: 328.00 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.376  
 Valor máximo Ro (%): 0.449  
 Valor promedio Ro (%): 0.419  
 Desviación estándar: 0.021



Pozo: WRV-04774  
 Profundidad: 326.00 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.451  
 Valor máximo Ro (%): 0.556  
 Valor promedio Ro (%): 0.507  
 Desviación estándar: 0.028



Pozo: WRV-04774

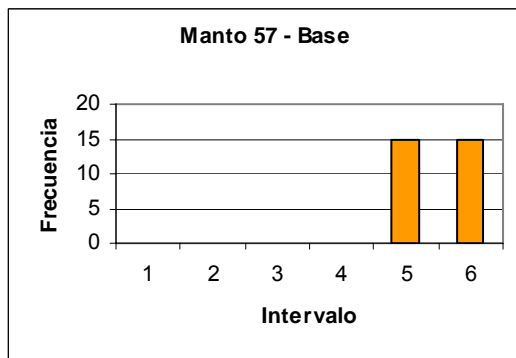
Profundidad: 324.59 m

Valor mínimo Ro (%): 0.385

Valor máximo Ro (%): 0.483

Valor promedio Ro (%): 0.427

Desviación estándar: 0.029



Pozo: WRV-04774

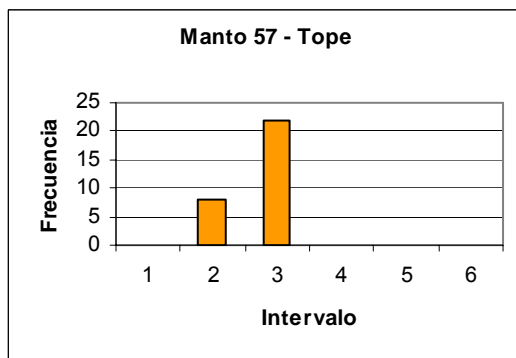
Profundidad: 301.63 m

Valor mínimo Ro (%): 0.512

Valor máximo Ro (%): 0.590

Valor promedio Ro (%): 0.547

Desviación estándar: 0.019



Pozo: WRV-04774

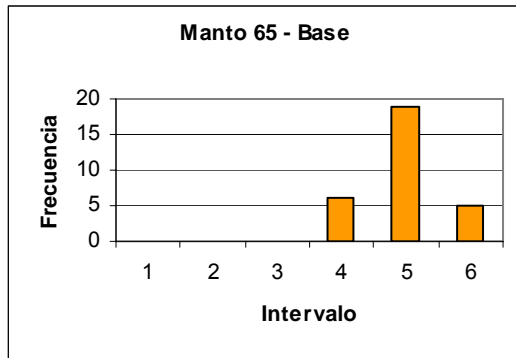
Profundidad: 302.40 m

Valor mínimo Ro (%): 0.377

Valor máximo Ro (%): 0.483

Valor promedio Ro (%): 0.411

Desviación estándar: 0.016



Pozo: WRV-04774

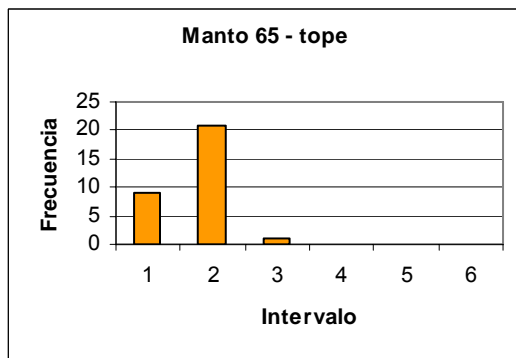
Profundidad: 287.70 m

Valor mínimo Ro (%): 0.479

Valor máximo Ro (%): 0.587

Valor promedio Ro (%): 0.530

Desviación estándar: 0.028



Pozo: WRV-04774

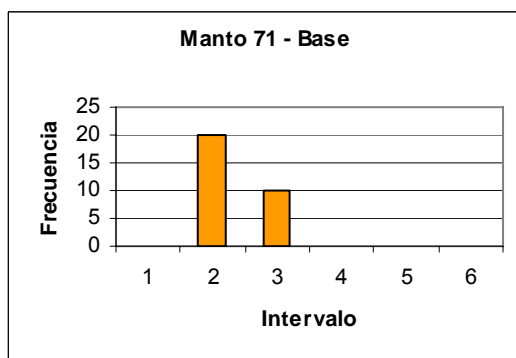
Profundidad Ro (%): 286.80 m

Valor mínimo Ro (%): 0.327

Valor máximo Ro (%): 0.395

Valor promedio Ro (%): 0.360

Desviación estándar: 0.017



Pozo: WRV-04774

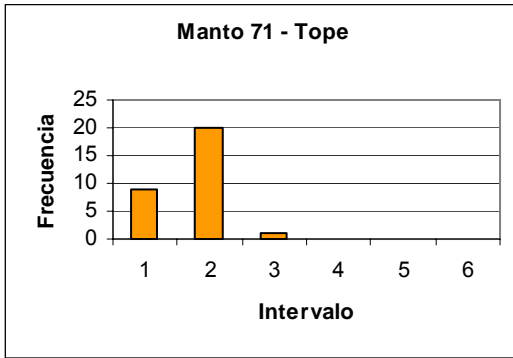
Profundidad: 257.45 m

Valor mínimo Ro (%): 0.363

Valor máximo Ro (%): 0.433

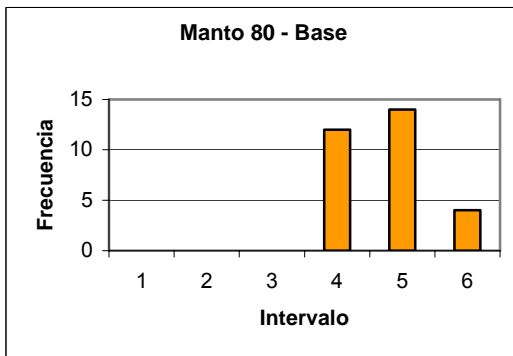
Valor promedio Ro (%): 0.394

Desviación estándar: 0.018



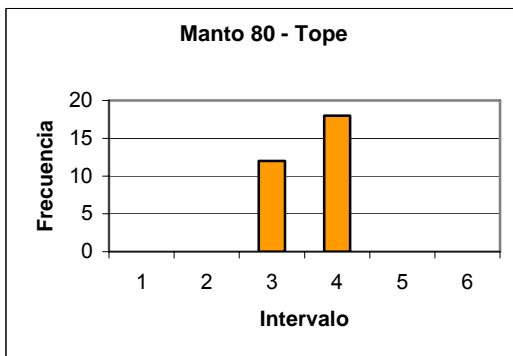
Pozo: WRV-04774  
 Profundidad: 253.70 m

Valor mínimo Ro (%): 0.330  
 Valor máximo Ro (%): 0.414  
 Valor promedio Ro (%): 0.636  
 Desviación estándar: 0.022



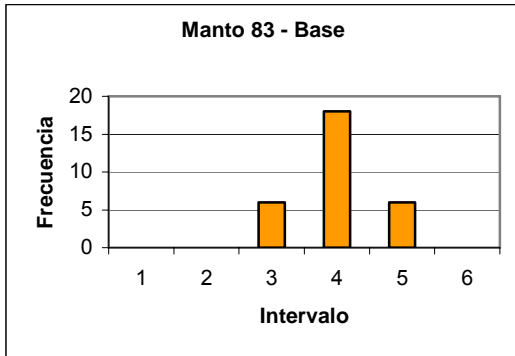
Pozo: WRV-04774  
 Profundidad: 217.55 m

Valor mínimo Ro (%): 0.474  
 Valor máximo Ro (%): 0.585  
 Valor promedio Ro (%): 0.513  
 Desviación estándar: 0.029



Pozo: WRV-04774  
 Profundidad: 216.49 m

Valor mínimo Ro (%): 0.414  
 Valor máximo Ro (%): 0.487  
 Valor promedio Ro (%): 0.454  
 Desviación estándar: 0.021



Pozo: WRV-04774

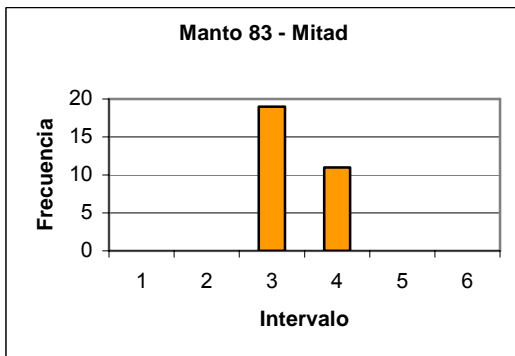
Profundidad: 193.00 m

Valor mínimo Ro (%): 0.423

Valor máximo Ro (%): 0.527

Valor promedio Ro (%): 0.474

Desviación estándar: 0.027



Pozo: WRV-04774

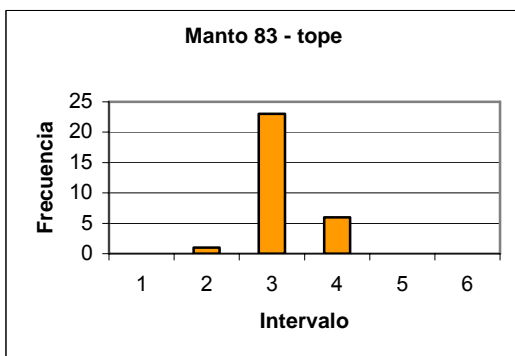
Profundidad: 192.90 m

Valor mínimo Ro (%): 0.408

Valor máximo Ro (%): 0.485

Valor promedio Ro (%): 0.441

Desviación estándar: 0.022



Pozo: WRV-04774

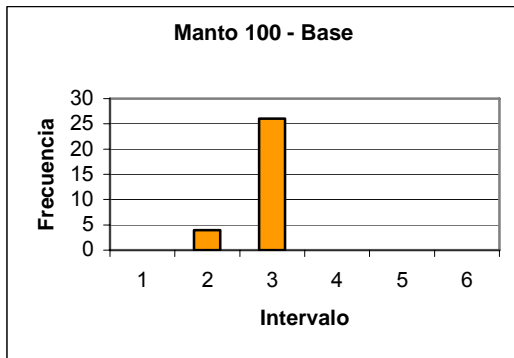
Profundidad: 191.56 m

Valor mínimo Ro (%): 0.400

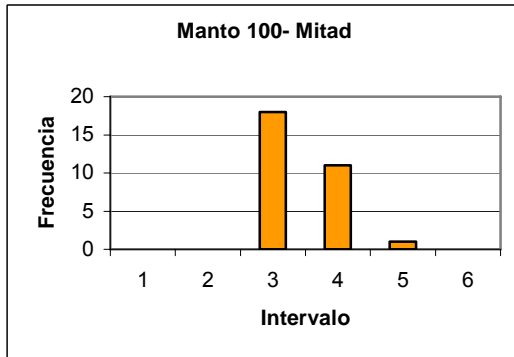
Valor máximo Ro (%): 0.474

Valor promedio Ro (%): 0.435

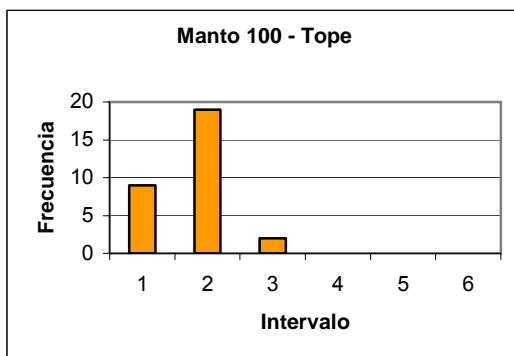
Desviación estándar: 0.020



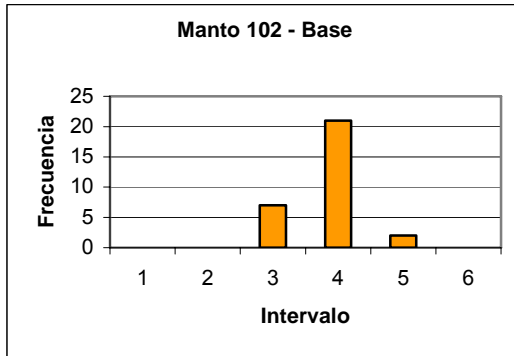
Pozo: WRV-04774  
 Profundidad: 136.45 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.375  
 Valor máximo Ro (%): 0.448  
 Valor promedio Ro (%): 0.414  
 Desviación estándar: 0.016



Pozo: WRV-04774  
 Profundidad: 135.98 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.414  
 Valor máximo Ro (%): 0.512  
 Valor promedio Ro (%): 0.447  
 Desviación estándar: 0.024



Pozo: WRV-04774  
 Profundidad: 133.64 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.310  
 Valor máximo Ro (%): 0.422  
 Valor promedio Ro (%): 0.361  
 Desviación estándar: 0.025



Pozo: WRV-04774

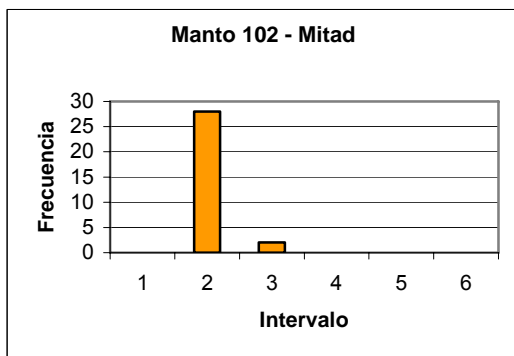
Profundidad: 109.14 m

Valor mínimo Ro (%): 0.459

Valor máximo Ro (%): 0.592

Valor promedio Ro (%): 0.516

Desviación estándar: 0.028



Pozo: WRV-04774

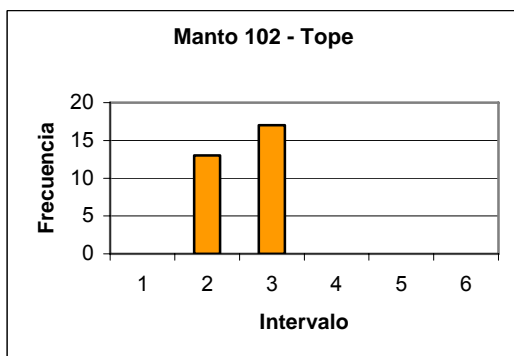
Profundidad: 108.30 m

Valor mínimo Ro (%): 0.358

Valor máximo Ro (%): 0.403

Valor promedio Ro (%): 0.377

Desviación estándar: 0.012



Pozo: WRV-04774

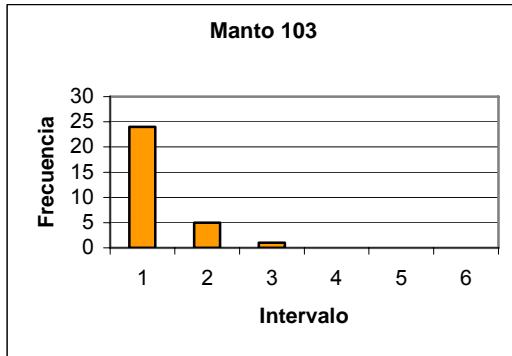
Profundidad: 107.16 m

Valor mínimo Ro (%): 0.368

Valor máximo Ro (%): 0.432

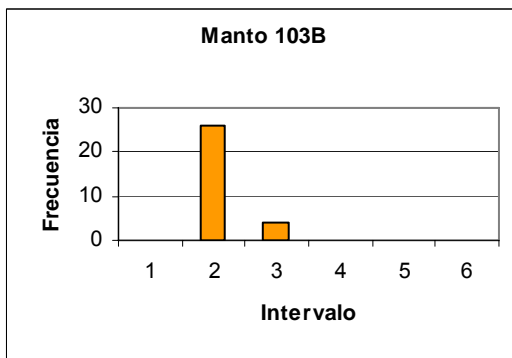
Valor promedio Ro (%): 0.401

Desviación estándar: 0.020



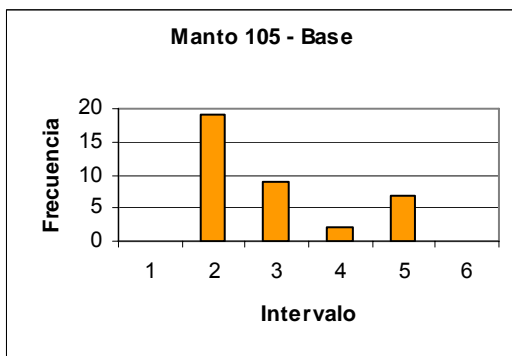
Pozo: WRV-04774  
 Profundidad: 97.20 m

Valor mínimo Ro (%): 0.303  
 Valor máximo Ro (%): 0.406  
 Valor promedio Ro (%): 0.336  
 Desviación estándar: 0.023



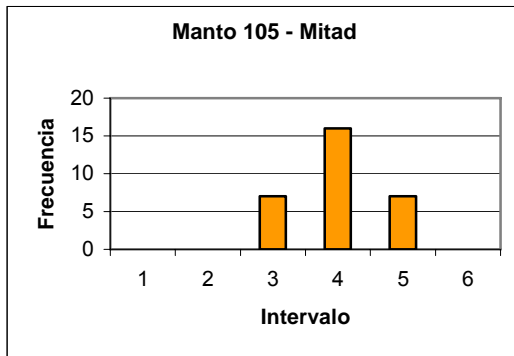
Pozo: WRV-04774  
 Profundidad: 91.96 m

Valor mínimo Ro (%): 0.350  
 Valor máximo Ro (%): 0.408  
 Valor promedio Ro (%): 0.375  
 Desviación estándar: 0.016



Pozo: WRV-04774  
 Profundidad: 62.82 m

Valor mínimo Ro (%): 0.358  
 Valor máximo Ro (%): 0.466  
 Valor promedio Ro (%): 0.395  
 Desviación estándar: 0.028



Pozo: WRV-04774

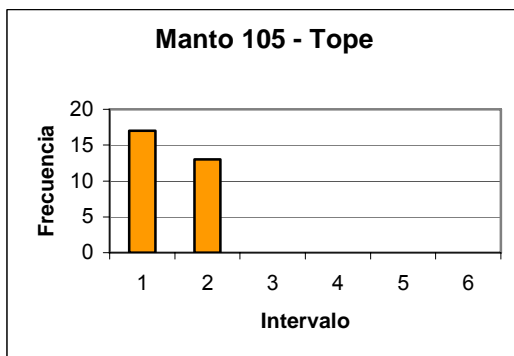
Profundidad: 62.18 m

Valor mínimo Ro (%): 0.434

Valor máximo Ro (%): 0.528

Valor promedio Ro (%): 0.476

Desviación estándar: 0.027



Pozo: WRV-04774

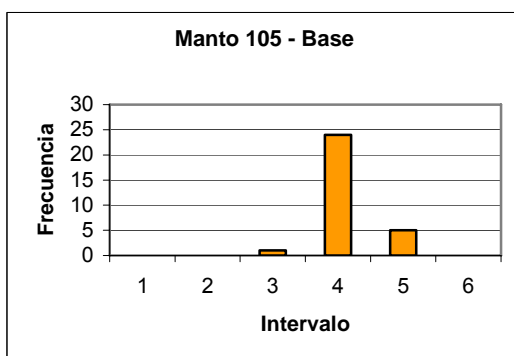
Profundidad: 60.05 m

Valor mínimo Ro (%): 0.326

Valor máximo Ro (%): 0.385

Valor promedio Ro (%): 0.350

Desviación estándar: 0.017



Pozo: WRV-04752

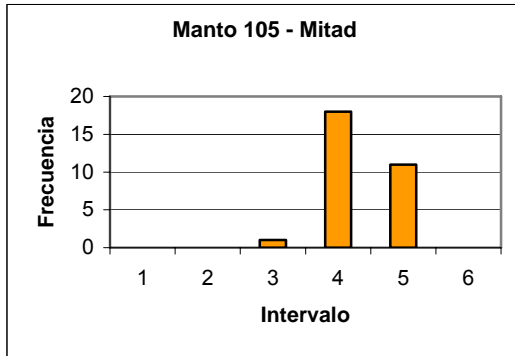
Profundidad: 338.29 m

Valor mínimo Ro (%): 0.440

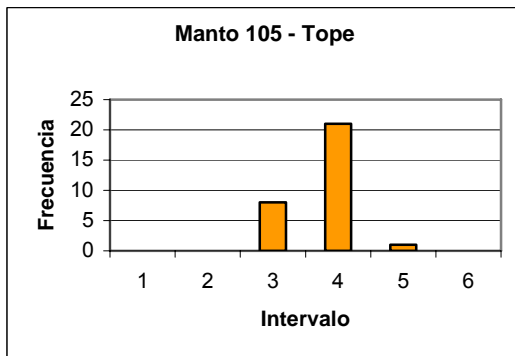
Valor máximo Ro (%): 0.523

Valor promedio Ro (%): 0.483

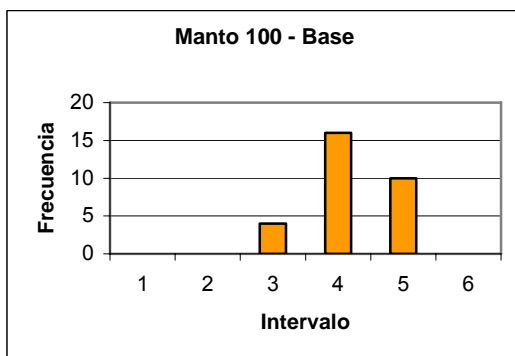
Desviación estándar: 0.017



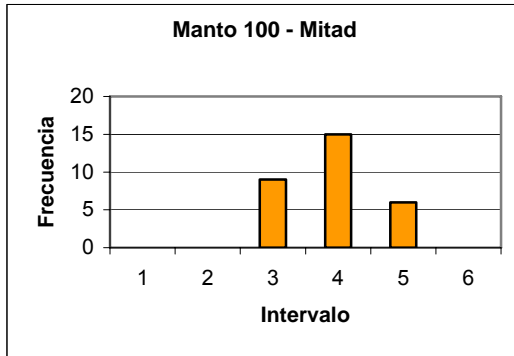
Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 336.20 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.446  
 Valor máximo Ro (%): 0.548  
 Valor promedio Ro (%): 0.492  
 Desviación estándar: 0.027



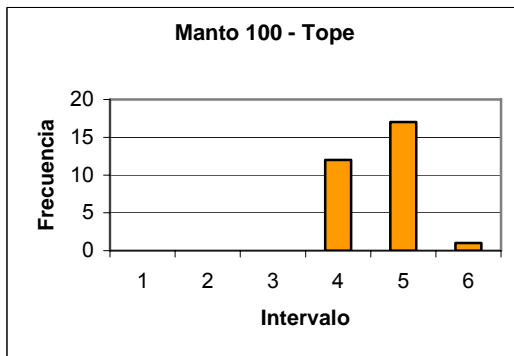
Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 334.70 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.418  
 Valor máximo Ro (%): 0.516  
 Valor promedio Ro (%): 0.464  
 Desviación estándar: 0.027



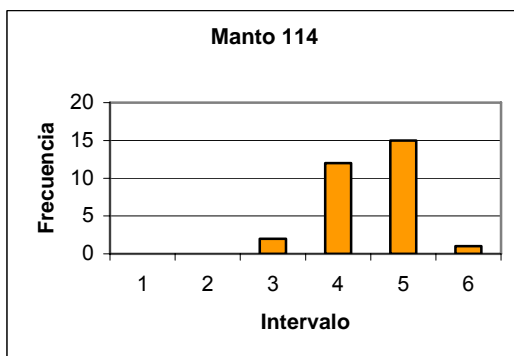
Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 316.34 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.411  
 Valor máximo Ro (%): 0.522  
 Valor promedio Ro (%): 0.482  
 Desviación estándar: 0.027



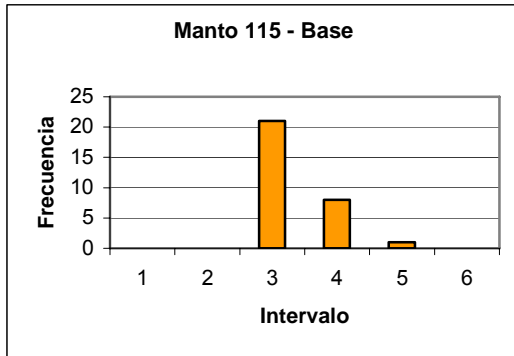
Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 311.08 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.425  
 Valor máximo Ro (%): 0.516  
 Valor promedio Ro (%): 0.468  
 Desviación estándar: 0.028



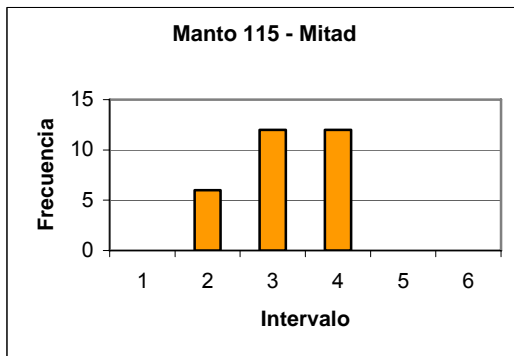
Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 308.53 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.473  
 Valor máximo Ro (%): 0.562  
 Valor promedio Ro (%): 0.503  
 Desviación estándar: 0.019



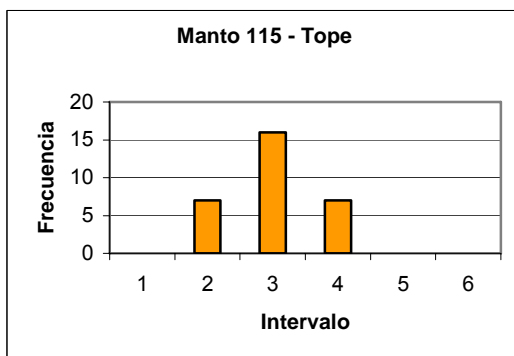
Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 272.41 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.422  
 Valor máximo Ro (%): 0.559  
 Valor promedio Ro (%): 0.499  
 Desviación estándar: 0.026



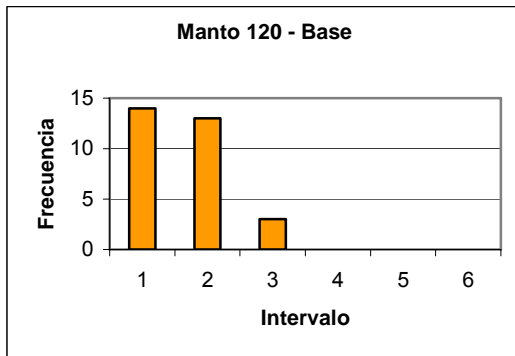
Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 258.95 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.405  
 Valor máximo Ro (%): 0.505  
 Valor promedio Ro (%): 0.438  
 Desviación estándar: 0.024



Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 258.59 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.382  
 Valor máximo Ro (%): 0.498  
 Valor promedio Ro (%): 0.436  
 Desviación estándar: 0.028



Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 254.96 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.382  
 Valor máximo Ro (%): 0.484  
 Valor promedio Ro (%): 0.429  
 Desviación estándar: 0.029



Pozo: WRV-04752

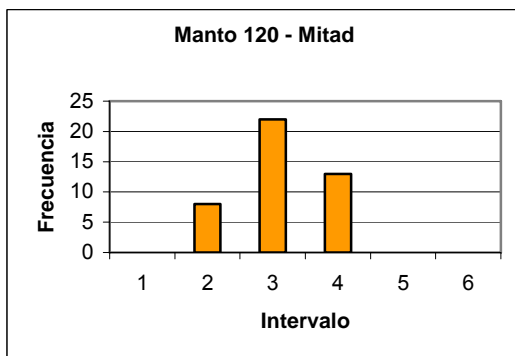
Profundidad: 209.50 m

Valor mínimo Ro (%): 0.317

Valor máximo Ro (%): 0.424

Valor promedio Ro (%): 0.357

Desviación estándar: 0.030



Pozo: WRV-04752

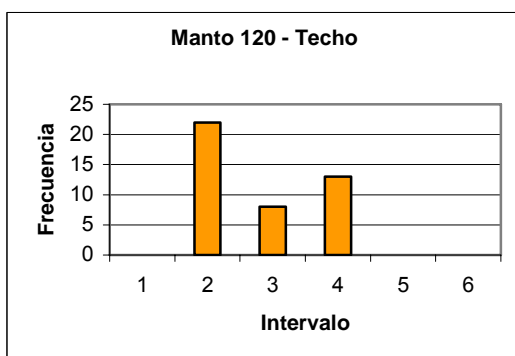
Profundidad: 206.5 m

Valor mínimo Ro (%): 0.379

Valor máximo Ro (%): 0.437

Valor promedio Ro (%): 0.412

Desviación estándar: 0.017



Pozo: WRV-04752

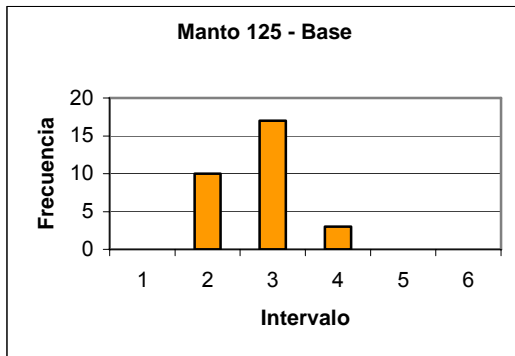
Profundidad: 204.30 m

Valor mínimo Ro (%): 0.352

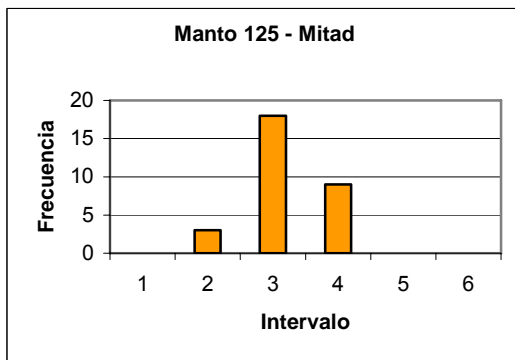
Valor máximo Ro (%): 0.443

Valor promedio Ro (%): 0.385

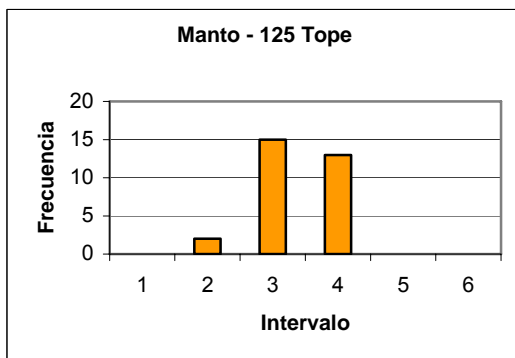
Desviación estándar: 0.020



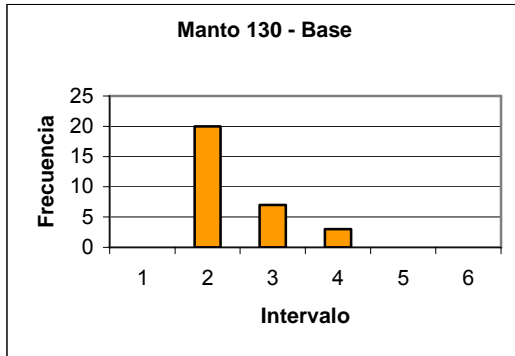
Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 194.54 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.386  
 Valor máximo Ro (%): 0.498  
 Valor promedio Ro (%): 0.418  
 Desviación estándar: 0.029



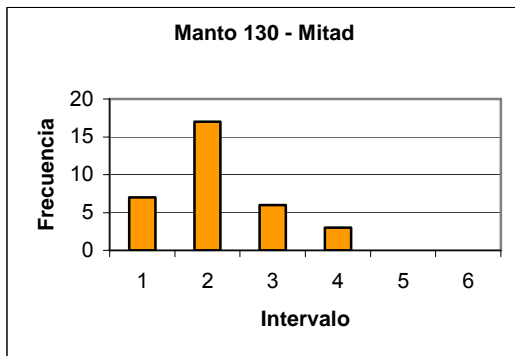
Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 193.14 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.374  
 Valor máximo Ro (%): 0.488  
 Valor promedio Ro (%): 0.433  
 Desviación estándar: 0.026



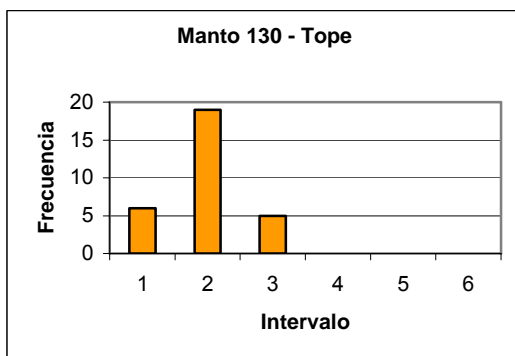
Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 190.74 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.378  
 Valor máximo Ro (%): 0.498  
 Valor promedio Ro (%): 0.441  
 Desviación estándar: 0.027



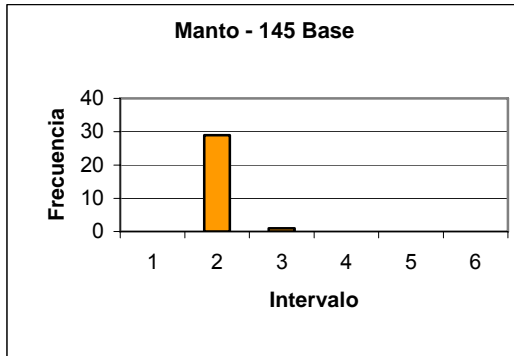
Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 170.21 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.359  
 Valor máximo Ro (%): 0.468  
 Valor promedio Ro (%): 0.397  
 Desviación estándar: 0.029



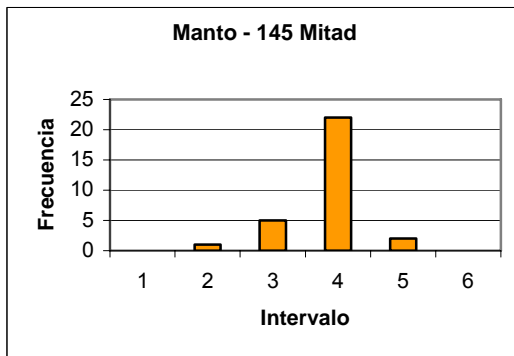
Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 168.55 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.333  
 Valor máximo Ro (%): 0.407  
 Valor promedio Ro (%): 0.371  
 Desviación estándar: 0.024



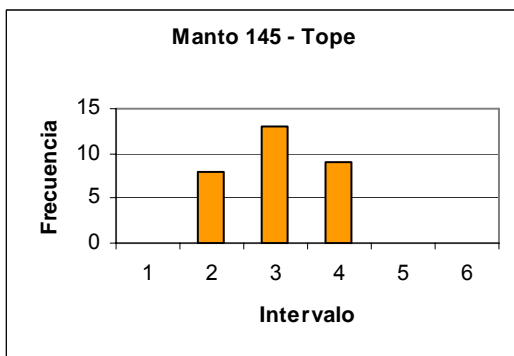
Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 165.95 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.333  
 Valor máximo Ro (%): 0.427  
 Valor promedio Ro (%): 0.379  
 Desviación estándar: 0.024



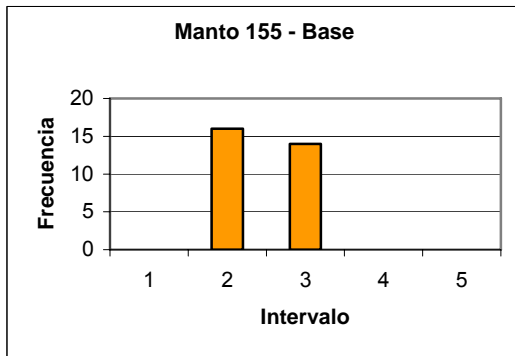
Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 102.61m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.413  
 Valor máximo Ro (%): 0.500  
 Valor promedio Ro (%): 0.448  
 Desviación estándar: 0.023



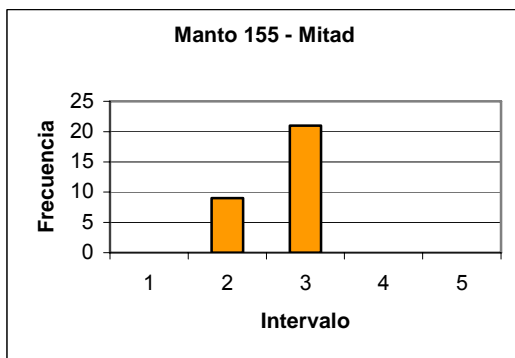
Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 102.12 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.391  
 Valor máximo Ro (%): 0.503  
 Valor promedio Ro (%): 0.462  
 Desviación estándar: 0.029



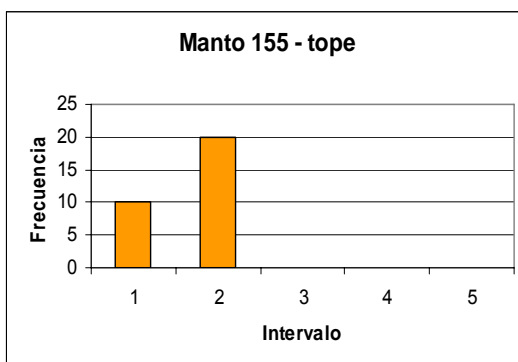
Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 98.93 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.375  
 Valor máximo Ro (%): 0.475  
 Valor promedio Ro (%): 0.425  
 Desviación estándar: 0.029



Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 53.42 m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.402  
 Valor máximo Ro (%): 0.501  
 Valor promedio Ro (%): 0.451  
 Desviación estándar: 0.028

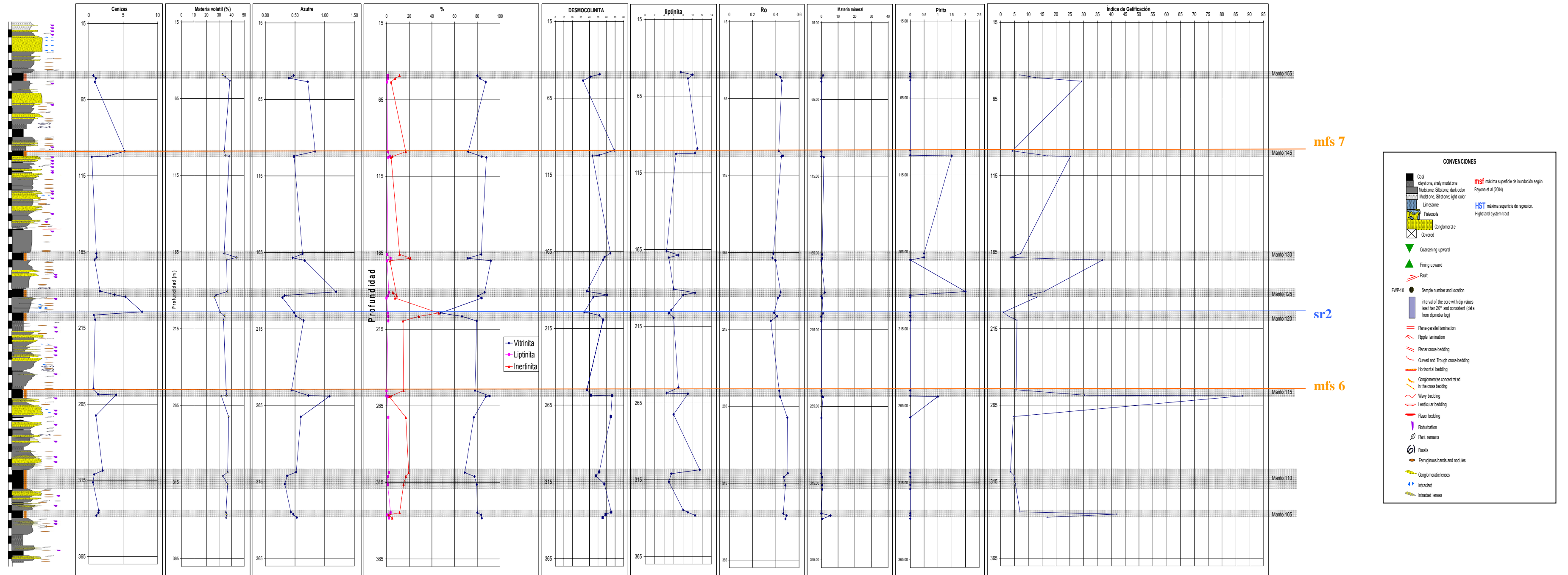


Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 51.06m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.404  
 Valor máximo Ro (%): 0.483  
 Valor promedio Ro (%): 0.441  
 Desviación estándar: 0.019



Pozo: WRV-04752  
 Profundidad: 49.27m  
 Valor mínimo Ro (%): 0.347  
 Valor máximo Ro (%): 0.435  
 Valor promedio Ro (%): 0.402  
 Desviación estándar: 0.018

ANEXO 5. ANÁLISIS GEOQUÍMICOS Y PETROGRÁFICOS EN EL POZO WRV-04752



ANEXO 6. ANÁLISIS GEOQUÍMICOS Y PETROGRÁFICOS EN EL POZO WRV-04774

