



Thèse

2006

Open Access

This version of the publication is provided by the author(s) and made available in accordance with the copyright holder(s).

Contribución de la materia orgánica sedimentaria a la determinación del paleoambiente y del potencial de generación de hidrocarburos en los carbones de la Formación Amagá (Colombia)

Blandón Montes, Astrid del Socorro

How to cite

BLANDÓN MONTES, Astrid del Socorro. Contribución de la materia orgánica sedimentaria a la determinación del paleoambiente y del potencial de generación de hidrocarburos en los carbones de la Formación Amagá (Colombia). Doctoral Thesis, 2006. doi: 10.13097/archive-ouverte/unige:2161

This publication URL: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:2161>

Publication DOI: [10.13097/archive-ouverte/unige:2161](https://doi.org/10.13097/archive-ouverte/unige:2161)

UNIVERSITÉ DE GENÈVE
Département de géologie et paléontologie

FACULTÉ DES SCIENCES
Professeur Georges GORIN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
Sede Medellín

FACULTAD DE CIENCIAS
Professeur Oscar RUIZ

**CONTRIBUCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA
SEDIMENTARIA A LA DETERMINACIÓN DEL
PALEOAMBIENTE Y DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN
DE HIDROCARBUROS EN LOS CARBONES DE LA
FORMACIÓN AMAGÁ (COLOMBIA)**

**Contribution of Sedimentary Organic Matter to the
Determination of Palaeoenvironment and Hydrocarbon
Generation Potential of Coals in the Amagá Formation
(Colombia)**

THÈSE

présentée à la Faculté des sciences de l'Université de Genève
pour obtenir le grade de Docteur ès sciences, mention sciences de la Terre

par

Astrid del Socorro BLANDÓN MONTES

de
Medellin (Colombie)

Thèse N° 3806

GENÈVE
Atelier de reproduction de la Section de Physique
2007

La Faculté des sciences, sur le préavis de Messieurs G. GORIN, professeur ordinaire et directeur de thèse (Département de géologie et de paléontologie), O. RUIZ BEDOYA (Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ciencias, Medellin, Colombia), professeur et codirecteur de thèse, D. ARIZTEGUI, docteur (Département de géologie et de paléontologie), et L. MARTINEZ, professeur (Université Henri Poincaré, Nancy 1, Faculté des sciences, Vandoeuvre les Nancy, France) autorise l'impression de la présente thèse, sans exprimer d'opinion sur les propositions qui y sont énoncées.

Genève, le 30 novembre 2006

Thèse - 3806 -



Le Doyen, Pierre SPIERER

Blandón Montes, A.: Contribución de la materia orgánica sedimentaria a la determinación del paleoambiente y del potencial de generación de hidrocarburos en los carbones de la Formación Amagá (Colombia).
Terre & Environnement, vol. 67, xv + 183 pp. (2007)

ISBN 2-940153-66-3

Section des Sciences de la Terre, Université de Genève, 13 rue des Maraîchers, CH-1205 Genève, Suisse
Téléphone ++41-22-702.61.11 - Fax ++41-22-320.57.32
<http://www.unige.ch/sciences/terre/>

RESUMEN

Los objetivos de este estudio consisten en aplicar el análisis de palinofacies a la determinación del paleoambiente y establecer el potencial de generación de hidrocarburos en los carbones y lutitas asociadas del Miembro Sabaletas de la Formación Amagá, de edad Paleógeno, ubicada al sur del departamento de Antioquia en Colombia. Se tomaron muestras de las asociaciones de litotipos (plies) de ocho mantos de carbón, a los cuales se les efectuaron los análisis próximos, elementales, de pirólisis Rock-Eval, análisis petrográfico de secciones pulidas (tanto en luz reflejada normal como fluorescente) y análisis de palinofacies obtenidas mediante el método modificado de Shulze implementado para los carbones y lutitas carbonosas. Las secciones delgadas obtenidas se observaron en luz transmitida normal y fluorescente. Se efectuaron análisis de grandes grupos de esporomorfos, extracción de bitumen y cromatografía líquida, difracción de rayos X a las lutitas asociadas a los mantos de carbón. Finalmente se hizo el procesamiento digital de las imágenes de petrografía en luz fluorescente de uno de los mantos.

Los carbones son sub-bituminosos (materia volátil > 40%) y $R_o < 0.4$, tienen bajos contenidos de cenizas (<5%), y son pobres en azufre < 0.5%. Los datos de pirólisis indican que los plies de carbones tienen índices de hidrógeno que varían entre 64 y 443, el S1 de pirólisis Rock-Eval esta entre 0.11 y 3.73, y el S2 entre 40 y 289 mg. HC/gr. de roca. El kerógeno corresponde al tipo II para la mayoría de las muestras, pero también hay algunos plies que caen en el tipo III.

Los datos petrográficos indican que la mayoría de las muestras son ricas en vitrinita (> 70%) y liptinitas (> 15%) y pobres en inertinitas (< 5%). Dentro de los macerales vitriniticos predominan la colotelinita y la colodetrinita; en los macerales liptiníticos se tienen liptodetrinitas, esporinitas y cutinitas y en los macerales inertiníticos se observa principalmente funginitas e inertodetrinitas.

Se establecieron las **equivalencias entre los componentes observados en las preparaciones de palinofacies y los macerales vistos en petrografía**. Y se encontró que con las palinofacies es más fácil determinar las condiciones ambientales bajo las cuales se deposita la materia orgánica, llegando a la conclusión que los carbones estudiados se generaron en zonas bajas, con altos niveles freáticos y en condiciones estuarinas o de delta inferior, donde se acumuló gran cantidad de materia orgánica terrestre y abierto a incursiones marinas como lo respaldan principalmente la presencia de *Zonocostites ramonae* y algunos dinoflagelados. Se confirman las observaciones hechas por Muñoz et al. (2004), en donde en un mismo manto de carbón se hallan evidencias de formaciones vegetales inundadas muy distintas. Y que en los trópicos la migración de la vegetación puede ser rápida al cambiar las condiciones ambientales, las cuales están directamente relacionadas a fluctuaciones en el nivel freático. Igualmente se verifica que las lutitas presentan porcentajes de granos de polen de palmas en mayor cantidad que los carbones.

Los **análisis próximos** y en especial el contenido de humedad y materias volátiles de cada uno de los plies permite discernir acerca del **comportamiento de la materia orgánica como roca fuente de petróleo**, ya que se encontró que las muestras de carbón que presentan menor humedad y mayor contenido de materias volátiles presentan las mejores características como rocas fuentes, igualmente las lutitas que presentan menores porcentajes de humedad y mayores contenidos de materias volátiles, tienen buenos potenciales de generación, es decir S1+S2 de pirólisis Rock-Eval altos.

En general los carbones aunque tienen índices de hidrógeno normalmente menores que algunas de las lutitas, presentan un **mayor potencial de generación de hidrocarburos**, debido a su notablemente mayor contenido de materia orgánica. También se encontró que para que una lutita pueda tener buen potencial como la mayoría de los carbones estudiados, debe tener muy alto índice de hidrógeno y un contenido de materia orgánica mayor del 10%. En análisis de imagen la relación Verde/Rojo se puede usar como un parámetro adicional para evaluar el potencial de generación de las muestras de carbón; especialmente cuando existen grandes diferencias entre ellas.

El inicio de generación a menores temperaturas de las que normalmente se cree implica que cuando se estudian muestras que están dentro de la ventana de generación (0.6 – 1.3 Ro), en el caso de los carbones ya habrían generado grandes cantidades de hidrocarburos y las muestras quedarían empobrecidas tanto en HC líquidos como gaseosos. Por esta razón, para evaluar verdaderamente el potencial de generación en los carbones y lutitas muy ricas en materia orgánica, es necesario hacerlo en muestras de baja madurez (0.4 - 0.45 Ro).

La metodología empleada en este trabajo para estudiar detalladamente los mantos de carbón permitió establecer que en la mayoría de los mantos el **contenido de azufre total** se incrementa hacia el techo de estos, mientras que hacia la base los porcentajes son normalmente bajos (<0.5%). Esta información sería de gran ayuda para los pequeños mineros, ya que podrían extraer el carbón sin incluir la parte del techo que es la que tiene mayor porcentaje de azufre, además sería muy beneficioso para las empresas consumidoras de este carbón, porque aparte de no contaminar el ambiente con óxidos de azufre, disminuirían los problemas de corrosión en las calderas.

Finalmente, se comprueba que los análisis de palinofacies dan información mucho más detallada que permite discernir acerca de **la similitud o no de un manto de carbón**. Por esta razón con los análisis de palinofacies y esporomorfos se concluye que los mantos de carbón analizados son diferentes o existen variaciones importantes en las condiciones de depositación no solo verticalmente sino también lateralmente.

ABSTRACT

The objectives of this study are to apply palynofacies analysis to the determination of the palaeoenvironment and to establish the hydrocarbon generation potential of coals and associated clays in the Sabaletas Member of the Amagá Formation, located to the south of the Antioquia Department in Colombia. The associations of lithotypes (plies) were sampled in eight coal seams within the studied basin. The following analyses were carried out: proximal and ultimate analyses, Rock-eval pyrolysis, petrographic analysis of polished sections (in reflected normal and fluorescent lights), palynofacies analysis in normal transmitted and reflected fluorescent lights of slides prepared using a Schulze-modified method for the coals and associated clays. Sporomorphs were grouped into vegetation categories, bitumen extracts from coals were taken and studied in liquid chromatography, and associated clays were studied through X-ray diffraction. Finally, image analysis of petrographic sections in reflected fluorescent light was carried out in one of the seams.

Coals are sub-bituminous (volatile matter > 40%) and thermally immature ($R_o < 0.4$), they have a low ash content (<5%), and are poor in sulphur (< 0.5%). Coal plies have hydrogen indices varying between 64 and 443, S1 of Rock-Eval pyrolysis between 0.11 and 3.73 and S2 between 40 and 289 mg HC/g Rock. Most of the samples contain Type-II kerogen, and some of them Type-III.

Petrographic data show that most samples are rich in vitrinite (> 70%) and liptinites (> 15%) and poor in inertinites (< 5%). Vitrinite macerals are dominated by telocolinite and colodetrinite. Liptinite macerals contain liptodetrinites, sporinites and cutinites, whereas inertinite macerals are mainly represented by funginites and inertodetrinites.

A good correlation was established between palynofacies constituents and petrographic macerals. Palynofacies observations make it easier than petrography to determine paleoenvironmental conditions at the time of deposition of organic matter. Studied coals were deposited in low-altitude zones in estuarine or deltaic conditions, where the water table was high. A large amount of terrestrial organic matter was accumulated, locally influenced by marine incursions as indicated by the presence of *Zonocostites ramonae* and some dinoflagellates. The interpretation confirms that of Muñoz et al. (2004), showing evidences that within the same coal seam exist very distinct flooded-vegetation associations. This confirms that in the tropics the vegetation can migrate rapidly as a response to environmental changes, which are directly related to variations in the water table. In the same way, observations confirm that palm pollen is more abundant in associated clays, which correspond to periods of flooding.

Proximate analysis, especially the content in moisture and volatile matter in each ply, is a good tool to **assess the potential of organic matter as petroleum source rock**: coal samples with the lowest moisture level and the highest content in volatile matter present the best source rock characteristics; associated clays with lower moisture levels and high volatile matter content also display a good generation potential (high S1+S2 of Rock-Eval pyrolysis).

Generally, although coals have lower hydrogen indices than some of the associated clays, they have a **better generation potential** because of their considerably higher content in organic matter. In order for a clay to possess a generation potential similar to that of coals, it must have a high hydrogen index and an organic content higher than 10%. In image analysis, the ratio Green/Red can be used as an additional parameter to evaluate the generation potential of coal samples, especially when the latter are very different from each other.

In order to properly evaluate the generation potential of coals and associated clays rich in organic matter, one needs to study samples of low thermal maturity (i.e., 0.4 - 0.45 R_o), which is the case in the Sabaletas Member. Because of the **early generation in coals**, one has to avoid samples having a thermal maturity slightly below the standard onset of oil generation (0.6 R_o), because these coals might have generated significant quantities of hydrocarbons and samples would be impoverished in liquid and gas hydrocarbons.

The methodology used here indicates that in most of the seams the **total sulphur content** increases towards the roof of the seam, whereas percentages are normally low towards the base (<0.5%). This information may be of great help for the mining companies, which could extract the coal without including the top part of the seams where the sulphur content is the highest. Moreover, this would be very beneficial to the coal consumers, who not only would not contaminate the environment with sulphur oxides, but also considerably decrease corrosion in the boilers.

Finally, at a more local scale, this study has demonstrated that palynofacies analysis provide more detailed informations than petrography in order to assess **the degree of similarity of coal seams** in a tectonically-disturbed basin. Palynofacies and sporomorph data demonstrate that the analyzed coal seams are not laterally continuous or that there existed important variations in the depositional conditions, not only stratigraphically but also laterally.

TABLA DE CONTENIDO / CONTENTS

<i>RESUMEN</i>	i
<i>ABSTRACT</i>	iii
<i>TABLA DE CONTENIDO / CONTENTS</i>	v
<i>LISTA DE FIGURAS</i>	viii
<i>LISTA DE TABLAS</i>	xiii
<i>AGRADECIMIENTOS / ACKNOWLEDGEMENTS</i>	xv

1. INTRODUCCIÓN..... 1

1.1.OBJECTIVOS GENERALES	1
1.2. ESTADO DEL ARTE DE LAS PALINOFACIES	2
1.2.1. Generalidades	2
1.2.2. Palinofacies en carbones.....	3
1.2.3. Estudios de palinofacies en Colombia.....	4
1.3. ESTADO DEL ARTE SOBRE EL AMBIENTE DE DEPOSITACIÓN DE LOS CARBONES EN LA FORMACIÓN AMAGA	5
1.3.1. General	5
1.3.2. Definiciones	7
1.4. ESTADO DEL ARTE DE LA GENERACIÓN Y EXPULSIÓN DE HIDROCARBUROS EN CARBONES	11
1.4.1. General.....	11
1.4.2. Carbones	13
1.4.3. Una perspectiva a la aplicación en Colombia.....	16

2. MARCO GEOLÓGICO DE LA FORMACIÓN AMAGA..... 17

2.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA DE LA ZONA DE ESTUDIO	17
2.2. ZONA DE ESTUDIO	20
2.3. HISTORIA DEL CONOCIMIENTO SOBRE LA FORMACIÓN AMAGÁ	20

3. METODOS 22 |

3.1. MUESTREO	22
3.2. PREPARACIÓN.....	23
3.2.1. Análisis químicos	23
3.2.2. Análisis petrográficos en sección pulida	24
3.2.3. Estudio de palinofacies	24
3.3. METODOS DE ANÁLISIS.....	26
3.3.1. Análisis próximos	26
3.3.2. Análisis elementales	27
3.3.3. Análisis microscópicos en luz blanca y fluorescente.....	27
3.3.4. Análisis de pirólisis Rock-Eval	30
3.3.5. Análisis geoquímicas	33
3.3.6. Asociación de liptinitas principales y secundarias (método ALPS).....	36
3.3.7. Microscopia electrónica.....	36
3.3.8. Difracción de rayos.....	37
3.3.3. Análisis de imagen.....	37
3.4. ESTADÍSTICA.....	41

4. RESULTADOS 42 |

4.1. LITOLOGÍA Y MANTOS ESTUDIADOS	42
4.1.1. Introducción	42
4.1.2. Mina El Bloque	43
4.1.3. Mina Nechí	43
4.1.4. Minas El Pontón y El Arenal	44
4.2. ANÁLISIS PRÓXIMOS.....	45
4.2.1. Mina El Bloque.....	45
4.2.2. Mina Nechí	46
4.2.3. Mina El Pontón.....	48
4.2.4. Mina El Arenal	50
4.3. ANÁLISIS ELEMENTAL	50
4.3.1. Mina El Bloque.....	50
4.3.2. Mina Nechí	50
4.3.3. Mina El Pontón.....	51
4.3.4. Mina El Arenal	51
4.4. PIRÓLISIS ROCK-EVAL.....	53
4.4.1. Mina El Bloque.....	53
4.4.2. Mina Nechí	53
4.4.3. Mina El Pontón.....	59
4.4.4. Mina El Arenal	60
4.5. PETROGRAFÍA	61
4.5.1. Implementación de las palinofacies en el estudio de carbones.....	61
4.5.2. Mina El Bloque.....	65
4.5.3. Mina Nechí	67
4.5.4. Mina El Pontón.....	71
4.5.5. Mina El Arenal	72
4.6. PALINOFACIES	74
4.6.1. Mina El Bloque.....	74
4.6.2. Mina Nechí	76
4.6.3. Mina El Pontón.....	80
4.7. ESPOROMORFOS.....	81
4.7.1. Introducción.....	81
4.7.2. Mina El Bloque.....	81
4.7.3. Mina Nechí	85
4.7.4. Mina El Pontón.....	89
4.7.5. Mina El Arenal	91
4.8. EXTRACTO DE BITUMEN Y CROMATOLOGÍA LIQUIDA	92
4.8.1. Mina El Bloque.....	92
4.8.2. Mina Nechí	93
4.8.3. Minas El Pontón y El Arenal	94
4.9. MINERALOGÍA DE LAS ARCILLAS.....	94
4.10. ANÁLISIS DE IMAGEN.....	95
4.10.1. Petrografía	95
4.10.2. Comparación del color de fluorescencia y su fracción volumétrica por mantos	95
4.10.3. Fluorescencia producida por los macerales del grupo de las liptinitas	96
4.10.4. Resultados del índice V/R de pulidos vs. palinofacies	96
4.11. ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS DE LOS DIFERENTES ANÁLISIS	97
4.11.1. Introducción.....	97
4.11.2. Análisis próximos y de pirolisis Rock-Eval de carbones y lutitas.....	98
4.11.3. Análisis próximos, elementales, y de pirolisis Rock-Eval de carbones.....	98
4.11.4. Análisis próximos y de pirolisis rock-eval de lutitas	98
4.11.5. Análisis petrográfico de carbones.....	99

5. DISCUSIÓN	103
5.1. APLICACIÓN DE LAS PALINOFACIES A LOS CARBONES Y SU CONTRIBUCIÓN A LA PETROGRAFIA Y AL PALEOAMBIENTE.....	103
5.1.1. Características petrográficas, de palinofacies y de esporomorfos	103
5.1.2. Correlación entre análisis petrográfico y de palinofacies	105
5.1.3. Interpretación ambiental	108
5.2. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA MATERIA ORGÁNICA DE ROCAS CARBONOSAS Y DEL CARBÓN COMO ROCAS FUENTES DE PETRÓLEO	116
5.2.1. Análisis de mantos totales	116
5.2.2. Análisis de plies.....	117
5.2.3. Variación vertical de los plies del manto 3 de la mina El Bloque	117
5.2.4. Resultados del índice V/R vs. el índice de hidrógeno	123
5.2.5. Comparación entre las muestras con el mejor y el peor potencial de generación de hidrocarburos	124
5.3. GENERACIÓN TEMPRANA	127
5.4. VARIACIONES DE LA MATERIA ORGANICA Y DE LA MATERIA MINERAL EN LOS CARBONES Y LAS IMPLICACIONES EN LA EXPLOTACIÓN Y BENEFICIO DE LOS CARBONES.....	128
5.5. CORRELACION LOCAL DE LOS MANTOS DE CARBÓN.....	129
5.5.1. Correlación del manto 1 de las Minas El Bloque y Nechi.....	130
6. CONCLUSIONES	134
6.1. PALINOFACIES, PETROGRAFIA Y PALEOAMBIENTE	134
6.2. CARBÓN COMO ROCA FUENTE DE PETRÓLEO.....	135
6.3. GENERACIÓN TEMPRANA	136
6.4. EXPLOTACIÓN Y BENEFICIO DE LOS CARBONES.....	137
6.5. CORRELACION DE LOS MANTOS.....	137
REFERENCIAS	138
ANNEXOS	147
ANEXO A1: Método de preparación de palinofacies	147
ANEXO A2: Imágenes patrón en petrografía y en palinofacies.....	152
ANEXO A3: Imágenes microscopía electrónica	154
ANEXO A4: Columnas estratigráficas detalladas de los mantos analizados	155
ANEXO A5: Resultados de análisis próximos de carbones y lutitas carbonosas.....	160
ANEXO A6: Resultados de análisis elemental de carbones y lutitas carbonosas	162
ANEXO A7: Resultados de análisis de pirolisis rock-eval de carbones y lutitas carbonosas.....	164
ANEXO A8: Resultados del conteo en petrografía de carbones y lutitas de la Fm Amagá	167
ANEXO A9: Resultados del conteo de palinofacies en carbones y lutitas de la Formación Amagá	169
ANEXO A10: Resultados del conteo de esporomorfos de los carbones y lutitas de la Formación Amagá.....	173
ANEXO A11: Esporomorfos comunes en algunos de las muestras de carbón y lutita	176
ANEXO A12: Extracto de bitumen y cromatografía líquida de algunos de los carbones y lutitas carbonosas	184
ANEXO A13: Difracción de rayos X de los minerales arcillosos	184

LISTA DE FIGURAS/ LIST OF FIGURES

Fig. 1.1. Macerales vitriniticos, liptiniticos e inertiniticos de los carbones estudiados en petrografía y palinofacies <i>Vitrinitic, liptinitic and inertinitic macerals of studied coals in petrography and palynofacies</i>	9
Fig. 1.2. Descripción de los plies en un manto de carbón y las convenciones de los plies típicos en los carbones estudiados. <i>Description of plies in a coal seam and legend for the typical plies encountered in the studied coals</i>	11
Fig. 1.3. Esquema general de generación de hidrocarburos. La escala de profundidad se basa en ejemplos de rocas fuentes del Paleozoico y Mesozoico, esto es sólo un indicativo y puede variar de acuerdo a la naturaleza de la materia orgánica original, historia de enterramiento y gradiente geotérmico. Tomado de Tissot et al. (1974). <i>General scheme of hydrocarbon generation. The depth scale is based on examples of source rocks from the Palaeozoic and Mesozoic; this is only an indication and may vary according to the type of organic matter, burial history and geothermal gradient (after Tissot et al., 1974)</i>	12
Fig. 1.4. Modelo de generación de hidrocarburos (Huang, 1999). <i>Model of hydrocarbon generation (Huang, 1999)</i>	16
Fig. 2.1. Localización de la zona estudiada (en rojo). <i>Location of zone studied (in red)</i>	17
Fig. 2.2. Mapa y sección geológica de la Cuenca de la Sinifaná (modificado de Ingeominas, 2005). <i>Map and geological cross-section of the Sinifaná Basin (after Ingeominas, 2005)</i>	18
Fig. 2.3. Mapa y columna estratigráfica de la zona estudiada en la Cuenca de Sinifaná (modificada de Ingeominas, 2005). <i>Map and stratigraphical column of zone studied in Sinifaná Basin (after Ingeominas, 2005)</i>	19
Fig. 3.1. Muestreo de canal del manto total y de la asociación de litotipos (ply). <i>Channel sampling of total coal seam and lithotype association (ply)</i>	22
Fig. 3.2. Resultados obtenidos por el método de Schulze modificado para preparación de palinofacies (Blandón et al., 2003, in press). <i>Results obtained by the Schulze-modified preparation method (Blandón et al., 2003, in press)</i>	25
Fig. 3.3. Composición del carbón y denominación de sus componentes (Ramírez, 1992). <i>Coal composition and name of its components (Ramírez, 1992)</i>	26
Fig. 3.4. Luz fluorescente reflejada. A: 2 segundos y B: 8 segundos. <i>Reflected fluorescent light. A: 2 seconds and B: 8 seconds</i>	28
Fig. 3.5. Luz blanca transmitida (A) y luz fluorescente reflejada (B), 20X. A 1/50 seg., B 3seg. <i>Transmitted white light (A) and fluorescent reflected light (B), 20X. A 1/50 sec., B 3sec</i>	29
Fig. 3.6. Luz blanca transmitida (A) y luz fluorescente reflejada (B), 50X. A 1/10 seg., B 2seg., C 1seg. <i>Transmitted white light (A) and fluorescent reflected light (B), 50X. A 1/10 sec., B 2sec., C 1sec</i>	29
Fig. 3.7. Diagrama general mostrando las diferentes fracciones de la materia orgánica total de las rocas analizadas, los parámetros correspondientes y su registro, (Lafargue et al. 1998). <i>General diagram showing the different fractions of the total organic matter in rocks analyzed, the corresponding parameters and their recording, (Lafargue et al., 1998)</i>	30
Fig. 3.8. Vías de evolución de los grupos de macerales en los carbones (después de Van Krevelen 1961, tomado de Tissot 1984). <i>Evolution of macerals groups in coals (after Van Krevelen 1961, in Tissot 1984)</i>	32
Fig. 3.9. Análisis del bitumen. <i>Bitumen analysis</i>	34
Fig. 3.10. Extracción de bitumen de muestras de carbón y lutita carbonosa de la Formación Amagá. <i>Bitumen extraction from coal and coaly shale samples of Amagá Formation</i>	35
Fig. 3.11. Cromatografía líquida de extractos de bitumen de muestras de carbones y lutitas carbonosas. <i>Liquid chromatography of bitumen extracts of coal and coaly shale samples</i>	36
Fig. 3.12. Paso A de la etapa 1 de análisis de imagen. <i>Step A of stage 1 in image analysis</i>	38
Fig. 3.13. Paso B del etapa 1 de análisis de imagen. <i>Step B of stage 1 in image analysis</i>	38

Fig. 3.14. Paso C: Resultados de la etapa 1 (figuras anteriores). <i>Step C: results of stage 1 (see previous figures).</i>	39
Fig 3.15. Etapa 2 del procesamiento digital de imágenes. <i>Stage 2 of digital image processing.</i>	39
Fig. 3.16. Etapa 3 del tratamiento digital de imágenes. <i>Stage 3 of digital image processing.</i>	40
Fig. 3.17. Índice de color G/R basado sobre imágenes digitales. <i>G/R color index based on digital images.</i>	40
Fig. 4.1. Columna estratigráfica de la zona estudiada y el tipo de análisis efectuado. Resultados detallados están en los respectivos anexos. <i>Stratigraphical column of zone studied and type of analysis carried out. See detailed results in respective appendices.</i>	42
Fig. 4.2. Descripción litológica detallada de los mantos 1, 2 y 3 de la mina El Bloque. <i>Detailed lithological description of seams 1, 2 and 3 in El Bloque Mine.</i>	43
Fig. 4.3. Descripción litológica detallada de los mantos 1, 2 y 3 de la mina Nechi. <i>Detailed lithological description of seams 1, 2 and 3 in Nechi Mine.</i>	44
Fig. 4.4. Descripción litológica de cada uno de los plies del manto 3 de las minas El Pontón y El Arenal. <i>Lithological description of seam 3 in El Ponton and El Arenal Mines.</i>	45
Fig. 4.5. Análisis próximos de los mantos 1, 2 y 3 de la mina El Bloque (ver litología en Fig. 4.2) <i>Proximate analysis of seams 1, 2 and 3 in El Bloque Mine (see Fig. 4.2 for lithology).</i>	47
Fig. 4.6. Análisis próximos de los mantos 1, 2 y 3 de la mina Nechí (ver litología en Fig. 4.3) <i>Proximate analysis of seams 1, 2 and 3 in Nechi Mine (see Fig. 4.3 for lithology).</i>	48
Fig. 4.7. Mina El Pontón, manto 3. División de la columna estratigráfica en grupos y subgrupos de los análisis próximos de plies. <i>Mine El Pontón, seam 3. Stratigraphical column subdivision in groups and subgroups for proximate analysis of plies.</i>	49
Fig. 4.8. Análisis próximos del manto 3 de la mina El Pontón (ver litología en Fig. 4.4) <i>Proximate analysis of seam 3 in El Ponton Mine (see Fig. 4.4 for lithology)</i>	49
Fig. 4.9. Análisis próximos del manto 3 de la mina El Arenal (ver litología en Fig. 4.4) <i>Proximate analysis of seam 3 in El Arenal Mine (see Fig. 4.4 for lithology).</i>	50
Fig. 4.10. Análisis elemental de los mantos 1, 2 y 3 de la mina El Bloque (ver litología en Fig. 4.2). <i>Ultimate analysis of seams 1, 2 and 3 in El Bloque Mine (see Fig. 4.2 for lithology).</i>	51
Fig. 4.11. Análisis elementales de los mantos 1, 2 y 3 de la mina Nechí (ver litología en Fig. 4.3). <i>Ultimate analysis of seams 1, 2 and 3 in Nechi Mine (see Fig. 4.3 for lithology).</i>	52
Fig. 4.12. Análisis elementales del manto 3 de la mina El Pontón (ver litología en Fig. 4.4). <i>Ultimate analysis of seam 3 in El Ponton mine (see Fig. 4.4 for lithology).</i>	52
Fig. 4.13. Análisis elementales del manto 3 de la mina El Arenal (ver litología en Fig. 4.4). <i>Ultimate analysis of seam 3 in El Arenal Mine (see Fig. 4.4 for lithology).</i>	53
Fig. 4.14. Análisis de pirólisis Rock-Eval (COT, IH, S2) de los mantos 1, 2 y 3 de la mina El Bloque <i>Rock-Eval pyrolysis analysis (TOC, HI, S2) of seams 1, 2 and 3 in El Bloque Mine</i>	54
Fig. 4.15. Análisis de pirólisis Rock-Eval (S1, Carbono Mineral) de los mantos 1, 2 y 3 de la mina El Bloque <i>Rock-Eval pyrolysis analysis (S1, Mineral Carbon) of seams 1, 2 and 3 in El Bloque Mine.</i>	55
Fig. 4.16. Mina El Bloque. Tipos de kerogeno. <i>El Bloque Mine.Types of kerogen</i>	56
Fig. 4.17. Análisis de pirolisis rock-eval (COT, IH, S2) de los mantos 1, 2 y 3 de la mina Nechi <i>Rock-Eval pyrolysis analysis (TOC, HI, S2) of seams 1, 2 and 3 in Nechi Mine.</i>	57
Fig. 4.18. Análisis de pirólisis Rock-Eval (S1, Carbono Mineral) de los mantos 1, 2 y 3 de la mina Nechi <i>Rock-Eval pyrolysis analysis (S1, Mineral Carbon) of seams 1, 2 and 3 in Nechi Mine.</i>	57
Fig. 4.19. Mina Nechí. Tipos de kerógeno <i>Nechi Mine. Types of kerogen.</i>	58
Fig. 4.20. Análisis de pirolisis Rock-Eval (COT, IH, S2) del manto 3 de la mina El Pontón. <i>Rock-Eval pyrolysis analysis (TOC, HI, S2) of seam 3 in El Ponton Mine</i>	59
Fig. 4.21. Análisis de pirolisis Rock-Eval (S1, Carbono Mineral) del manto 3 de la mina El Pontón. <i>Rock-Eval pyrolysis analysis (S1, Mineral Carbon) of seam 3 in El Ponton Mine</i>	59
Fig. 4.22. Mina El Pontón, Manto 3. Tipos de kerógeno.	

	<i>El Ponton Mine, Seam 3. Types of kerogen.....</i>	<i>60</i>
Fig. 4.23.	Análisis de pirolisis Rock-Eval (COT, IH, S2) del manto 3 de la mina El Arenal. <i>Rock-Eval pyrolysis analysis of seam 3 in El Arenal Mine.....</i>	<i>60</i>
Fig. 4.24.	Análisis de pirolisis Rock-Eval (S1, Carbono Mineral) del manto 3 de la mina El Arenal. <i>Rock-Eval pyrolysis analysis (S1, Mineral Carbon) of seam 3 in El Arenal Mine.</i>	<i>61</i>
Fig. 4.25.	Mina El Arenal, Manto 3. Tipos de kerógeno. <i>Mine El Arenal, Seam 3. Types of kerogen.</i>	<i>61</i>
Fig. 4.26.	A) Luz reflejada y fluorescente, inmersión en aceite; vitrinita, resinite oil, bituminita, cutinita, funginita. B) Luz transmitida normal y fluorescente, objetivo seco. Tejidos amarillos delgados, resinas (desaparecen durante la preparación) materia orgánica amorfa cutículas, y hongos. <i>A) Reflected normal and fluorescent lights, immersion oil; resinite, bituminite, cutinite and funginite; B) Transmitted normal and fluorescent lights, dry objective; thin yellow tissues, resin, amorphous OM, cuticle and fungi.....</i>	<i>64</i>
Fig. 4.27.	Mina El Bloque, muestra 1 del manto 1. Imágenes de resinite oil antes y después de la extracción. <i>El Bloque Mine, Sample 1 of seam 1. Images of resinite oil before and after extraction.....</i>	<i>64</i>
Fig. 4.28.	Petrografía resumida de cada uno de los mantos de la mina El Bloque. <i>Summary of petrographical data of seams in El Bloque Mine.....</i>	<i>65</i>
Fig. 4.29 a.	Petrografía detallada de M1 de la mina El Bloque. <i>Detailed petrography of seam 1 in El Bloque Mine.....</i>	<i>66</i>
Fig. 4.29 b.	Petrografía detallada de M2 de la mina El Bloque. <i>Detailed petrography of seam 2 in el Bloque Mine.....</i>	<i>67</i>
Fig. 4.29c.	Petrografía detallada de m3 de la mina El Bloque. <i>Detailed petrography of seam 3 in el Bloque Mine.....</i>	<i>68</i>
Fig. 4.30.	Petrografía resumida de cada uno de los mantos de la mina Nechi. <i>Summary of petrographical data of seams in Nechi Mine.</i>	<i>69</i>
Fig. 4.31 a.	Petrografía detallada de M1 de la mina Nechi. <i>Detailed petrography of seam 1 in Nechi Mine.....</i>	<i>69</i>
Fig. 4.31 b.	Petrografía detallada de M2 de la mina Nechi. <i>Detailed petrography of seam 2 in Nechi Mine.....</i>	<i>70</i>
Fig. 4.31 c.	Petrografía detallada de M3 de la mina Nechi. <i>Detailed petrography of seam 3 in Nechi Mine.....</i>	<i>71</i>
Fig. 4.32.	Petrografía resumida del manto 3 de la mina El Pontón. <i>Summary of petrographical data of seam 3 in El Pontón Mine.</i>	<i>71</i>
Fig. 4.33.	Petrografía detallada de m3 de la mina El Pontón. <i>Detailed petrography of seam 3 in El Ponton Mine.....</i>	<i>72</i>
Fig. 4.34.	Petrografía resumida del manto 3 de la mina El Arenal. <i>Summary of petrographical data of seam 3 in El Arenal Mine.....</i>	<i>73</i>
Fig. 4.35.	Petrografía detallada de m3 de la mina El Arenal. <i>Detailed petrography of seam 3 in El Arenal Mine.....</i>	<i>73</i>
Fig. 4.36.	Palinofacies resumida de cada uno de los mantos de la mina El Bloque. <i>Summary of palynofacies in El Bloque Mine seams (C = Constituents).....</i>	<i>75</i>
Fig. 4.37a.	Distribución de las palinofacies de m1 de la mina El Bloque. <i>Palynofacies distribution in seam 1 in El Bloque Mine.</i>	<i>76</i>
Fig. 4.37 b.	Distribución de las palinofacies de M3 de la mina El Bloque. <i>Palynofacies distribution in seam 3 in El Bloque Mine.</i>	<i>76</i>
Fig. 4.38.	Palinofacies resumida de cada uno de los mantos de la mina Nechi. <i>Summary of petrography in each seam in Nechi Mine.....</i>	<i>78</i>
Fig. 4.39a.	Distribución de las palinofacies de M1 de la mina Nechi. <i>Palynofacies distribution in seam 1 in Nechi Mine.....</i>	<i>78</i>
Fig. 4.39 b.	Distribución de las palinofacies de M2 de la mina Nechi. <i>Palynofacies distribution in seam 2 in Nechi mine.</i>	<i>79</i>
Fig. 4.39 c.	Distribución de las palinofacies de m3 de la mina Nechi. <i>Palynofacies distribution in seam 3 in Nechi Mine.....</i>	<i>79</i>
Fig. 4.40.	Palinofacies resumida de cada uno de los plies de M3 de la mina El Pontón. <i>Summary of palynofacies in each ply of seam 3 in El Ponton Mine.....</i>	<i>80</i>
Fig. 4.41.	Distribución de las palinofacies de M3 de la mina El Pontón. <i>Palynofacies distribution in seam 3 in El Ponton Mine.</i>	<i>81</i>
Fig. 4.42.	Agrupación en angiospermas, palmas y helechos de los esporomorfos estudiados.	

	<i>Most common angiosperm and palm pollen and fern spores in the seams studied.....</i>	82
Fig. 4.43.	Resumen de los esporomorfos de los tres mantos de la mina El Bloque. <i>Summary of sporomorphs in the three seams of El Bloque Mine.....</i>	83
Fig. 4.44a.	Distribución de esporomorfos de M1 de la mina El Bloque. <i>Sporomorphs distribution in seam 1 in El Bloque Mine.</i>	84
Fig. 4.44b.	Distribución de esporomorfos de M2 de la mina El Bloque. <i>Sporomorph distribution in seam 2 of El Bloque Mine.</i>	85
Fig. 4.44c.	Distribución de esporomorfos de M3 de la mina El Bloque. <i>Sporomorph distribution in seam 3 of El Bloque Mine.</i>	85
Fig. 4.45.	Resumen de los esporomorfos in cada manto de la mina Nechi. <i>Summary of sporomorphs in the three seams of Nechi Mine.</i>	87
Fig. 4.46a.	Distribución de esporomorfos de M1 de la mina Nechi. <i>Sporomorph distribution in seam 1 of Nechi Mine.....</i>	87
Fig. 4.46b.	Distribución de esporomorfos de M2 de la mina Nechi. <i>Sporomorph distribution in seam 2 of Nechi Mine.....</i>	88
Fig. 4.46c.	Distribución de esporomorfos de M3 de la mina Nechi <i>Sporomorph distribution in seam 3 of Nechi Mine.....</i>	89
Fig. 4.47.	Resumen de los esporomorfos de cada uno de los plies de la mina El Ponton. <i>Summary of sporomorphs in each ply of El Ponton Mine.</i>	90
Fig. 4.48.	Distribución de esporomorfos de M3 de la mina El Pontón. <i>Sporomorph distribution in seam 3 of El Pontón Mine.....</i>	91
Fig. 4.49.	Resumen de los esporomorfos del manto 3 de la mina El Arenal. <i>Summary of sporomorphs in seam 3 of El Arenal Mine.....</i>	92
Fig. 4.50.	Distribución de esporomorfos de M3 de la mina El Arenal. <i>Sporomorph distribution in seam 3 of El Arenal Mine.</i>	93
Fig. 4.51.	Etapa 3 del tratamiento digital de imágenes. <i>Step 3 of digital image processing.</i>	95
Fig. 4.52.	Manto 1 de las minas El Bloque y Nechi. Colores de fluorescencia, y fracción volumétrica de los macerales liptiníticos, tanto de pulidos como de palinofacies de M1 el Bloque y pulidos de M1 Nechi. <i>El Bloque and Nechi mines, seams 1. Fluorescence colour and volumetric fraction of liptinitic macerals in polished section and palynofacies.....</i>	96
Fig. 4.53.	Macerales liptiníticos para cada ply del Manto 1 de la Mina El Bloque. <i>Liptinitic macerals in each ply of seam 1 in el Bloque Mine.....</i>	97
Fig. 4.54.	Índice V/R para pulidos y palinofacies de las muestras de los diferentes plies de M1 El Bloque. <i>G/R index for polished sections and palynofacies in plies of El Bloque seam 1.</i>	97
Fig. 4.55.	Análisis en componentes principales de los resultados de los análisis próximos y Rock-Eval pirólisis en carbones y lutitas. <i>Principal component analysis of proximate and Rock-Eval pyrolysis results in coals and shales</i>	99
Fig. 4.56.	Análisis en componentes principales de los resultados de los análisis próximos y Rock-Eval pirólisis en carbones <i>Principal component analysis of proximate and Rock-Eval pyrolysis results in coals.....</i>	99
Fig. 4.57.	Análisis en componentes principales de los resultados de los análisis próximos y Rock-Eval pirólisis en lutitas <i>Principal component analysis of proximate and Rock-Eval pyrolysis results in shales.</i>	100
Fig. 4.58.	Análisis en componentes principales de los resultados petrográficos en carbones <i>Principal component analysis of petrographical results in coals</i>	101
Fig. 4.59.	Análisis en componentes principales de los resultados de palinofacies en carbones <i>Principal component analysis of palynofacies results in coals</i>	101
Fig. 4.60.	Análisis en componentes principales de los resultados de palinofacies en lutitas <i>Principal component analysis of palynofacies results in shales</i>	102
Fig. 5.1.	Macerales y palinofacies más comunes en los carbones de la Formación Amagá. <i>Most common macerals and palynofacies in coals from the Amagá Formation.....</i>	104
Fig. 5.2.	Principales granos de polen y esporas presentes en los carbones y en las lutitas carbonosas estudiadas. <i>Main pollen grains and spores present in coals and coaly shales studied.....</i>	105
Fig. 5.3.	Mina el Bloque, manto 1. Correlación entre los resultados de petrografía y palinofacies.	

	<i>Mine El Bloque, seam 1. Correlation between petrography and palynofacies results.....</i>	<i>106</i>
Fig. 5.4.	Mina el Bloque, manto 3. Correlación entre los resultados de petrografía y palinofacies. <i>Mine El Bloque, seam 3. Correlation between petrography and palynofacies results.....</i>	<i>107</i>
Fig. 5.5.	Mina El Bloque, manto 1. Relación entre los resultados de los componentes liptiniticos obtenidos en petrografía y en palinofacies. <i>Mine El Bloque, seam 1. Relationship between liptinitic components obtained in petrography and palynofacies.....</i>	<i>107</i>
Fig. 5.6.	Mina El Bloque, manto 3. Relación entre los resultados de los componentes liptiniticos obtenidos en petrografía y en palinofacies. <i>Mine El Bloque, seam 3. Relationship between liptinitic components obtained in petrography and palynofacies.....</i>	<i>108</i>
Fig. 5.7.	Distribución de palinofacies en el manto 3 de la mina el Pontón. <i>Palynofacies distribution in seam 3 of El Pontón mine.....</i>	<i>114</i>
Fig. 5.8.	Variación vertical de los esporomorfos en el manto 3 de la mina El Pontón. <i>Vertical variation of sporomorphs in seam 3 of El Pontón Mine.</i>	<i>115</i>
Fig. 5.9.	Comparación para los mantos totales (1, 2 y 3) de la Mina El Bloque entre: A: el porcentaje de inertinitas y el valor de S1 de pirolisis Rock –Eval; B: el porcentaje de liptinitas y el valor de S2 de pirolisis Rock –Eval; C: El IH vs Humedad para los mantos totales de la Mina El Bloque; D: el porcentaje de humedad y las materias volátiles. <i>Comparison for total seams (1, 2 y 3) of El Bloque Mine between: A: percentage of inertinites and the S1 value from Rock-Eval pyrolysis; B: percentage of liptinites and the S2 value from Rock-Eval pyrolysis; C: HI vs. moisture for total seams of El Bloque mine; D: percentage of moisture and volatile matter.....</i>	<i>118</i>
Fig. 5.10.	Comparación de los resultados de pirolisis Rock-Eval entre los plies de carbones y las lutitas. <i>Comparison of Rock-Eval pyrolysis data between coal and shale plies.</i>	<i>118</i>
Fig. 5.11.	Variación vertical de la humedad y las materias volátiles (lac) para el manto 3 El Bloque. <i>Vertical variation of moisture and volatile matter (daf) for seam 3 of El Bloque mine.</i>	<i>119</i>
Fig. 5.12.	Análisis elemental de manto 3 El Bloque. <i>Ultimate analysis of seam 3 in El Bloque mine.</i>	<i>119</i>
Fig. 5.13.	Variación vertical de los componentes petrográficos de MANTO 3 de la mina El Bloque <i>Vertical variation of petrographical components in seam 3 of El Bloque mine.....</i>	<i>120</i>
Fig. 5.14.	Variación vertical de las palinofacies de MANTO 3 de la mina El Bloque. <i>Vertical variation of palynofacies in seam 3 of El Bloque mine.</i>	<i>120</i>
Fig. 5.15.	Variación vertical de los esporomorfos en el MANTO 3 de la mina El Bloque. <i>Vertical variation of sporomorphs in seam 3 of El Bloque mine.</i>	<i>121</i>
Fig. 5.16.	Comparación entre los resultados de los análisis petrográficos y de palinofacies del manto 3 de la mina El Bloque. <i>Comparison between petrographical and palynofacies data in seam 3 of El Bloque mine.</i>	<i>121</i>
Fig. 5.17.	Mina El Bloque, manto 1, índice de hidrógeno normalizado versus el índice V/R para cada ply. <i>El Bloque Mine, seam 1. Hydrogen index standardized vs. G/R index for each ply.</i>	<i>123</i>
Fig. 5.18.	Mina Nechi, manto 1. Índice de hidrógeno normalizado versus el índice V/R para cada ply. <i>Mine Nechi, seam 1. Hydrogen index standardized vs G/R Index for each ply.....</i>	<i>124</i>
Fig. 5.19.	Mina El Bloque, manto 1. Variación con la profundidad de las palinofacies para el índice V/R (medido con análisis de imagen), S1/COT, porcentaje de liptinitas e índice de hidrógeno. <i>El Bloque Mine, seam 1. Variation with depth of palynofacies with respect to G/R index (measured with image analysis), S1/TOC, percentage of liptinites, and hydrogen index.</i>	<i>125</i>
Fig. 5.20.	Comparación entre análisis próximos, elementales, de pirolisis Rock-Eval, de los plies 1 y 3 de la mina El Bloque. <i>Comparison between proximate, ultimate and Rock-Eval pyrolysis data of plies 1 and 3 of El Bloque mine.....</i>	<i>127</i>
Fig. 5.21.	Comparación entre de los análisis petrográficos y de palinofacies de l plies 1 y 3 de la mina el Bloque. <i>Comparison between petrographical and palynofacies analysis of plies 1 and 3 of the El Bloque mine.....</i>	<i>128</i>
Fig. 5.22.	Análisis en componentes principales de los resultados petrográficos del manto 1 de las minas El Bloque (CB) y Nechi (CN). <i>Principal component analysis of petrographical results of seam 1 in El Bloque (CB) and Nechi (CN) Mines.....</i>	<i>130</i>

Fig. 5.23. Dendograma de las muestras del manto 1 de las minas El Bloque (CB) y Nechi (CN) utilizando resultados petrográficos <i>Cluster analysis of samples in seam 1 of El Bloque (CB) and Nechi (CN) Mines based on petrographical data</i>	131
Fig. 5.24. Análisis en componentes principales de los resultados de palinofacies del manto 1 de las minas El Bloque (CB) y Nechi (CN). <i>Principal component analysis of palynofacies results of seam 1 in El Bloque (CB) and Nechi (CN) Mines</i>	131
Fig. 5.25. Dendograma de las muestras del manto 1 de las minas El Bloque (CB) y Nechi (CN) utilizando resultados de palinofacies <i>Cluster analysis of samples in seam 1 of El Bloque (CB) and Nechi (CN) Mines based on palynofacies data</i>	132
Fig. 5.26. Análisis en componentes principales de los resultados de esporomorfos del manto 1 de las minas El Bloque (CB) y Nechi (CN). <i>Principal component analysis of sporomorph results of seam 1 in El Bloque (CB) and Nechi (CN) Mines</i>	132
Fig. 5.27. Dendograma de las muestras del manto 1 de las minas El Bloque (CB) y Nechi (CN) utilizando resultados de esporomorfos <i>Cluster analysis of samples in seam 1 of El Bloque (CB) and Nechi (CN) mines based on sporomorph data</i>	133

ANEXOS / APPENDICES

Fig. A1-1 => Fig. A1-7. <i>Steps in palynofacies preparation method</i>	149-151
Fig. A2-1 => Fig. A2-3. <i>Type images in petrography and palynofacies</i>	152-153
Fig. A3-1. <i>MEB images</i>	154
Fig. A4-1 => Fig. A4-8. <i>Detailed stratigraphical columns of coal seams studied</i>	155-159
Fig. A11-1 => Fig. A11-8. <i>Common sporomorphs in coal and shale samples</i>	176-183

LISTA DE TABLAS / LIST OF TABLES

Tabla 1.1. Algunos ejemplos de clasificación de la MOS (tomada de Agamez y Ramírez, 2002) <i>Some examples of classification of SOM (after Agamez and Ramírez, 2002)</i>	3
Tabla 1.2. Macerales del grupo vitrinita (Oviedo, 1994). <i>Macerals of the vitrinite group (Oviedo, 1994)</i>	7
Tabla 1.3. Macerales del grupo de la liptinita (Bustin, 1985). <i>Macerals of the liptinite group (Bustin, 1985)</i>	7
Tabla 1.4. Macerales del grupo de la Inertinita (ICCP, 1994). <i>Macerals of the inertinite group (ICCP, 1994)</i>	8
Tabla 1.5. Clasificación de litotipos usada en Australia (Diessel, 1965). <i>Classification of lithotypes used in Australia (Diessel, 1965)</i>	8
Tabla 1.6. Proporción de los litotipos de acuerdo al tipo de carbón (Cameron, 1978). <i>Proportion of lithotypes according to type of coal (Cameron, 1978)</i>	10
Tabla 1.7. Algunos casos de estudio en el cual los carbones son rocas generadoras de aceite. <i>Some case studies of oil-prone coals</i>	15
Tabla 1.8. Orden de generación de aceite de macerales (Wilkins & George, 2002). <i>Oil generation order for various macerals (Wilkins and George, 2002)</i>	15
Tabla 2.1. Historia de los estudios acerca de la Formación Amagá <i>History of Amagá Formation studies</i>	20-21
Tabla 3.1. Minas, mantos y muestras estudiadas. <i>Mines, coal seams and samples studied</i>	22
Tabla 3.2. Minas visitadas con sus respectivos mantos muestreados. <i>Mines and coal seams sampled</i>	23
Tabla 3.3. Resumen de método de preparación de palinofacies Schulze modificado (Blandón et al., 2004). <i>Summary of the Schulze-modified palynofacies preparation method (Blandón et al., 2004)</i>	25

Tabla 3.4. Normas y equipos utilizados en la realización de los análisis próximos. <i>Norms and equipment used for proximate analysis.....</i>	<i>27</i>
Tabla 3.5. Guía para la interpretación de los análisis de pirólisis Rock-Eval. <i>Guide for the interpretation of Roc –Eval pyrolysis data.</i>	<i>32</i>
Tabla 3.6. Calidad de la roca fuente definida por el contenido de HC extractables según varios autores. <i>Source rock quality defined after the extractable HC content (after various authors).</i>	<i>34</i>
Tabla 3.7. Cantidad de extracto de bitumen según Leenher et al. (1986). <i>Amount of bitumens extracted (after Leenher et al., 1986).</i>	<i>34</i>
Tabla 3.8. Calidad de la roca fuente con base en el contenido de hidrocarburos en ppm (Hunt, 1979). <i>Source rock quality based on the HC content in ppm (Hunt, 1979).</i>	<i>34</i>
Table 4.1. Comparación entre los datos obtenidos de los estudios petrográficos y de palinofacies. <i>Comparison between data obtained from petrographical and palynofacies studies.....</i>	<i>62</i>
Table 4.2. Descripción de las palinofacies de los carbones y lutitas carbonosas de la Formación Amagá. <i>Palynofacies description of the coals and carbonaceous shales of Amagá Formation.....</i>	<i>63</i>
Tabla. 5.1. Morfogeneros más comunes en los carbones de la Formación Amagá con sus respectivas afinidades botánicas y ambientes de depositación (modificado de Muñoz, 2004). <i>Most common morphogenders in coals from the Amagá Formation, with respective botanical affinities and depositional environment (modified from Muñoz, 2004).....</i>	<i>110</i>
Tabla 5.2. Comparación de algunos resultados de análisis próximos, petrográficos y de pirolisis Rock-Eval de los mantos totales. <i>Comparison of proximate, petrographical and Rock-Eval pyrolysis data of total seams.</i>	<i>117</i>
Tabla 5.3. Parámetros para caracterizar los plies de lutitas y carbones de bajo rango de la Formación Amagá. <i>Parameters characterizing low rang coal and shale plies from the Amagá Formation.....</i>	<i>122</i>
Tabla 5.4. Relación entre petrografía, palinofacies y pirólisis Rock-Eval de dos muestras con comportamiento extremo. <i>Relationship between petrography, palynofacies and Rock-Eval pyrolysis data for two samples with opposite behavior.</i>	<i>127</i>

ANEXOS / APPENDICES

Table A5. <i>Results of proximate analysis in coals and coaly shales.....</i>	<i>160</i>
Table A6. <i>Results of ultimate analysis in coals and coaly shales.....</i>	<i>162</i>
Table A7. <i>Results of Rock-Eval pyrolysis analysis in coals and coaly shales.</i>	<i>164</i>
Table A8. <i>Petrography data of coals and shales from Amagá Formation</i>	<i>167</i>
Table A9. <i>Palynofacies data of coal and shale from Amagá Formation.....</i>	<i>169</i>
Table A10. <i>Sporomorph data of coals and shales from Amagá Formation</i>	<i>173</i>
Table A12. <i>Bitumen extract and liquid chromatography data of coal and coaly shales.</i>	<i>184</i>
Table A13. <i>DRX data of clay minerals.....</i>	<i>184</i>

AGRADECIMIENTOS / ACKNOWLEDGEMENTS

Agradecimientos a :

Doctor Georges Gorin, Profesor de la Universidad de Ginebra y director de la tesis por su invaluable colaboración y apoyo durante todo el trabajo.

Doctor Oscar Dario Ruiz, Profesor de la Universidad Nacional de Colombia (sede Medellin) y co-director de la tesis, por su colaboración, apoyo, por reemplazarme en muchos de los cursos durante el tiempo de este trabajo y por sus sugerencias para mejorar la comprensión del texto.

Doctor Daniel Ariztegui, Profesor de la Universidad de Ginebra, por haber aceptado ser uno de los jurados de este trabajo. Le agradezco por sus sugerencias en relación con la geoquímica orgánica.

Doctor Luis Martinez, Profesor de la Universidad Henri Poincaré de Nancy (Francia), por haber aceptado ser uno de los jurados de este trabajo. Le agradezco por sus valiosos consejos y sugerencias en lo que concierne carbones.

La Universidad de Ginebra por permitirme ser estudiante y por permitirle al Profesor Georges Gorin ser mi director.

La Universidad Nacional de Colombia por apoyarme con los permisos y financiación para desarrollar el trabajo.

El Fondo Nacional de Investigación Suizo (proyectos 2000-068091 y 200020-112320 dirigidos por el Profesor Gorin) por su apoyo financiero en relación con los análisis de materia orgánica.

Laboratorio de carbones de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional en Medellin y todo su equipo de trabajo por su apoyo incondicional.

A mis compañeros del grupo de materia orgánica sedimentaria de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional en Medellin, Alejandro Restrepo y Fredy Arias, por sus discusiones, las cuales permitieron orientar la investigación de una manera más didáctica.

A todas las personas que me ayudaron con sus conocimientos para complementar el trabajo tales como los profesores Luis N. Parra S. y Carlos Monsalve, etc.

A toda mi familia por apoyarme incondicionalmente.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVOS GENERALES

Colombia cuenta con grandes reservas de carbón distribuidas en todo el territorio nacional. En los últimos años se ha demostrado la generación de hidrocarburos en cantidades comerciales a partir del carbón en varias cuencas alrededor del mundo que presentan características parecidas a Colombia desde el punto de vista geológico y estructural, tal como Venezuela, especialmente los carbones de las Formaciones Cerrejón y Cuervos, las cuales serían correlacionables con las Formaciones Marcelina y Cuervos de la cuenca de Maracaibo. Entonces es necesario estudiar los carbones no solamente como materia prima para la industria, sino también como posible roca fuente de hidrocarburos, para desarrollar nuevos conceptos de generación de hidrocarburos. Eso es particularmente importante dadas las condiciones de desabastecimiento de petróleo prevista para los próximos años. En este sentido, el estudio detallado de la materia orgánica en carbones de bajo rango (sub-bituminosos) como los de la Formación Amagá en Colombia puede contribuir a desarrollar nuevos conceptos de generación de hidrocarburos. Estos carbones se convierten en un gran laboratorio que permite dilucidar algunas inquietudes acerca del origen y por ende plantear algunas metodologías que se pueden aplicar al estudio de los carbones en otras zonas del país y del mundo.

Se escogió la Formación Amagá de edad Paleogeno en el sector Amagá por las siguientes razones: aunque cubre un área pequeña y las reservas son pocas comparadas con otras zonas del país tales como la Cuenca Cesar-Ranchería, desde el punto de vista científico es importante ya que los carbones en este sector son de bajo rango (sub-bituminosos) y por lo tanto el estado de transformación y preservación de la materia orgánica permite aproximarse al tipo de ambiente y de vegetación que prevaleció durante la acumulación de la turba; además éstos carbones presentan alta variabilidad vertical y lateral; razón por la cual se seleccionaron varias minas distribuidas hacia el norte y centro del sector en donde los mantos tienen los mismos nombres, pero no se sabe si realmente son correlacionables.

Los resultados de los análisis de los mantos totales no dan la información necesaria para definir el ambiente de depositación y hacer las correlaciones para verificar la continuidad o no de los mantos. Debido a que un manto normalmente representa un tiempo grande de depositación que implica variaciones importantes en el clima y por ende en el tipo de materia orgánica que se deposita. Por esta razón se plantea la necesidad de hacer el estudio detallado de la variación vertical de los mantos de carbón para poder establecer y esclarecer como se deposita la materia orgánica a través del tiempo.

Los mantos microscópicamente se subdividieron en plies y se muestrearon en forma de canal el techo, el piso, el manto y las intercalaciones presentes. A las muestras se les efectuaron análisis próximos, elementales, pirólisis Rock-Eval, microscopía en luz reflejada y transmitida normal y reflejada fluorescente, se extrajo el bitumen y se hizo la cromatografía líquida de los extractos obtenidos. Además se hizo la difracción de rayos x de la mayoría de las lutitas, y se analizaron algunas de las muestras en microscopía electrónica. A manera de ejemplo se presenta la metodología y el procesamiento digital de las imágenes de petrografía en luz reflejada fluorescente de uno de los mantos.

El objetivo general de este trabajo es estudiar la materia orgánica sedimentaria presente en los carbones y rocas asociadas con el fin de determinar el posible paleoambiente de depositación y evaluar el potencial de generación de hidrocarburos de dichos carbones. Las contribuciones principales de este estudio son las siguientes: mostrar la aplicación del análisis de palinofacies a los carbones y la contribución de esta a la petrografía del carbón; desarrollar una metodología para el estudio de la materia orgánica de rocas carbonosas, la cual se puede aplicar en el estudio de las rocas fuentes de petróleo y dentro de las cuales una de ellas es el carbón; confirmar la generación

temprana de la materia orgánica en los carbones; establecer la gran variación de materia orgánica y de materia mineral en los carbones y las implicaciones que esto tendría en la explotación y beneficio de los carbones. Al nivel más local, el objetivo secundario es de dilucidar la correlación o no de los mantos de carbón en una región donde la tectónica complica las correlaciones de campo.

En este estudio, el análisis de palinofacies se desarrolló e implementó para carbones de bajo rango como los de la Formación Amagá, pero también se puede aplicar para carbones colombianos de un rango mayor (Guajira, Cesar etc).

En este trabajo, se comparan los macerales vistos en petrografía y los componentes obtenidos en palinofacies de los plies de mantos de carbón.

1.2. ESTADO DEL ARTE DE LAS PALINOFACIES

1.2.1. Generalidades

La palabra palinofacies fue introducida por Combaz (1964) para abarcar el total de la materia orgánica resistente a los ácidos, recuperada de un sedimento o roca sedimentaria, mediante técnicas de preparación palinológica usando HCl y HF, tal como se ven bajo el microscopio.

Estas interpretaciones fueron discutidas (Sigal, 1965 en Batten, 1996a). Como un resultado de estas discusiones, diferentes propuestas se han establecido para el nombre, definición y clasificación de las palinofacies. En cuanto al nombre, algunos sinónimos son muy usados en la literatura (en inglés): organic matter (Lorente, 1986) o sedimentary organic matter (= SOM; Tyson, 1995; Steffen y Gorin, 1993; Bombardiere, 1998) o algunas veces reemplazado por palynodebris (Boulter, 1994). La definición del término palinofacies de Combaz (1964) es ampliamente utilizada en los estudios de este tema, pero algunos autores consideran que en la definición se debe reflejar un significado geológico. Es por esto que diferentes autores han planteado nuevas definiciones del término:

Powell et al. (1990) definen palinofacies como un cuerpo de sedimentos que contienen una asociación característica de materia orgánica particulada, que es insoluble en HCl y HF, cuya composición es el reflejo de un ambiente sedimentario particular.

Tyson (1995) define palinofacies como un cuerpo de sedimentos que contienen una asociación característica de materia orgánica palinológica, que se considera refleja un grupo específico de condiciones ambientales, o que se asocia con un rango característico del potencial generador de hidrocarburos.

Las clasificaciones generalmente más aceptadas de las palinofacies están basadas en el aspecto morfológico de los elementos observados (estructurados y no estructurados) y con respecto al origen de los componentes (marino, continental, etc). La tabla 1.1 presenta algunas clasificaciones de la materia orgánica sedimentaria (MOS) propuesta por diversos autores.

El análisis de palinofacies es la identificación de todos los constituyentes de la materia orgánica, su tamaño, estado de preservación y proporción relativa (Pellaton, 2003).

Muchos tipos de clasificaciones de la materia orgánica en palinofacies en otros tipos de rocas diferentes al carbón se han propuesto por autores como Alpern (1970), Whitaker (1984), Boulder & Riddick (1986), Lorente (1986), Gorin and Steffen (1991), Tyson (1995), Batten (1996), Pellaton (2003).

Combaz, 1964		Tissot and Welte, 1984		Lorente, 1986		Tyson, 1993		Ruiz, 1999			
Materia Orgánica Estructurada	Microfósiles	Polen	Palinomorfos	Granos de polen y esporas, dinoflagelados acritarcos, algas verdes y azules, escoledontos hongos, foraminíferos, cianobacterias, quifinozoarios	Aerico	Menos estructurado	Zooclastos	Fragmentos de graptolites y artrópodos	Fitoclasto	Opacos a semiopacos	
		Esporas				Bacterias				Maderas	
		Micro plancton				Algas coloniales				Cutículas	
	Fragmentos de Plantas y animales	Materia orgánica estructurada	Fitoclastos	Maderas, charcoales fitoclastos opacos, cutículas, tejidos no cuticulares, tubos, filamentos y pelos, hifas		Estructurado	Algas individuales	Palinomorfos		Escoledontos, acritarcos, foraminíferos, dinocistas, quifinozoarios, cianobacterias, pasinophytas, botryococcus, rodophytas, miosporas y megasporas	Resinas
											Resinas
Partículas opacas	Zooclastos	Geles húmicos	Terrestre	Menos estructurado	Charcoal	Fitoclastos	Cuticular, tejidos de corteza, maderas, charcoal, lufas	Esporomorfo: polen y esporas			
M.O.A	M.O no estructurada	Materia orgánica amorfa de origen terrestre, y de origen acuático, materia gelificada, resinas y anbar, sólidos bituminosos		Estructurado	Terrestre		Cutículas	No estructurados	M.O.A	Resinas, agregados orgánicos y pellets fecales, cianobacterias y thiobacterias precipitados húmicos	Hongos
			Hongos			Zooclastos					
	Exoesqueleto de animales	Fitoplacton marino	Dinoflagelado y acritarcos								
	Epidermal		Otras algas marinas								
	Maderas		Foraminíferos								

Tabla 1.1. Algunos ejemplos de clasificación de la MOS (tomada de Agamez y Ramírez, 2002)
Some examples of classification of SOM (after Agamez and Ramírez, 2002).

1.2.2. Palinofacies en carbones

En el estudio petrográfico de los carbones de bajo rango (sub-bituminosos) de la Formación Amagá, no es posible distinguir algunos componentes que están íntimamente mezclados entre ellos o mezclados con materia mineral, tal como bituminita, liptodetrinitas, materia orgánica y mineral, etc. Es también difícil diferenciar resinitas de alginitas. Además no es posible identificar a que tipos de granos de polen y esporas corresponden las esporinitas, las cuales en muchos casos son sub-estimadas; muchos componentes del carbón permanecen desconocidos en la observación petrográfica, tal como diatomeas, dinocyst, diferentes especies de algas y hongos, etc. De otro lado, el conteo petrográfico por grupos macerales (vitritina, liptinita e inertinita) es poco detallado y es problemático a la hora de entender el origen y la evaluación del carbón como roca fuente de petróleo.

Como no fue posible hallar una relación directa entre los macerales en luz reflejada y los componentes vistos en las preparaciones de palinofacies en las referencias estudiadas (Teichmuller, 1974; Teichmuller & Teichmuller, 1975; Radke et al., 1980; Snowdon, 1980; Snowdon & Powell 1982; Smith, 1983; Teichmuller & Durand, 1983; Mac Gregor & Mackenzie, 1987; Teichmuller, 1989; Killops et al., 1994; Scout, 1994; Garcia- Gonzales et al., 1997; Newman et al., 1997; Taylor et al., 1998; Huang, 1999; Wan Hasiyah, 1999; Mastalerz & Glikson, 2000) y de acuerdo con las razones anteriores, y considerando el trabajo de los petrólogos orgánicos con las rocas potenciales de petróleo (Powell et al., 1982; Bertrand, 1984; Collinson et al., 1994; Fleet & Scott, 1994; Powell & Boreham, 1994; Scott & Fleet, 1994; Wilkins & Georges, 2002) es necesario tratar de entender el origen de los macerales y su comportamiento en la generación de aceite. Además sería importante tratar de correlacionar los componentes observados en petrografía con los que aparecen en las preparaciones para palinofacies, ya que la metodología utilizada para estudiar las rocas diferentes al carbón no se puede aplicar directamente a los carbones de bajo rango como los de la Formación Amagá porque la formación y los procesos de degradación de la materia orgánica en los pantanos de turba son diferentes a los que se presentan en la depositación de una lutita. Además con métodos de preparación palinológicos y de palinofacies tradicionales (Schulze, 1855; Miner, 1932; Thiergart, 1940; Dijkstra, 1946; Surange et al., 1953; Alpern, 1963; Bates et al., 1978; Wood et al., 1996; Bruch & Pross 1999), la mayoría de los fragmentos de carbón se ven negros y por lo tanto no se pueden distinguir sus componentes individuales, tal como los tejidos vitriniticos.

El estudio comparativo de la petrología y las palinofacies no solamente permite identificar las características de cada uno de los mantos, sino que también proporciona la posibilidad de diferenciar las variaciones verticales y laterales de algunos parámetros de la materia orgánica las cuales son: tipo, madurez, grado de preservación y asociaciones de componentes. Esas características pueden ayudar en la reconstrucción paleoambiental, en la exploración de hidrocarburos, en la determinación de la edad relativa y podrían ayudar en los estudios estratigráficos y en otras disciplinas. La mayoría de las investigaciones que tienen que ver con este tópico se enfocan sobre las rocas sedimentarias de grano fino, por ejemplo carbonatos y rocas siliciclásticas (Combaz, 1964 y 1980; Steffen & Gorin, 1993; Tyson, 1996; Batten, 1996; Bombardiere & Gorin 1998; Wood & Gorin, 1998; Pellaton, 2003). Pocas se enfocan en los carbones, tal como lo demuestra la poca bibliografía encontrada con respecto a este tema (por ejemplo Sweet & Cameron, 1991; Highton, et al., 1991; Masselter & Hofman, 2005), y pocos en especial en los carbones tropicales del Terciario en Sur America.

1.2.3. Estudios de palinofacies en Colombia.

El primer estudio publicado sobre las palinofacies en cuencas Colombianas fue realizado por Ruiz (1999) y se llevó a cabo en la cuenca de los Llanos Orientales (actualmente la principal cuenca petrolífera de Colombia). En este estudio se utiliza la materia orgánica sedimentaria para definir palinosecuencias. Otros resultados que de este estudio son:

- La adaptación del método estándar de preparación de la MOS para las rocas de las cuencas colombianas que son altamente siliciclásticas.
- La propuesta de una clasificación de los componentes de la MOS para las cuencas colombianas basado en la clasificación de Steffen & Gorin (1993).
- La propuesta de un índice de palinofacies, que representa el grado de influencia marina en las cuencas colombianas.
- Evaluación de la preservación con base en la fluorescencia de la materia orgánica para la cuenca de los Llanos Orientales.

Otros estudios de palinofacies que se han realizado en Colombia:

- Velásquez (2001) utiliza las palinofacies como indicadores de discontinuidades estratigráficas en el intervalo Campaniano-Eoceno Inferior en el Piedemonte Llanero.
- Agamez y Ramírez (2002) aplican el método de las palinofacies como una herramienta de interpretación secuencial y paleoambiental en la Formación Carbonera del Piedemonte llanero.
- Olaya y Restrepo (2003) realizan una correlación entre las palinofacies y la geoquímica orgánica de un intervalo estratigráfico en la Cuenca del Valle Superior del Magdalena.
- Baez (2003) utiliza las asociaciones de palinofacies como indicadores de los cambios eustáticos del nivel del mar en el límite Cretáceo-Paleoceno del Piedemonte llanero.
- Sucerquia (2004) utiliza la MOS como herramienta de interpretación de ambientes sedimentarios en la Formación Amagá.
- Pérez 2005, caracteriza un intervalo de la sucesión volcaniclastica de la Formación Combia con base en su contenido de MOS.

Hasta estos días el concepto de palinofacies no ha sido utilizado en relación con los carbones en Colombia. Algunos trabajos se han orientado generalmente al estudio palinológico y de cutículas, (Dueñas H., Escobar, Sarmiento G., Carmona, Zegarra, etc) pero no con toda la materia orgánica como indicadora de condiciones ambientales. El logro principal de este trabajo en el tópico de las palinofacies es el de mostrar:

- La utilidad de las palinofacies en la identificación de los componentes del carbón.
- Su aplicación a la definición del paleoambiente.
- La contribución a la determinación del potencial de generación de hidrocarburos

1.3. ESTADO DEL ARTE SOBRE EL AMBIENTE DE DEPOSITACIÓN DE LOS CARBONES EN LA FORMACIÓN AMAGÁ

1.3.1. General

El primer estudio relacionado directamente con la interpretación de los ambientes de depositación de la Formación Amagá fue realizado por Campuzano (1977), quién levanto una columna estratigráfica en la carretera Amagá – Bolombolo y efectuó algunos análisis granulométricos, pero aunque no observó estructuras sedimentarias ni las secuencias características de los sistemas fluviales, interpretó el ambiente de depositación del piso medio como originado a partir de una red fluvial de poca altura sobre el nivel del mar, bajas pendientes, clima cálido y húmedo con ríos sinuosos de baja competencia que depositan lutitas, arenas muy finas y o limos en los diques que dejaban lutitas en la llanura de inundación.

Delsahut y Tejada (1982) interpretan el ambiente de depositación de una manera general como deltáico.

Con base en el estudio palinológico de algunos carbones de la Formación Amagá efectuado en las minas la Aurora, Hornilla, y Paniagua en la población la Clarita municipio de Angelópolis (Antioquia), Escobar y Rozo (1984) concluyen que los valores máximos de *Mauritiidites franciscoe* son un reflejo directo de un ecosistema que representa un área de turbera cubierta por vegetación morichal, influenciada por inundaciones o niveles freáticos relativamente altos, otras especies que se ajustan a estas condiciones climáticas son: *Verrucatomonosporites usmensis*, *Retritricolporites irregularis* y *Perisyncolporites pokorny*. La presencia de dinoflagelados de origen marino indica que la cuenca fue una plataforma marina poco profunda, correspondiendo a una llanura de inundación, la cual se encontraba relativamente cerca al mar. La presencia de *Mauritiidites franciscoi*, *Verrucatomonosporites usmensis* y *Retritricolporites irregularis* los lleva a concluir que el piso medio de la Formación Amagá pertenece al Eoceno Medio o superior.

Guzman y Sierra (1984), con base en el estudio sedimentológico definen de manera general los ambientes de depositación en la cuenca Titiribí – Puente Soto. Ellos consideran el miembro medio como de corrientes meándricas con extensas cuencas de inundación en las que se desarrollaron pantanos que dieron origen a las turberas.

Pons (1984) luego de estudiar la repartición geográfica de cuatro especies fósiles del género Terminalia en los carbones de Titiribí y Amagá, pertenecientes al miembro medio de la Formación Amagá, considera que en Colombia estas especies aparecen en el Oligoceno Superior. De otro lado afirma que dichas especies son árboles comunes dentro de los bosques tropicales a altitudes entre el nivel del mar y 800 m.

En 1990 y continuando con sus estudios en la misma localidad donde había trabajado en 1984, pero en la mina la Corona, Escobar realiza un análisis palinoestratigráfico de algunos carbones de la Formación Amagá, y concluye que la distribución y frecuencia de la microflora delinean dos zonas sucesivas palinológicamente diferentes. Una Zona I donde abundan las palmas representadas por *Mauritiidites franciscoi* y *Psilamonoclpites medius* además reporta la presencia de *Proxapertites cursus*, *Bombacacidites annae*, *Ephedripites Vanegensis*, *Ctenolophonidites lisamae* que le asigna una edad de Paleoceno Superior. La microflora marina presente indica que esta zona se ha desarrollado en un ambiente tipo deltáico con interrupciones marinas (transgresiones) que favorecieron la formación de ambientes de estuario y manglar. La Zona II se caracteriza por la presencia de pteridophytes (psilatriletes, psiladas y verrucadas); angiospermas (*Retitricolporites irregulares*, *Spirosyncolpites spiralis*, *Striatricolpites catatumbus*, *Psilatricolporites operculatus*) y microflora marina (*Cyclusphaera euribei*). De acuerdo a la microflora encontrada le asigna una edad Eoceno Inferior-superior y la presencia de polen de aguas salobres (*Ciclusphaera euribei*) lo lleva a concluir que durante la depositación hubo influencia marina.

Guzman (1991) hace un análisis facial de la cuenca Amagá-Angelópolis a partir del levantamiento de cuatro columnas estratigráficas que le permitió establecer que la sección del Ventiadero (Miembro Sabaletas parte inferior), corresponde a una transición de corrientes trenzadas a meándricas en su parte inferior, y a corrientes meándricas de grano fino en la porción superior. Las columnas estratigráficas de la estación Minas y la Clarita (ubicadas en el Miembro Sabaletas parte media – superior) se interpretan como originadas bajo condiciones muy semejantes, asociadas a sistemas meándricos de grano fino en la que se desarrollan pantanos posibilitándose la formación de turberas. Afirma que las interpretaciones obtenidas del análisis facial permiten establecer condiciones típicamente intracontinentales debido a la ausencia de facies que se puedan asociar con ambientes marinos o transicionales, pero anota que hacen falta análisis sedimentológicos más detallados que permitan establecer si hay o no influencia marina.

En la cuenca de Sopetrán, Zegarra (1993) realiza un estudio palinológico de algunos carbones de la Formación Amagá en donde reporta la presencia de algunas formas de origen marino no muy abundantes como dinoflagelados (género *Oligosphaeridium*) y *Cyclusphaera euribei* y abundantes granos de polen de angiospermas, al igual que la presencia de palmas (*Mauritiidites franciscoi*, *Psilamonoletes medius*) acompañados de *Verrucatomonosporites usmensis* y *Retritricolporites irregularis* que indican un desarrollo en medio pantanoso y cenagoso con alta precipitación cerca de zonas densamente pobladas donde los carbones se desarrollaron en zonas bajas. Zegarra propone un ambiente de llanura de inundación próxima al mar y cercana a regiones altas donde la presencia de bosques tropicales es dominante. Por la asociación palinológica le asigna a la unidad una edad *tentativa* Oligoceno Superior-Mioceno.

Carmona (1997) estudia las características petrográficas y palinológicas de algunos de los carbones de la Formación Amagá en la zona de Palomos municipio de Fredonia; con base en los resultados propone dividir la secuencia en tres zonas. Zona I caracterizada por tener porcentajes altos de angiospermas y esporas de hongos, separados por altos contenidos de palmas, que podría estar reflejando cambios en las condiciones climáticas. Zona II donde se destaca el dominio de las angiospermas sobre las palmas en la base con un aumento progresivo al techo y por último una Zona III identificada por la disminución de palmas, esporas de hongos y de inaperturopollenites los cuales desaparecen en el techo. Los resultados palinológicos le permitieron concluir que las condiciones de formación de los carbones esta asociada a un sistema reotrófico, desarrollado en un ambiente fluvial, con una vegetación de bosque húmedo tropical y bajo la influencia de condiciones marinas transicionales.

Blandón et al. (2004), con base en el análisis petrográfico, químico y palinológico de once muestras de asociaciones de litotipos de carbón en la variación vertical del manto 1 de la mina El Bloque ubicada en el municipio de Amagá (Antioquia), concluyen que la turbera precursora del carbón se formó bajo condiciones principalmente reotróficas (pantano planar), reductoras y con altos niveles freáticos. Además la presencia de *Zonocostites ramonae* junto con algunos dinoflagelados sugiere que la turbera estuvo expuesta a incursiones marinas.

Muñoz (2004) y Muñoz et al., (2004), a partir del estudio detallado cm a cm de la reconstrucción de la paleovegetación del manto 1 de la zona de Palomos, encontraron evidencias de formaciones vegetales inundadas muy diversas, dichas variaciones se presentan en intervalos de tiempo de miles de años; lo cual confirma que la migración de la vegetación en los trópicos puede ser rápida al cambiar las condiciones ambientales. También encontraron que la concentración mayor de palmas parece estar asociada con la depositación de arcillas que fueron depositadas durante periodos de inundación de la llanura; esta observación confirma el ambiente de inundación permanente relacionado a los morichales.

Con base en lo anterior es posible decir que los estudios sedimentológicos infieren un ambiente fluvial para los carbones, mientras que los estudios palinológicos sugieren influencia marina. Por esta razón es necesario profundizar más en el estudio detallado de los carbones para tratar de

discernir cual sería el ambiente de depositación de los carbones del Miembro Sabaletas de la Formación Amagá.

1.3.2. Definiciones

Maceral: Son los constituyentes orgánicos microscópicamente reconocibles en el carbón y las rocas sedimentarias. En analogía al término de "Minerales" empleado para designar los componentes microscópicos de las rocas inorgánicas (Stach, 1982; Bustin, 1985). Mientras que un mineral se caracteriza por: tener una composición química bien definida, uniformidad de su sustancia y porque la mayoría de ellos son cristalinos, un maceral varía ampliamente en su composición química, en sus propiedades físicas y no es cristalino, pudiendo diferenciarse solamente por sus características petrográficas.

Se distinguen entre sí por su *forma, tamaño, estructura, color, relieve, poder reflector, anisotropía, dureza y fluorescencia* (Bustin, 1985). Los macerales de un mismo grupo difieren entre sí, más en su estructura botánica y morfología, que en su reflectividad. El Comité Internacional de Petrografía del Carbón los ha clasificado en tres grupos (Tablas 1.2, 1.3 y 1.4):

- Vitrinitas/Huminitas
- Liptinitas/Exinitas
- Inertinitas

GROUP	SUBGROUP	MACERAL
V I T R I N I T E	Tellovitrinite	Telinite Collotelinite
	Detrovitrinite	Vitrodetrinite Collodetrinite
	Gelovitrinite	Corpogelinite Gelinite

Tabla 1.2. Macerales del grupo vitrinita (Oviedo, 1994).
Macerals of the vitrinite group (Oviedo, 1994)

MACERAL GROUP	MACERAL	MACERAL VARIETY
LIPTINITE	Sporinite	Tenusporinite Crassisporinite Microsporinite Macrosporinite
	Cutinite Resinite	
	Alginite	Pila -alginite Reinchia-alginite
	Liptodetrinite Fluorinite Bituminite Exsudatinite Suberinite	

Tabla 1.3. Macerales del grupo de la liptinita (Bustin, 1985).
Macerals of the liptinite group (Bustin, 1985)

Macerals with celular structure of plants	Fusinite Semifusinite Funginite
Macerales whithout celular structure of plants	Secretinite Micrinte Macrinite
Inertinite fragmented	Inertodetrinite

Tabla 1.4. Macerales del grupo de la inertinita (ICCP, 1994)
Macerals of the inertinite group (ICCP, 1994)

En la figura 1.1., aparecen los macerales vitriniticos, liptiníticos e inertiníticos más comunes con sus equivalentes en palinofacies de los carbones estudiados.

Litotipo. El manual del Comité Internacional de Petrografía del Carbón (1963) define los litotipos como “Bandas Macroscópicamente reconocibles en los carbones húmicos”, clasificándolos en cuatro litotipos: Vitreno (bandas brillantes), Clareno (bandas semibrillantes), Dureno (bandas opacas), Fuseno (Charcoal-Mineral). Stach (1982) acepta la misma definición de litotipos e incluye dos litotipos para los carbones sapropélicos (los Cannel y Boghead). Según este autor, las características más comunes que se presentan en los carbones sapropélicos, son su brillo sedoso, la textura homogénea, la raya marrón, la ausencia de estratificación y su alta dureza. La fractura frecuentemente es concoidal, especialmente en los Cannel. La distinción entre los carbones sapropélicos, sólo se puede hacer microscópicamente, siendo los carbones boghead aquellos que presentan un alto contenido de algas (Alginita) y los cannel los que tienen un porcentaje alto de granos de polen y esporas.

Uno de los criterios más utilizados en la identificación y correlación de los mantos de carbón, se basa en la descripción macroscópica de los carbones, ya que los perfiles (dos o más) de un mismo manto son similares en diferentes lugares de una misma cuenca, lo cual permite que un manto de carbón se pueda identificar por la descripción detallada de las distintas bandas reconocibles macroscópicamente, ya que presentan características constantes lateralmente.

Los australianos han creado otra alternativa para la descripción macroscópica de los carbones, en donde estos se clasifican de acuerdo a la mezcla de componentes opacos y brillantes; y en donde los litotipos se definen de acuerdo a las proporciones en que están presentes los componentes básicos. La nomenclatura propuesta por Diessel (1965) se da en la tabla 1.5. Los australianos sugieren como límite mínimo para considerarlo como litotipo 10 mm. Es importante anotar que esta descripción hecha por Diessel (1965), se aproxima más a las características macroscópicas de los carbones colombianos. Queda claro que las descripciones macroscópicas pueden dar una idea aproximada de la composición maceral.

CLASSIFICATION ACCORDING STOPES	CLASSIFICATION USED FOR THE AUSTRALIAN COALS	DESCRIPTION
VITRENE	Brilliant coal	Brightness vitreous a subvitreous, fracture conchoideous. <10% of dark components.
	Banded (striped) brilliant coal	Brilliant coal, with some dark bands 10-40% of dark.
CLARENE	Banded coal	Bands or stratus very thin of brilliant and dark coals, in proportions between 40-60%.
	Banded dark coal	Dark coal with some thin brilliant bands 10-40% of brilliants.
DURENE	Dark coal	Brightness dull, fracture irregular <10% of components brilliants.
FUSENE	Fibrous coal	Brightness fatty, friable.

Tabla 1.5. Clasificación de litotipos usada en Australia (Diessel, 1965)
Classification of lithotypes used in Australia (Diessel, 1965)

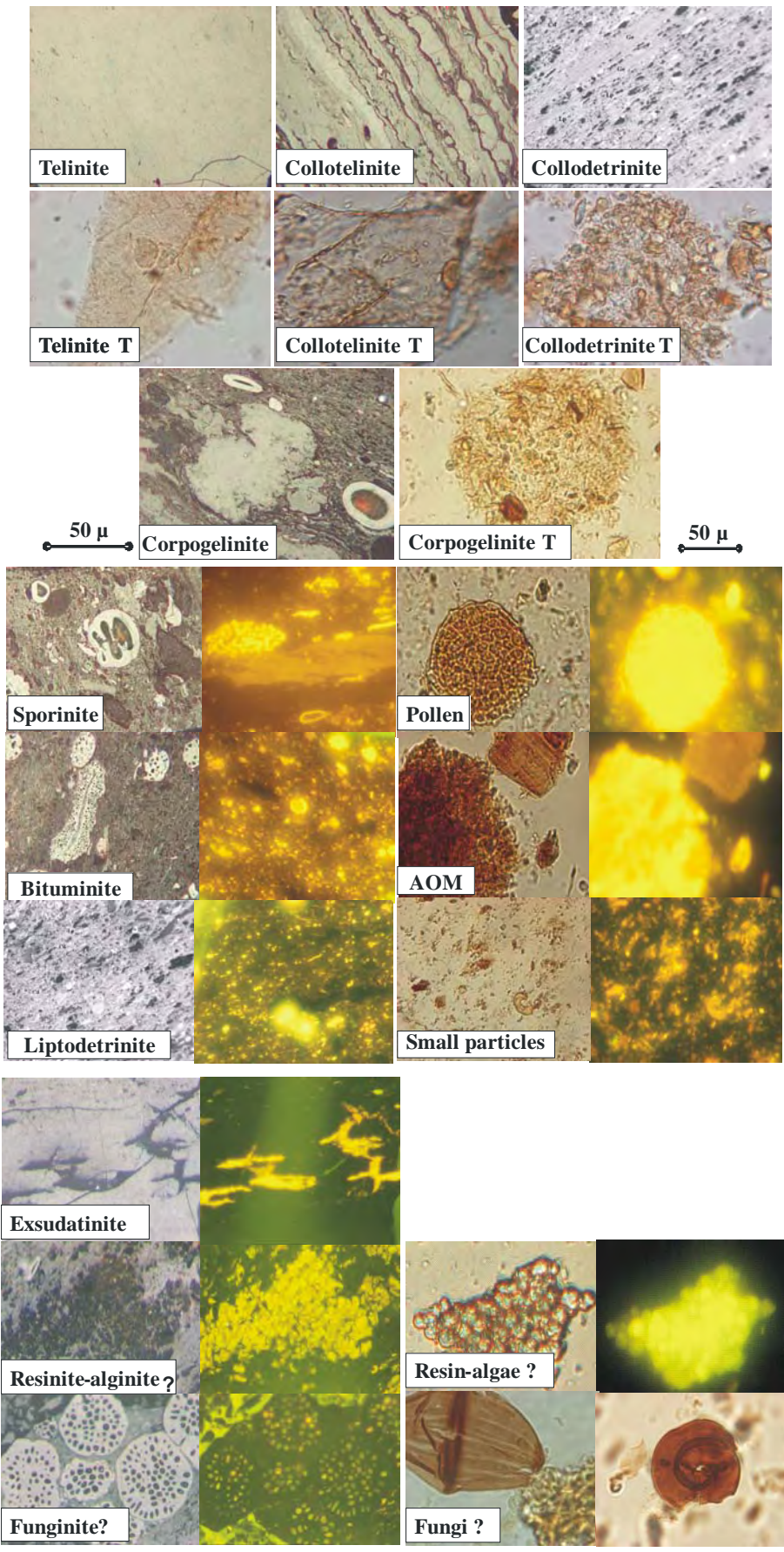


Fig. 1.1: Macerales vitriniticos, liptiniticos e inertiniticos estudiados en petrografía y palinofacias. *Vitrinitic, liptinitic and inertinitic macerals of studied coals in petrography and palynofacies.*

Uno de los usos más frecuentes de la descripción de los litotipos es la correlación de mantos de carbón. Tradicionalmente se han utilizado criterios geológicos muy amplios, tales como, la geometría general del manto, (como: espesor y/o el número de intercalaciones de estériles); características poco comunes de los mantos (como: restos de plantas y fósiles marinos, areniscas de canal, conglomerados). En una escala mucho más detallada, se están empleando las características macroscópicas de cada uno de los mantos y las intercalaciones de estériles muy finos, los cuales nos proveen de distintivos que hacen que los mantos se puedan correlacionar a grandes distancias. Para simplificar las descripciones detalladas, realizadas en columnas de manto, en un laboratorio, algunos autores (Cameron, 1978) han creado una clasificación de tipos de carbón (Tabla 1.6).

TYPE OF COAL	PROPORTION OF LITHOTYPES
Brilliant (B)	>75% Vitrene + Clarene Brilliant
Semibrilliant (SB)	50-75% Vitrene + Clarene Brilliant
Semidark (SD)	25-75% Vitrene + Clarene Brilliant
Dark D	<25% Vitrene + Clarene Brilliant
Intercalations of sterile P	

Tabla 1.6. Proporción de los litotipos de acuerdo al tipo de carbón (Cameron, 1978).
Proportion of lithotypes according to type of coal (Cameron, 1978).

Además los litotipos como los microlitotipos, son el producto del ambiente de depositación, razón por la cual son útiles en la identificación de mantos, ya que es muy poco probable que en el tiempo se repitan iguales condiciones de sedimentación. Los litotipos se pueden considerar como una consecuencia de la tasa de subsidencia de la cuenca (Tasch, 1960).

Fuseno. Bajas tasas de subsidencia, unidas a un nivel de aguas muy poco profundas que hace que periódicamente entre en contacto la turba con el oxígeno del aire. Es posible que se presenten emersiones.

Clareno y vitreno. Zonas de inundación a áreas poco profundas o someras.

Dureno. Esta relacionado con un ambiente de aguas más profundas que el vitreno y el clareno.

Lutita carbonosa. Aguas mucho más profundas que el dureno.

Plies. Son subdivisiones litológicas de un manto, cada una de las cuales tiene un carácter uniforme, cuando la litología cambia, tal como una intercalación de arcilla en el manto, se designa un ply separado. En general el espesor de los plies de carbón deberían variar entre mínimo 0.1 m y máximo 1.0 m, (Thomas, 2002). En la figura 1.2, se tiene la descripción de un manto por plies y sus respectivas convenciones en los carbones estudiados.

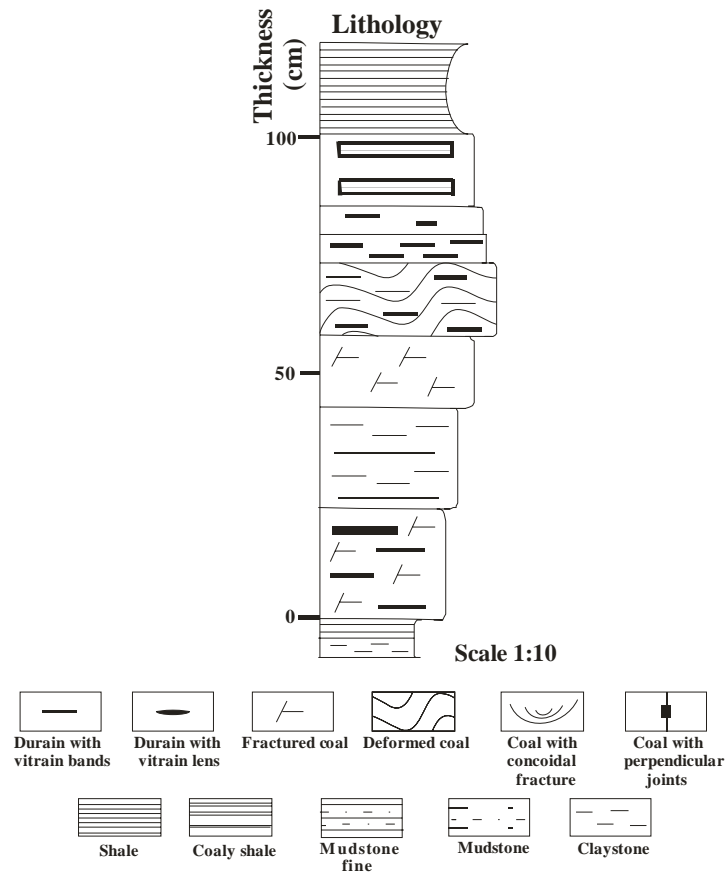


Fig. 1.2. Descripción de los plies en un manto de carbón y las convenciones de los plies típicos en los carbones estudiados.

Description of plies in a coal seam and legend for the typical plies encountered in the studied coals.

1.4. ESTADO DEL ARTE DE LA GENERACIÓN Y EXPULSIÓN DE HIDROCARBUROS EN CARBONES.

1.4.1. General

Durante las últimas décadas se ha intensificado el estudio de la generación de aceite a partir de materia orgánica terrestre, y a su vez sobre la capacidad de generación y expulsión de hidrocarburos líquidos en carbones. Es así que durante los últimos 10-15 años se han escrito una gran cantidad de artículos y libros relacionados con este tema. Esto se debe a la necesidad de establecer el sistema fuente, las fases y composición del petróleo antes de perforar un pozo.

Aquí se presenta un recuento global de las ideas y problemas que hasta el momento se tienen en la ciencia de la materia orgánica relacionada con la generación de hidrocarburos líquidos en carbones y lutitas con gran contenido de materia orgánica terrestre.

Algunos de los problemas que se evidencian en la bibliografía consultada en cuanto al potencial de generación de hidrocarburos de los carbones usando el análisis petrográfico tradicional son:

- Aunque los métodos microscópicos son poderosos, las conclusiones químicas que se pueden obtener son limitadas (Powell et al., 1982; Wilkins & Georges, 2002).
- El sistema de clasificación maceral clásico parece poco adaptado al sistema de evaluación para definir el potencial de aceite de los carbones (Bertrand, 1984; Collinson et al., 1994; Fleet & Scott, 1994; Powell & Boreham, 1994).

- No existe una nomenclatura claramente integrada para describir los carbonos y los kerógenos relacionados, adicionalmente sus precursores botánicos y los productos de petróleo se necesitan establecer (Scott & Fleet, 1994).
- El conocimiento botánico, los controles depositacionales y diagenéticos, los cuales determinan la formación de secuencias carbonosas potenciales para aceite, y de aquí la habilidad para predecir su presencia es normalmente empírica y falta entender de la entrada de los procesos involucrados (Fleet & Scott, 1994).
- Fleet & Scott (1994) enfatizaron la importancia de integrar los estudios botánicos, petrológicos y geoquímicos, porque con la obtención de buenos resultados de un solo parámetro es difícil debido a la complejidad de los procesos que se presentan en la generación de aceite a partir de los carbonos.

Teoría general de la generación de hidrocarburos: La teoría de generación de hidrocarburos fue gradualmente desarrollada por diversos autores (Louis, 1964; Vassoevich et al., 1974; Albrecht & Ourisson, 1969; Louis & Tissot, 1969, Tissot & Welte 1984; y otros), y mediante varios estudios muestran que los principales hidrocarburos comerciales son generados por la transformación termal del kerógeno durante el enterramiento de las rocas fuentes.

Las bases conceptuales de esta teoría son:

- La materia orgánica al final de la diagénesis es principalmente kerógeno. La transformación térmica del kerógeno es responsable de la generación de los principales hidrocarburos (líquidos y gaseosos). El kerógeno es el principal precursor de los componentes del petróleo (Tissot y Welte, 1984).
- El esquema general de generación de hidrocarburos esta resumido en la figura 1.3.

Aunque este es un esquema general de la evolución de la materia orgánica que ocurre durante la historia de enterramiento (temperatura y presión), la cantidad total de hidrocarburos que se pueden generar y la importancia relativa de aceite y gas, dependen de la composición de la materia orgánica original (Tissot et al., 1974).

Durand et al., (1972), Espitalié et al., (1973), Durand & Espitalié, (1976) estudiando la cuenca de Paris y la cuenca de Douala (Cameroon) definen algunas sendas de evolución del kerógeno. De estos estudios y otros, Tissot y Welte, (1974) relacionan las sendas geoquímicas y la petrología del kerógeno y sacan las siguientes conclusiones:

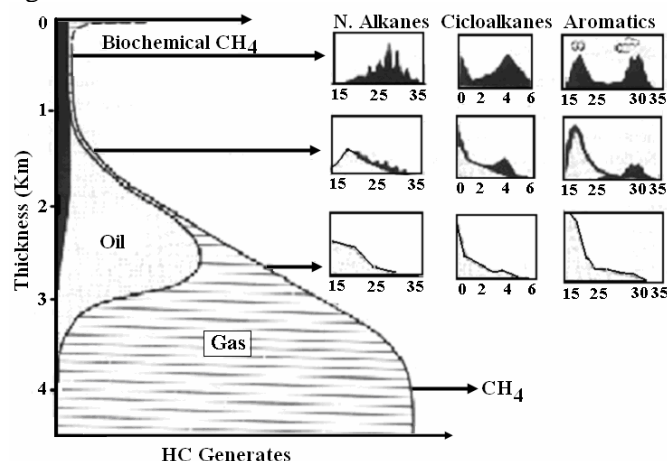


Fig. 1.3. Esquema general de generación de hidrocarburos. La escala de profundidad se basa en ejemplos de rocas fuentes del Paleozoico y Mesozoico, esto es sólo un indicativo y puede variar de acuerdo a la naturaleza de la materia orgánica original, historia de enterramiento y gradiente geotérmico. Tomado de Tissot et al. (1974).

General scheme of hydrocarbon generation. The depth scale is based on examples of source rocks from the Palaeozoic and Mesozoic; this is only an indication and may vary according to the type of organic matter, burial history and geothermal gradient (after Tissot et al., 1974).

1. *Kerógeno Tipo I*, tiene altas relaciones H/C y relativamente bajas relaciones O/C, y es rico en estructuras alifáticas: este kerógeno posee excelente potencial para generar aceite y está asociado a sedimentos ricos en algas, en particular los derivados de *Botryococcus* de origen lacustre (Bogheads), y sus equivalentes marinos (Tasmanites).
2. *kerógeno Tipo III*, tiene bajas relaciones H/C y relativamente altas relaciones O/C con estructuras aromáticas predominantes. Este kerógeno no posee buen potencial para generar aceite, pero sí para generar hidrocarburos gaseosos. Está asociado a abundantes contribuciones de plantas superiores y material húmico terrestre, acumulado en ambientes no marinos o en ambientes parálidos.
3. *Kerógeno Tipo II*, posee relativamente altas cantidades de H/C y baja relación O/C comprendido entre los dos anteriores. Este kerógeno posee potencial para generar aceite/gas. Está asociado a granos de polen y esporas con material de los otros tipos de kerógeno.

Marcados éxitos de esta teoría han sido demostrados en exploración de aceite y gas, y los principales yacimientos de hidrocarburos han sido relacionados a esta teoría (transformación termal del kerógeno). De esta manera fue como se generalizó y formó el pensamiento convencional que la materia orgánica de origen terrestre no podía generar y expulsar grandes cantidades de hidrocarburos líquidos.

Hedberg (1968) fue el primero en reconocer un número importante de aceites de origen terrestre (no marinos) en varias cuencas del mundo. Se basó en el contenido de ceras y la naturaleza parafínica de los aceites, indicando un origen cuticular y de plantas terrestres.

1.4.2. Carbones

Con la aparición de nuevos datos se reconoció la idea de que la materia orgánica de origen terrestre podía generar acumulaciones comerciales de hidrocarburos, y que la mala calidad de la materia orgánica se ve compensada no solo con grandes secuencias de rocas, sino también por la mayor cantidad de materia orgánica que poseen estas rocas.

Universalmente se está de acuerdo que la materia orgánica terrestre dispersa (MOD) en algunas lutitas carbonosas genera y expulsa fácilmente petróleo; esto es curioso, pero hay pocas diferencias geoquímicas consistentes entre macerales del carbón y MOD en lutitas carbonosas (Wilkins & George, 2002). Con respecto a este punto existen muchas discusiones, y el debate geológico sobre si los carbones húmicos son y en que cantidad capaces de generar hidrocarburos líquidos todavía continúa. Claro está, que algunos avances en el conocimiento de los procesos involucrados, ha permitido sacar nuevas conclusiones.

Littke & Leythaeuser (1993) en Wilkins & George (2002) han resumido las observaciones que indican alguna importancia para la generación de petróleo en carbones:

- Los carbones pueden contener significantes cantidades de macerales liptiníticos ricos en hidrógeno.
- Cuando son calentados, los carbones producen petróleo como producto de la pirólisis.
- Los carbones bituminosos contienen bitumen que puede ser fácilmente liberado por extracción usando solventes comunes.
- Los carbones son una fuente importante de metano.
- Algunas acumulaciones de aceite y gas ocurren en cercanías a estratos de carbón.
- Finalmente, la secuencia de maduración de materia orgánica terrestre a través de turba, carbones bituminosos, antracita implica una pérdida significativa de productos volátiles, incluyendo hidrocarburos.

De otro lado, diferentes observaciones se han propuesto como evidencia de la generación de aceite en carbones:

De acuerdo a diferentes autores, macerales tales como bituminita (Teichmuller, 1974; Teichmuller & Durand, 1983; Teichmuller, 1989; Snowdon & Powell 1982; Wan Hasiyah, 1999; Taylor et al., 1998), vitrinita (Tissot & Welte, 1974; Radke et al., 1980; Killops et al., 1994; Newman et al., 1997; Huang, 1999; Mastalerz & Glikson, 2000), exsudatinita (Teichmuller & Teichmuller, 1975; Mac Gregor & Mackenzie, 1987), resinita (Snowdon, 1980), inertinita (Smith, 1983), desmocolinita (Garcia- Gonzales et al., 1997; Killops et al., 1994), liptodetrinita (Scout, 1994), juegan un papel importante en la generación de hidrocarburos.

Con diferentes metodologías se ha demostrado que los carbones son capaces de generar importantes cantidades de hidrocarburos líquidos y que ellos se expelen más fácil y pronto que de otras rocas fuentes (Durand & Paratte, 1983; Shanmugam, 1985; Stout, 1994; Wilkins & George, 2002; Weng et al., 2003). De acuerdo con Laplante (1974), Snowdon & Powell (1982), Macgregor (1994), Huang (1999) y Petersen (2004), los carbones pueden empezar a generar hidrocarburos a niveles de baja madurez. La mayoría de los carbones generadores de aceite están en el rango de edad Jurásico-Terciario y se encuentran ubicados en el hemisferio sur (Thomas, 1982; Hoffman et al., 1984; Fleet & Scott 1994; Philp, 1994; Macgregor, 1994; Powell & Boreham, 1994), pero también se encuentran en países tales como Nigeria, Greenland, Egypt y Canada

La materia orgánica tipo III o terrestre puede generar aceite y gas condensado en cantidades variables y a variados niveles de maduración termal como una función del contenido de resinita, liptinita e inertinita dentro de la fracción orgánica (Snowdon & Powell, 1982), o como resultado de la actividad bacteriana (Powell, 1987; Taylor, 1988 en Taylor et al., 1998; Curry et al., 1994; Powell & Boreham, 1994).

Existen correlaciones roca fuente-aceite que permiten evidenciar la generación de hidrocarburos líquidos a partir del carbón (Blandón & Giraldo 1989; Newman et al., 1997; Canónico et al., 2004). Fleet & Scott (1994), Powell & Boreham (1994) y Stout (1994) sugieren que la expulsión de hidrocarburos en carbones es un factor crítico para tratar de entender acumulaciones comerciales de hidrocarburos líquidos. Sin embargo, los trabajos en áreas donde hay una fuerte evidencia geoquímica de que los carbones son roca fuente no se le da mucha importancia al problema de la expulsión. Collinson et al., (1994) and Powell & Boreham (1994) dan gran importancia a los controles botánicos, depositacionales y diagenéticos para explicar la formación de secuencias o estratos de carbón potenciales para generar aceite. La composición botánica del carbón ha variado a través del tiempo geológico, distinguiéndose comunidades de plantas que han sido gobernadas por el clima y otros factores ambientales.

Varios autores plantean diferente orden en la generación de hidrocarburos de los macerales del carbón (Tablas 1.7 y 1.8).

A medida que aumenta el rango de carbonificación, el cambio de la intensidad de la fluorescencia de la vitrinita ocurre primero que en la esporinita, indicando que la generación de hidrocarburos en la esporinita se presenta a más altas temperaturas.

El modelo de generación de hidrocarburos de Huang (1999) muestra diferentes sendas de evolución en ambientes potenciales para gas y potenciales de aceite (humificación para gas y sapropelificación para aceite). Las tres etapas de generación de hidrocarburos tienen sus propias características: el aceite pesado se forma en la etapa diagenética y se caracteriza por la transformación de lípidos solubles para generar directamente hidrocarburos y transformar kerógeno fósil; la fase más temprana de la catagénesis ($R_o < 1,2\%$) se caracteriza por la formación de aceites normales derivados principalmente de la transformación termal del kerógeno; la fase tardía de la catagénesis se caracteriza por la formación de aceite liviano y gas húmedo por el craqueo de pirobitumen y aceite normal. Y el gas seco se forma en la etapa de metagénesis (Fig. 1.4).

CONTRY/ BASIN	AGE OF OIL-PRONE COAL	HYDROGEN INDEX (IH)
Australia Gippsland basin Cooper basin Bowen basin	Late Cretaceous -Tertiary. Permian Jurassic	200-350 150-300 200-400
China Turpan basin	Jurassic	?
Indonesia Ardjuna basin Delta of Mahakam - Kutei basin	Late Oligocene Middle Miocene	250-400 200-350
New Zealand Taranaki basin	Late Cretaceous -Tertiary	?
Nigeria Niger Delta	Late Cretaceous - Tertiary	>200
Noruega Area Haltenbanken, Sea of North	Jurassic	100-350
Area Danish Sea of North	Middle Jurassic	>220

Tabla 1.7. Algunos casos de estudio en el cual los carbones son rocas generadoras de aceite.
Nota: Índice de hidrógeno medido en muestras inmaduras (modificada de Powell & Boreham, 1994).
Some case studies of oil-prone coals.
Note: Hydrogen indices measured in immature samples (after Powell & Boreham, 1994).

METHOD	ORDER OF OIL GENERATION
Geochemistry	Resinite > vitrinite > others liptinites
Geochemistry, Spectroscopy of Fluorescence	Suberinite > resinite >> sporinite y cutinite
Petrography	Vitrinite >Liptinite
Petrography	Telovitrinite > desmocolinite > suberinite > others liptinites
Spectroscopy of fluorescence	Suberinite + resinites terpenics > perhydrous vitrinite
Spectroscopy of fluorescence	Cutinite > sporinite
Spectroscopy of fluorescence	Suberinite > terpenic resinite > cutinite > sporinite > alginite > lipid resinite
Petrography, pyrolysis.	Early generation of diterpenic resinites
Spectroscopy of fluorescence and pyrolysis.	Suberinite > cutinite > sporinite > alginite.
Petrography and geochemistry	Ortohydros > perhydros vitrinite
Pyrolysis of anhydrous closed system	Early generation from vitrinite. Suberinite, resinite, biodegraded amorfnite > alginite, cutinite, sporinite, algal amorfnite.

Tabla 1.8. Orden de generación de aceite de macerales (Wilkins & George, 2002).
Oil generation order for various macerals (Wilkins and George, 2002).

Expulsión de hidrocarburos líquidos en carbones. La principal razón para no aceptar que el carbón expulsa hidrocarburos líquidos en gran cantidad es por la adsorción de aceite de las macromoléculas orgánicas. Sin embargo el llenado de bitumen en areniscas interestratificadas con carbones en el offshore mid-Norway se han interpretado como las rutas de migración de hidrocarburos de los estratos de carbón hacia las areniscas (Wilkins & George, 2002).

Para Stout (1994) y Hasiyah (1999), las asociaciones entre los macerales son los principales mecanismos en la generación y expulsión de aceites. Los carbones se consideran como un variado y complejo grupo de rocas fuentes, las cuales presentan un gran número de factores que controlan la generación y expulsión de petróleo.

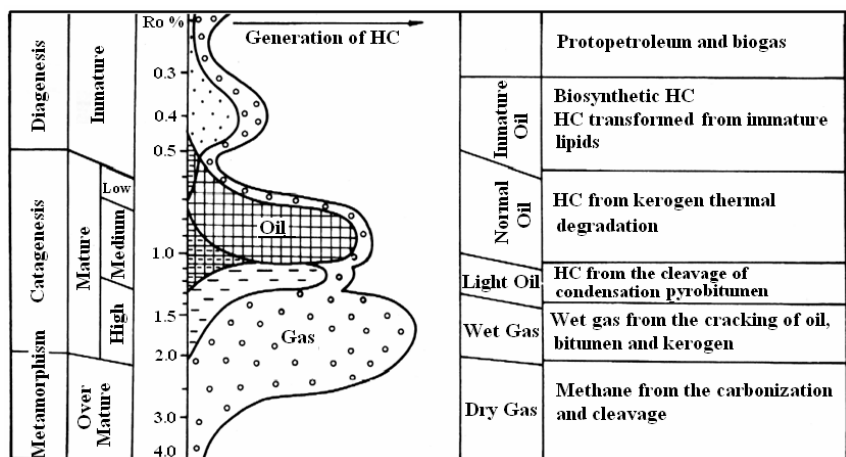


Fig. 1.4. Modelo de generación de hidrocarburos (Huang, 1999).
Model of hydrocarbon generation (Huang, 1999).

1.4.3. Una perspectiva a la aplicación en Colombia.

Los carbones Colombianos son de edad Cretáceo Tardío-Terciario, y se ubican en una paleogeografía de bajas latitudes, los cuales concuerdan con los rangos establecidos por Macgregor (1994) de los principales carbones generadores de aceite (oil-prone) en el mundo.

Algunas consideraciones acerca de las características de los carbones sub-bituminosos y bituminosos Colombianos indican que ellos son ricos en H (> 5.0%), tienen vitrinita perhydros, y son relativamente ricos en liptinitas (> 10%; Blandón, 1999). Además, usando parámetros geoquímicos tales como correlación aceite-roca se probó que los carbones de la Formación Umir en la cuenca del Medio Magdalena, son rocas fuentes de petróleo (Blandón & Giraldo, 1989). Estas autoras por primera vez plantean generación de hidrocarburos líquidos en carbones colombianos. Se comprueba mediante correlación crudo roca, que algunos aceites de esta cuenca fueron generados a partir de carbones. Y hoy se ve la necesidad de buscar modelos como este para explicar algunos sistemas petrolíferos del territorio Colombiano.

Arango y Blandón (2006), usando la misma metodología detallada por plies de varios mantos de carbón de la Formación Cerrejón, llegan a la conclusión de que éstos carbones tienen muy buen potencial generador de hidrocarburos y además encuentran una relación directa entre el contenido de inertinitas y el S1, lo cual indica que la mayoría de las inertinitas en los carbones de esta zona, corresponden a los residuos de la generación de petróleo y por lo tanto el contenido de inertinitas de este tipo en un carbón se convierte en un indicador de generación de hidrocarburos.

2. MARCO GEOLÓGICO DE LA FORMACIÓN AMAGÁ

2.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

La Cuenca de la Sinifaná ésta localizada en el flanco occidental de la Cordillera Central (Fig. 2.1). Las unidades litológicas corresponden a rocas sedimentarias de la Formación Amagá dispuestas en pliegues y rocas cristalinas que las delimitan (Fig. 2.2). Las rocas cristalinas son pizarras arcillosas con filitas y cuarcitas del Grupo Ayurá Montebello, granodioritas y cuarzomonzonitas del plutón de Amagá, dioritas, harzburgitas, serpentinitas y gabros de la Formación Ofiolítica del Cauca, basaltos, y sedimentos de la Formación Combia y pórfidos andesíticos y dacíticos (Ramirez, 1992).

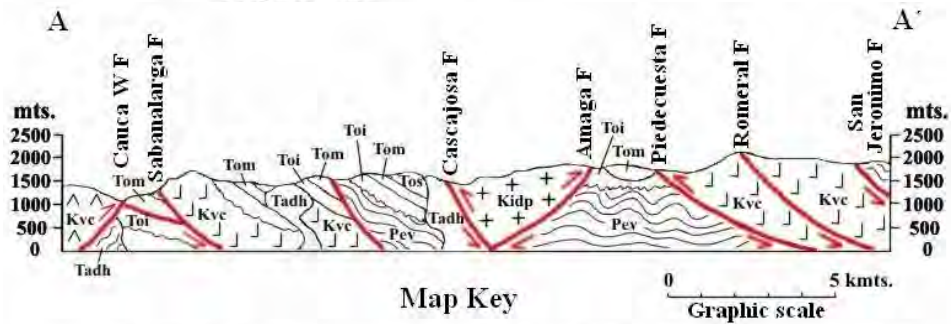
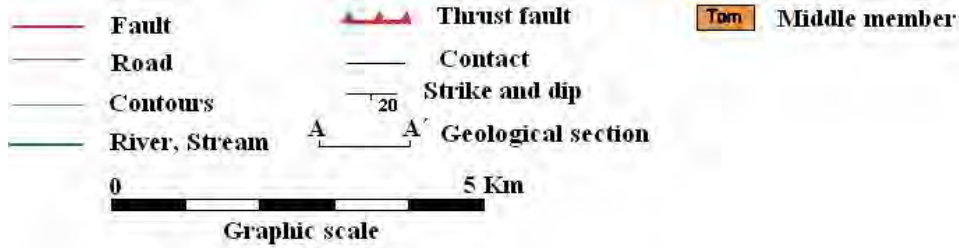
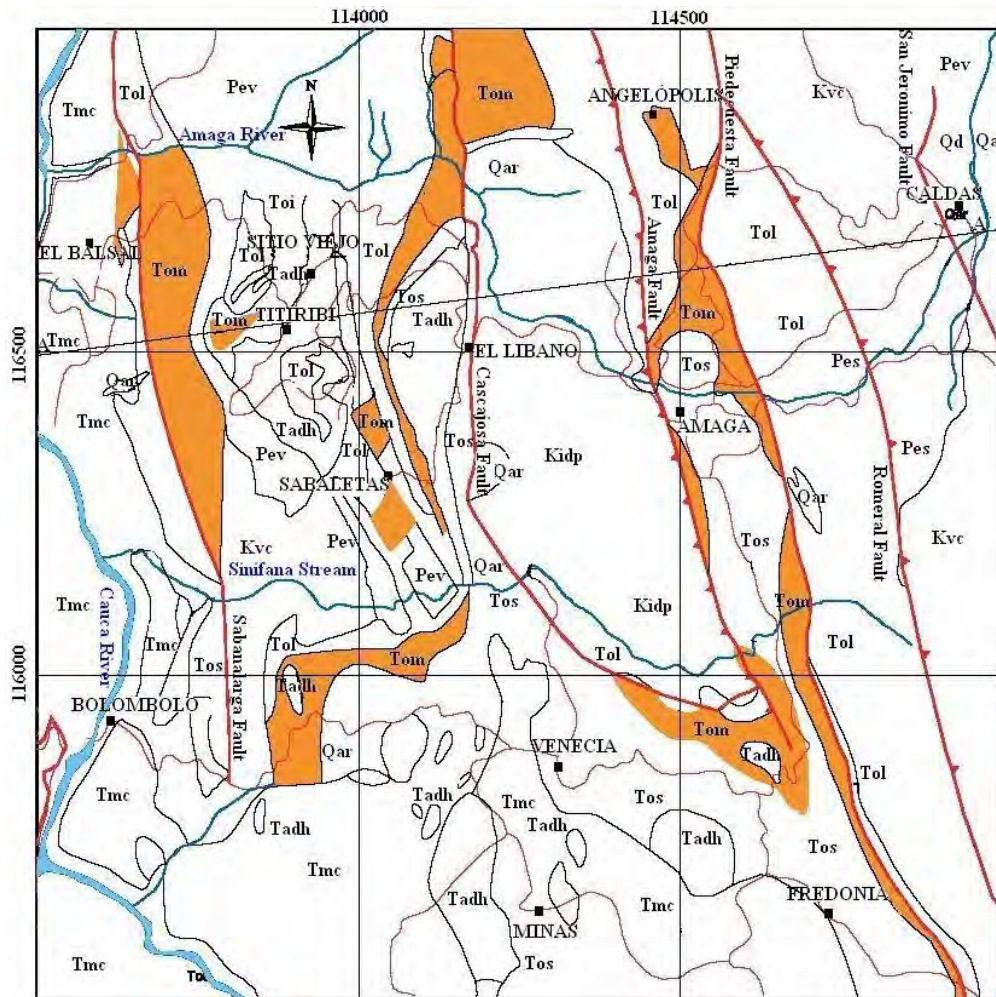


Fig. 2.1. Localización de la zona estudiada (en rojo).
Location of zone studied (in red).

Litoestratigráficamente la secuencia ha sido definida y dividida de forma diferente por varios autores. Guzmán (1991) efectúa una revisión lexicoestratigráfica de la Formación y propone una nomenclatura formal en donde define los siguientes Miembros: Peñitas, Sabaletas y Fredonia (Fig. 2.3).

- Peñitas. De carácter conglomerático, con holoestratotipo en la quebrada del mismo nombre.
- Sabaletas. Alternancia de areniscas, lutitas y carbones, cuyo estratotipo se encuentra en la quebrada Sabaletas.
- Fredonia. Secuencia constituida por arenisca y lutitas sin carbones, el holoestratotipo se levantó en la sección de El Plan.

Las rocas detríticas se clasifican como ortocuarcitas y sublitarenitas, cuyas unidades fuentes son el granito de Amagá, la Formación Quebrada Grande y el Complejo Polimetamórfico de la Cordillera Central (Guzmán, 1991; Carmona, 1992). Los carbones son límnicos autoctónos y desarrollados en su mayoría bajo condiciones anaeróbicas. Las rocas químicas corresponden a micritas (Carmona, 1992).



Qar Recent alluvions	Tos Amaga F. Upper mb.	Kvc Quebradagrande F.
Qd Colluvion deposits	Tom Amaga F. Middle mb.	Kidp Diorita de Pueblito
Tmc Combia Formation	Toi Amaga F. Lower mb.	Pes Phyllite, Schist
Pev Green schists	Fault Fault	
Tadh Hiposabyssal porphyric rocks	Contact Contact	

Fig. 2.2. Mapa y sección geológica de la Cuenca de la Sinifaná (modificado de Ingeominas, 2005).
Map and geological cross-section of the Sinifaná Basin (after Ingeominas, 2005).

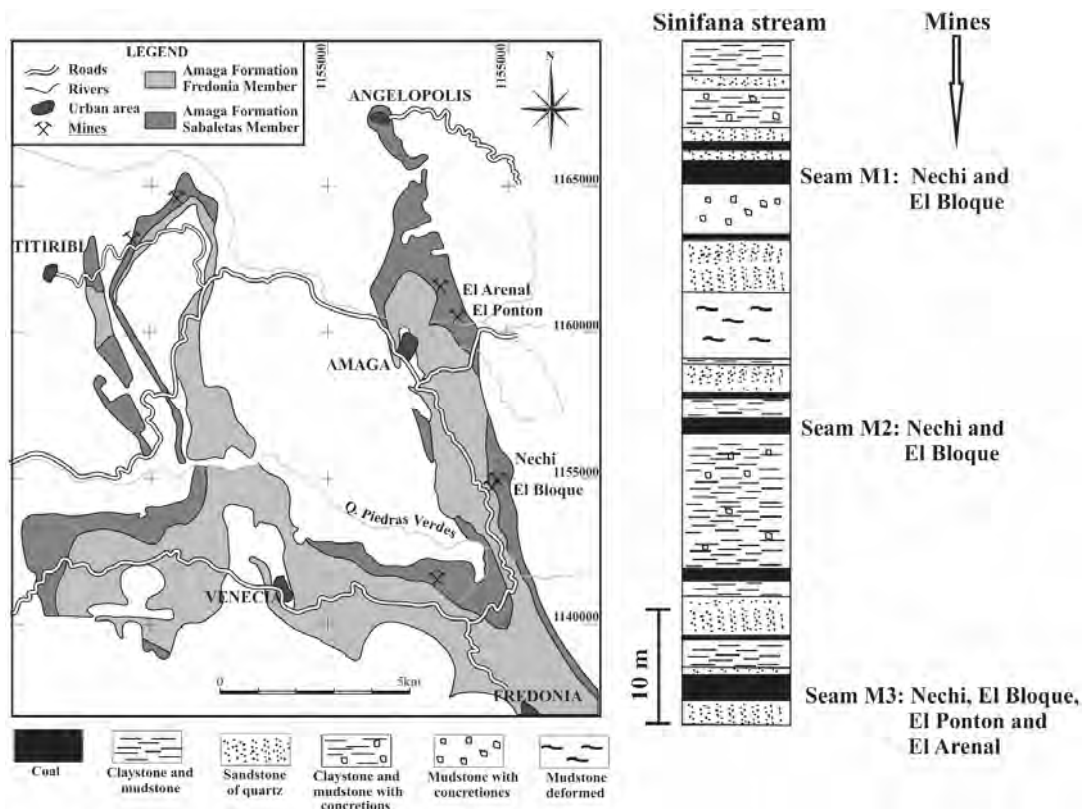


Fig. 2.3. Mapa y columna estratigráfica de la zona estudiada en la Cuenca de Sinifaná (modificada de Ingeominas, 2005).
Map and stratigraphical column of zone studied in Sinifaná Basin (after Ingeominas, 2005).

Fundamentalmente existen dos teorías con respecto al origen de las rocas de la Formación Amagá, una se refiere a una génesis asociada a ambientes transicionales (Delsahut & Tejada, 1982; Escobar & Rozo, 1984; Escobar, 1990; Zegarra, 1993; Carmona, 1997) y otra a una génesis continental (Mejía & Salinas, 1976; Campuzano 1977; Guzmán & Sierra, 1984; Guzmán, 1991). Los argumentos palinológicos (presencia de polen y esporas que son indicadoras de ambientes de manglar y microfauna de origen marino) “respaldan” la primera teoría (Escobar & Rozo, 1984; Escobar, 1990; Zegarra, 1993, Sucerquia, 2004; Arango, 2004). Los argumentos sedimentológicos (presencia de facies asociadas con abanicos aluviales, ausencia de sedimentos marinos someros y de frente deltáico) “respaldan” la segunda teoría (Guzmán & Sierra, 1984; Guzmán, 1991). No existen suficientes estudios que permitan confirmar las hipótesis planteadas respecto a su origen continental o transicional (ver tabla 2.1). La presencia en las palinofacies de *Zonocostites duquei*, junto con granos de polen de palma (*Mauritiidites*) y escasos dinoflagelados sugieren un ambiente parálico para el origen de los carbones del M1 El Bloque y Nechí.

No hay una uniformidad con respecto a la edad, ya que incluso con datos palinológicos cada uno de los autores arriba mencionados, proponen edades diferentes. Así por ejemplo: Eoceno Inferior-Superior para Escobar (1990), Oligoceno superior-Mioceno para Zegarra (1993), por lo tanto para tener datos más precisos se requiere de estudios paleobotánicos detallados. En el occidente colombiano afloran secuencias Terciarias que pueden correlacionarse con la Formación Amagá, su principal afinidad es la presencia de estratos de Carbón.

De acuerdo al estudio de Termoeléctricas en Colombia elaborado por el Centro de Investigaciones del Carbón y la Universidad Pontificia Bolivariana para EPM, la cuenca de la Sinifaná se dividió en varias áreas. Los carbones analizados en este proyecto corresponden al sector Amagá- Nechí, el cual pertenece al área Amagá-Angelópolis la cual se describe a continuación (Fig. 2.3)

2.2. ZONA DE ESTUDIO

Área Amagá – Angelópolis (Fig. 2.3): Es la porción central de la cuenca de la Sinifaná limita al sur con el área Venecia - Fredonia y se extiende un poco al norte de la población de Angelópolis. Se trata de una franja alargada y estrecha con una longitud de 17 Km y un ancho de 1,5 Km para una superficie de 26 Km². Las poblaciones de Amagá y Angelópolis constituyen los centros urbanos de mayor importancia. La zona se divide en los sectores Amagá-Angelópolis y Amagá - Nechí.

Para el sector Amagá-Nechí la zona más promisoriosa se encuentra entre las minas San Fernando y Nechí comprendida por ambas concesiones en la jurisdicción de Camilo C. Esta zona no se ha explotado ya que los mantos no afloran por estar cubiertos por el Miembro Fredonia de la Formación Amagá. Sin embargo, es de anotar que los mantos superiores de carbón presentan continuidad entre las minas San Fernando y Nechí.

2.3. HISTORIA DEL CONOCIMIENTO SOBRE LA FORMACIÓN AMAGÁ

La tabla 2.1 presenta un resumen de la historia de la evolución del conocimiento acerca de la Formación Amagá.

Año	Autor	Denominación o Ambiente	Criterio	Localidad	Edad
1911	Ospina				Cretáceo
1913	Posada	Formación Carbonífera de Amagá	Estratigráfico		Cretáceo
1919	Scheibe	Formación Carbonífera de Antioquia			
1921	Restrepo		Estratigráfico		Cretáceo superior Terciario inferior
1926	Grosse	Terciario Carbonífero de Antioquia y la divide en tres pisos (inferior, medio y superior) origen continental	Gasterópodo Melanida del genero Hemisinius		Neoterciario
1958	Van der Hammen		Correlación con Cauca superior		Oligoceno superior Mioceno inferior
1970	Shaler y Doubinger		Abundancia de Verrucatosporites Usmensis y Mauritidites Franciscoi, Retitricolporites Irregularis	Manto -I Mina el Silencio	Eoceno superior-Oligoceno
1976	Mejía y Salinas	Terrestre continental y autoctonía de los carbones	Petrografía de carbones		
1977	Campuzano	Fluvial		Carretera Amagá-Bolombolo	
1980	González	Formación Amagá y divide en tres miembros (inferior, medio y superior)			
1983	Delsaut y Tejada	Dos miembros y una inconformidad		Sabaletas y Palomos	
1983	Dueñas y Duque	Correlación con Fm Ciénaga de Oro	Palinología		
1984	Escobar y Rozo	Plataforma marina poco profunda que corresponde a una llanura de inundación la cual se encontraba relativamente cerca al mar.	Palinología Valores máximos de Mauritidites Franciscoi (palmera moriche) Verrucatomonosporites Usmensis, Retitricolporites Irregularis y Perisincolporites Pokorny. Dinoflagelados	Minas la Aurora, Hornilla y Paniagua estación la Clarita Mpio de Angelópolis	El piso medio de la Fm Amagá pertenece al Eoceno Medio o superior.
1984	Guzmán y Sierra	Fluvial	Sedimentología y estratigrafía	Cuenca Amagá Angelópolis	
1984	Pons		Flora	Miembro medio Titiribí	Oligoceno superior y

Año	Autor	Denominación o Ambiente	Criterio	Localidad	Edad
1988	Herrera y Mejía	Sintema de Amagá Influencia marina para el miembro superior		y Amagá	Mioceno inferior
1990	Escobar	Estuario, manglar y bosques de morichales	Palinología Zona I. Mauritiidites Franciscoi y Psilamonocolpites Medius. Además hay Proxapertitescursus, Bombacacidites Annae, Ephedripites Vanegensis, Ctenolophomidites Lisamae Zona II. Pteridophytes (Psilatrilletes, Spiralis, Striatricolpites Catatumbus, Psilatricolporites Operculatus y microflora marina (Cyclusphaera Euribei)	Mina la Corona Vereda la Clarita Mpio de Angelópolis	Paleoceno Superior Eoceno inferior a Superior
1991	Guzman	Fluvial, cuenca intracontinental sin intervención marina. Define los miembros Peñitas, Sabaletas y Fredonia	Estratigrafía y sedimentología	Cuenca Amagá-Angelópolis Estación Minas y la Clarita	
1993	Zegarra	Llanura de inundación próxima al mar y cercana a regiones altas donde la presencia de bosque tropicales es dominante	Palinología Dinoflagelados (Oligosphaeridium) y Cyclusphaera y abundantes granos de angiospermas al igual que palmas (Mauritiidites Franciscoi, Psilamonolotes Medius) acompañados de Verrucatomonosporites Usmensis y Retriticolporites Irregularis	Sopetrán	Tentativa: Oligoceno superior a Mioceno inferior.
1997	Carmona	Fluviales con intervención marina transicional	Petrografía de carbones y palinología Zona I. Angiospermas y esporas de hongos, separados por altos porcentajes de palmas Zona II. Dominio de las angiospermas sobre las palmas y Zona III Disminución de palmas, esporas de hongos y de Inaperturopollenites	Palomos Mpio de Fredonia	
1998	Murillo	Deltáico con dominio continental	Petrografía de areniscas	Quebrada la Sucia Palomos	
2004	Sucerquia	Continental con incursiones marinas en algunos intervalos.	Palinofacies	Cuenca de Sopetrán	
2004	Arango	Parálíco.	Petrografía y palinofacies de carbones (Zonocostites <i>duquei</i> , junto con granos de polen de palma (Mauritiidites) y escasos dinoflagelados	Manto 1 de las Minas Nechí y El Bloque	

Tabla 2.1. Historia de los estudios acerca de la Formación Amagá
History of Amaga Formation studies

Los resultados más importantes se pueden resumir así:

- Grosse (1926) fue el primero que estudió en detalle y cartografió las rocas de la Formación Amagá.
- Van Der Hammen (1958) y Dueñas (1983) hicieron la correlación regional de la Formación Amagá con la Formación Cauca Superior y con los Carbones de la Formación Ciénaga de Oro de la cuenca del alto San Jorge.
- Shuler & Doubinger (1970), Pons (1984), Escobar (1990) y Zegarra (1993) asignan edades para la Formación Amagá que van desde el Eoceno hasta el Oligoceno.
- Guzmán (1991) estudió las rocas de la Formación Amagá desde el punto de vista litoestratigráfico y les asigna nombres a los miembros, inferior, medio y superior.

3. METODOS

3.1. MUESTREO

El muestreo de mantos totales se hizo según los parámetros establecidos en Blandón et al. (2002; ver Fig. 3.1). Para las asociaciones de litotipos (ply) y las rocas asociadas en cada uno de los mantos (intercalaciones) igualmente se hizo con los mismos parámetros cuidando que la muestra se tomara únicamente del estrato específico, además se tomaron muestras de las rocas asociadas en el techo y en el piso y de las intercalaciones presentes.

Las muestras de carbón fueron colectadas de varios mantos del miembro medio de la Formación Amagá, (Fig. 3.2). Cada uno de los mantos fue subdividido macroscópicamente en conjuntos de litotipos (ply, Thomas, 2002). El procedimiento de muestreo de canal fue aplicado para las muestras de carbón y de las lutitas asociadas a este, como del manto total. El tamaño de muestra para cada ply fue de aproximadamente 500g a 1 kg y de 15 - 20 kg para la muestra total. Los principales plies son durenos en varias formas y vitrenos (Fig. 3.2)

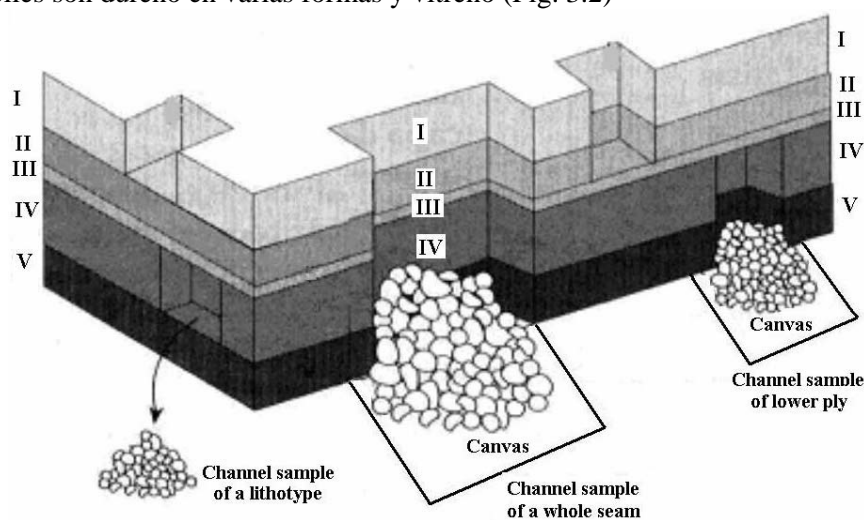


Fig. 3.1. Muestreo de canal del manto total y de la asociación de litotipos (ply).
Channel sampling of total coal seam and lithotype association (ply).

Teniendo en cuenta lo anterior se visitaron cuatro minas de carbón, ubicadas al sur-occidente del departamento de Antioquia en jurisdicción de los municipios de Fredonia y Amagá, las cuales son: Mina Nechi, Mina el Bloque, Mina El Arenal y Mina El Pontón (Fig. 3.2). En cada una de éstas se extrajeron muestras brutas¹ no sólo de los mantos totales sino también de los litotipos y rocas asociadas en los frentes de explotación de tal modo que el número de muestras por manto varía entre 8 y 15 para un total de 92 muestras (tabla 3.1).

Mines	Name of Seam	Number of Samples
Nechi	1	13
	2	14
	3	8
El Bloque	1	13
	2	8
	3	10
El Arenal	3	11
El Pontón	3	15

Tabla 3.1. Minas, mantos y muestras estudiadas.
Mines, coal seams and samples studied.

¹Muestra bruta o gross sample: muestra mixta que representa un manto de carbón y esta compuesta por incrementos en los cuales no ha habido reducción ni división (cuarteo).

De algunos mantos se extrajeron dos muestras del manto total en diferentes puntos. Pero la de las asociaciones de litotipos, se tomaron en un solo punto.

En la tabla 3.2 se registran los datos de las minas visitadas.

Mina y Manto	Ubicación	Espesor	Rumbo y buzamiento	Observaciones
Nechi M-1	Tambor 11 (Tajo) Nivel 26 (norte)	158 cm	N10°E/20°W	Altura: 900 msnm En el techo se encontró un contacto transicional entre arenisca muy fina y arcillolita. El piso del manto esta compuesto por una arcillolita.
	Subnivel 26	166 cm	N10°E/20°W	Altura: 900 msnm El techo esta constituido por arcillolita.
Nechi M-2	Tajo 0 Nivel 24 (norte)	137 cm	N25W/15W	Altura 980 msnm El piso al igual que el techo, están constituidos por arcillolitas.
	Nivel 24 tambor 3	144 cm		Altura 975 msnm Espesor real del manto El techo esta constituido por arcillolitas. En algunas partes se ven mantos deformados.
Bloque M-1	Tambor 27, Nivel 10	133 cm		El techo corresponde a una limonita pardo grasosa y el piso a una lutita carbonosa pardo oscuro
	Tambor 47, Nivel 10	118 cm		
Bloque M-2	Cruzada nivel 10	134 cm		El techo esta constituido por una lutita gris oscura y el piso por una lutita negra
Bloque M-3	Tambor 1	120 cm		En el techo se tiene lutita parda grisosa y en el piso una lutita carbonosa café
	Inicio tambor 1, Nivel 10	130 cm		
Pontón M-3	Nivel 8 sur	154 cm	N8°S/16°	En el techo encontramos una lutita carbonosa y en el piso una arenisca fina.
Arenal M-3	Nivel 0 norte	151 cm		En el techo se encuentra limolita muy fina y en el piso una arenisca muy fina, a veces parece una limolita
	Nivel 0 sur Ubicado en una zona de falla	203 cm		En el techo se encuentran limolitas muy finas y en el piso una limolita.

Tabla 3.2. Minas visitadas con sus respectivos mantos muestreados
Mines and coal seams sampled

3.2. PREPARACIÓN

3.2.1. Análisis químicos

La preparación de las muestras se hizo de acuerdo con Blandón et al., (2002), con algunas modificaciones de la siguiente manera:

- Se trituró en un molino de mandíbula a un tamaño aproximado de 0.5 cm (5 mm) la muestra, lo más rápido posible para evitar que se perdiera la humedad superficial.
- Se prosiguió al cuarteo; homogenizando la muestra utilizando una lona de aproximadamente 2x2 metros, para las muestras de los mantos totales (10 – 15 Kg) y una lona pequeña de 0.5x0.5 mts para las muestras de cada uno de los ply.
- Se hizo el cuarteo utilizando un riffle o splitter hasta obtener una muestra de aproximadamente 2 a 3 kilos; para las muestras de los mantos totales y de 0.5 a 1 kg para cada uno de los plies; esto con el fin de sacar de allí las muestras para la humedad superficial, la caracterización química y para las secciones pulidas.

Para la humedad superficial de los mantos totales se utilizaron de 600 a 700 gramos aproximadamente de la muestra que se trituró y cuarteo en los pasos anteriores. Para los ply no se determinó la humedad superficial, pero se siguió el procedimiento igual luego de secar la muestra.

- La muestra seca obtenida para humedad superficial se cuartea y se deja una muestra testigo y la otra aproximadamente 100 grs. se pulverizan en un molino de disco hasta una granulometría de 0.25 mm (pasante malla 60). Luego se tamiza en una malla 60 para asegurar que toda la muestra pase dicha malla, con el fin de que la muestra sea representativa. La muestra resultante se envasa en un frasco debidamente marcado y se lleva al laboratorio para efectuar los respectivos análisis.

3.2.2. Análisis petrográficos en sección pulida

Para la elaboración de las secciones pulidas se extrajeron muestras mediante el cuarteo de 100 – 200 gramos aproximadamente; estas se redujeron a un tamaño aproximado de 0.59 mm (pasante malla No. 30, pero sin tamizar), luego se prosiguió de la siguiente manera para la elaboración de las secciones:

Preparación: Como resina se utilizó eukitt y como disolvente xileno. En un recipiente plástico de 4 cms de ancho y 1.5 cm de alto, al cual se le tapó una cara con cinta de enmascarar, se agregó resina comercial igual a la descrita en Blandón et al., (2002), hasta una altura de aproximadamente 1 cm y se dejó secar durante dos a tres días, luego se mezcló bien una pequeña porción representativa de cada asociación de litotipo del manto de carbón, se le adicionó eukitt y xileno hasta que las partículas estuvieran completamente impregnadas, cuando esto sucede se dan unos golpes suaves para permitir que salgan las burbujas que se generan en la resina y se deja en reposo al menos un día. El proceso de desbaste y pulido se hizo de acuerdo a lo descrito en Blandón et al. (2002). Para las muestras de lutita en lugar de agua se utilizó etanol tanto para preparar los abrasivos como para todo el proceso con el fin de evitar el deterioro de la muestra por hinchamiento de las arcillas.

3.2.3. Estudio de palinofacies

Para la preparación de las muestras para el análisis de palinofacies se hizo mediante el procedimiento implementado por Blandón et al., (2003), explicado brevemente a continuación, pero del cual se describe en detalle en el anexo A1.

Cuando se aplica el método de Schulze, las partículas de carbón no se pueden disgregar totalmente, así este tipo de preparación no permite identificar microscópicamente la mayoría de los componentes de la materia orgánica que conforman el carbón (Fig. 3.2.A). El método de preparación de palinofacies implementado aquí para los carbones (Blandón et al., 2003), permite diferenciar claramente los tejidos y palinomorfos. Además, se puede ver el grado de preservación de los componentes.

El método de preparación de palinofacies implementado aquí consiste de los siguientes tratamientos (Tabla 3.3):

- Paso 1: Aproximadamente 1 cm³ de carbón o 1.5 cm³ de lutita carbonosa molidos a pasante malla 60 se le adicionan 20 ml de la mezcla de Schulze (HNO₃ concentrado mezclado con KClO₃ en una relación de 1: 3) esto permite la depolimerización. (Fig. 3.2.B)
- Paso 2: Hidroxido de sodio con pirofosfato de sodio 0.1 N mezclado en una relación 1:1 lo cual produce la depolimerización del bitumen y de los ácidos húmicos. En el paso 2 la alta fluorescencia de las partículas y el medio de montaje se pueden observar. Esto indica que la solución está extrayendo el bitumen y los ácidos húmicos (Fig. 3.2.C).
- Paso 3: Amoniacó mezclado con agua al 50% se le adiciona a la muestra, lo cual produce la remoción del bitumen y de los ácidos húmicos. En el paso 3 la solución de amoniacó permite lavar el bitumen y los ácidos húmicos producidos en el paso 2 de tal modo que cada uno de los componentes de la materia orgánica se pueda observar claramente con su color de fluorescencia, (Fig. 3.2 D). Aquí todos los componentes de la materia orgánica tal como tejidos vitriniticos, cutículas, esporas, granos de polen, resinas, algas etc., se pueden observar

- Paso 4: Chequeo del residuo al microscopio.
- Paso 5: Filtración bajo vacío a través de un tejido de nylon con una malla de 10 micras elimina las partículas menores que 10 micrones.
- Paso 6: Como la mayoría de los carbones contienen una muy baja proporción de minerales (< 5%), la separación con líquidos pesados solo se llevó a cabo en las lutitas carbonosas.
- Paso 7: Deshidratación con una solución de etanol y agua (proporción 1:1) y finalmente el residuo es mezclado con etanol al 100%.
- Paso 8: Preparación del residuo antes del montaje de la placa. El residuo orgánico deshidratado se mezcla con xileno.
- Paso 9: Montaje de la placa con eukitt, Fig. 3.2 E

STEP	ACTION	RESULT
1	Dry and crush sample	Sample ready for acid treatment
2	Chemical processing: - HNO ₃ + KClO ₃ ; centrifugation - NaOH + Na ₃ P ₂ O ₇ ; centrifugation - NH ₄ OH + H ₂ O; centrifugation	- Disaggregation of sample - Increase in depolymerization of bitumens and humic acids - Dissolution and removal of bitumens and humic acids
3	Microscopic check of residue	Composition of residue
4	Filtration	Elimination of fines < 10μ
5	Heavy liquid separation (if needed)	Elimination of mineral fraction
6	Dehydration	Residue in ethanol
7	Dehydrated residue mixed with xylene	Optimisation of residue for slide mounting
8	Slide mounting in eukitt®	Slide ready for observation

Tabla 3.3. Resumen del método de preparación de palinofacies Schulze modificado (Blandón et al., in press).
Summary of Schulze-modified palynofacies preparation method (Blandón et al., in press).

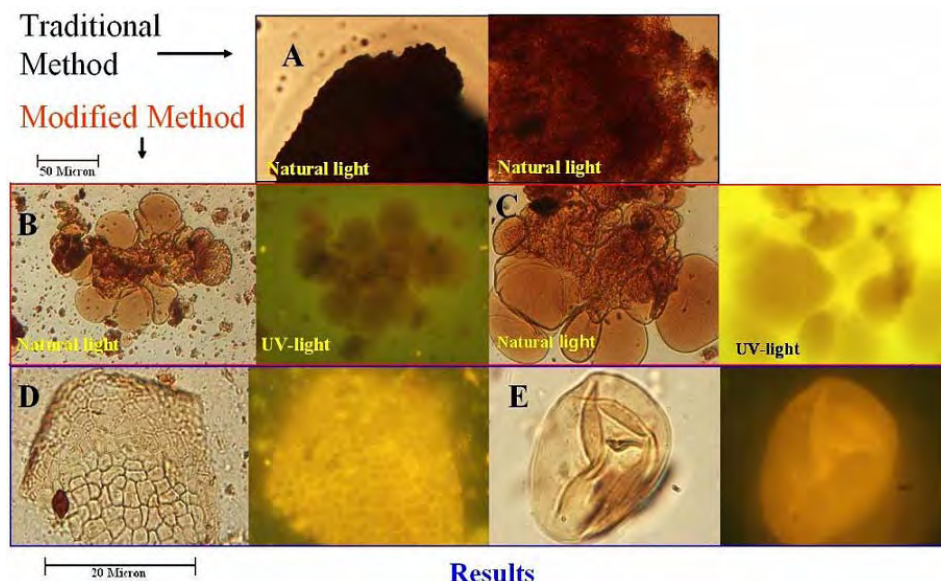


Fig. 3.2. Resultados obtenidos por el método de Schulze modificado para preparación de palinofacies (Blandón et al., in press).
Results obtained by the Schulze-modified palynofacies preparation method (Blandon et al., in press).

3.3. MÉTODOS DE ANÁLISIS

3.3.1. Análisis próximos

Generalidades sobre los análisis efectuados a los carbones. Figura 3.3 representa la composición del carbón y la denominación de sus componentes.

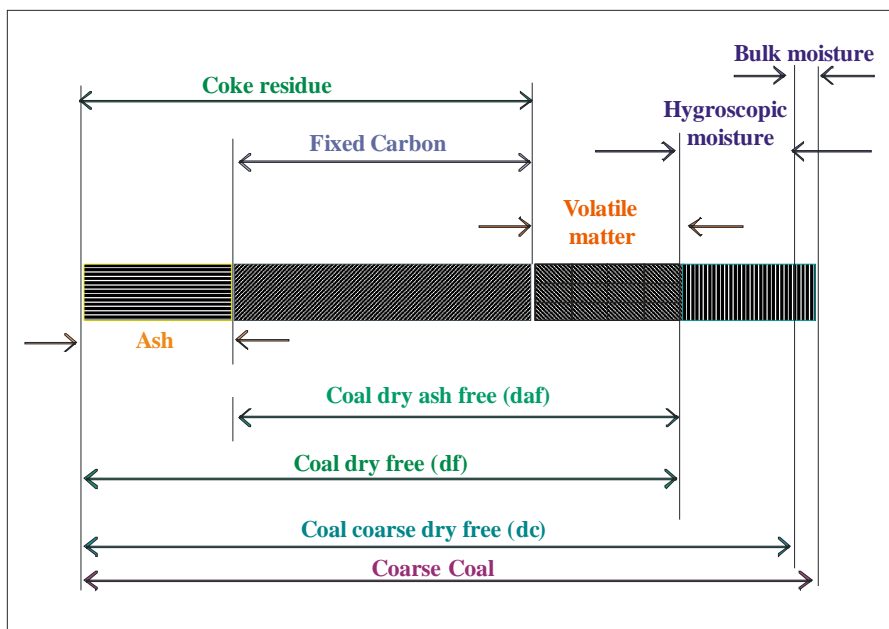


Fig. 3.3. Composición del carbón y denominación de sus componentes (Ramírez, 1992).
Coal composition and name of its components (Ramírez, 1992).

Análisis próximos completos. Equivalen a los análisis próximos cortos más azufre y poder calorífico. En este trabajo no se hicieron los análisis de poder calorífico a cada uno de los plies, debido a que no se consideró necesario para cumplir con los objetivos propuestos; sin embargo, a los mantos totales si se les efectuó dicho análisis.

Humedad superficial + humedad residual (Norma ASTM D3173) humedad total ó humedad comercial. Esta es necesario conocerla en los contratos de compra y venta, en la evaluación y construcción de procesos industriales, manejo y pulverización del carbón. Normalmente se efectúa la humedad residual, ya que esta permite tener una idea del rango del carbón y se utiliza para llevar los resultados a base seca.

Materias Volátiles (norma ASTM 3175 e ISO 562). Están compuestas de H₂O, H₂, CO₂, HS, metano, amoniaco, benceno, tolueno, naftaleno y vapores de alquitranes. Es importante en el diseño y la selección de calderas, de procesos de gasificación y licuefacción y en la clasificación de los carbones de acuerdo a las normas ASTM e ISO. Aparte de lo anterior el contenido de materias volátiles esta relacionado con la cantidad de extracto de bitumen que pueda tener la muestra y con el contenido de hidrógeno.

Cenizas. Son los residuos que quedan después de la combustión del carbón, estas pueden ser:

- **Singenéticas.** Se forman en el pantano de turba a partir de la materia orgánica. Dan una idea del ambiente en el cual se formaron los carbones
- **Epigenéticas.** Se generan después de que el carbón esta formado.
- **Operacionales.** Corresponden a materiales del techo y del piso de las rocas que acompañan a los mantos de carbón y que son arrancados junto con éste durante el proceso de explotación. En este trabajo este tipo de cenizas corresponden a las lutitas del techo y el piso de los mantos de carbón, las cuales se tuvieron en cuenta en algunos mantos.

Azufre. Se presenta en tres formas:

- Pirítico, como (FeS₂), muy denso, puede ser removido parcialmente mediante el lavado del carbón y es combustible.
- Orgánico, no se puede remover de manera económica, es parcialmente combustible
- Sulfático no es combustible, y pasa directamente a las cenizas

El contenido de azufre es importante porque ayuda en la correlación de los carbones y a discernir acerca del ambiente de depositación.

Análisis próximos (humedad, cenizas y material volátil) y análisis elemental (C, H, N), azufre total, se llevaron a cabo de acuerdo a los procedimientos de la American Association for Testing and Materials (ASTM standard, 2000, Tabla 3.4).

NORM	ANALYSIS	EQUIPMENT USED
ASTM D-3173	Moisture	Drying chamber
ISO 1171	Ash	Furnace
ISO 562	Volatile Matter	Furnace
ASTM D-3177	Total sulphur	Sulphur analyzer
ASTM D-2015	Calorific value	Calorimetric Bomb

Tabla 3.4. Normas y equipos utilizados en la realización de los análisis próximos.
Norms and equipment used for proximate analysis.

Los análisis próximos completos se realizaron en el laboratorio de Carbones de la Escuela de Ingeniería de Materiales en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia (sede Medellín).

3.3.2. Análisis elementales

Análisis elemental. Estos análisis son necesarios, para el cálculo de los requerimientos de aire para la combustión del carbón, peso de los productos de combustión y pérdidas de calor en las calderas. En el caso de este estudio sirve para determinar el tipo de kerógeno, el grado de madurez de la materia orgánica y para correlacionar los resultados de pirolisis y petrográficos, para definir la calidad de la materia orgánica. Los requerimientos de aire y pesos de productos de combustión se usan para determinar el tamaño de los ventiladores de las calderas.

Estos análisis consisten en la determinación de los siguientes elementos: Carbono (C), Hidrógeno (H), Nitrógeno (N), Oxígeno (O), Cloro (Cl), y azufre (S). Se llevaron a cabo de acuerdo a los procedimientos de la American Association for Testing and Materials (ASTM standard, 2000), en un equipo CHN - 600 de Leco.

3.3.3. Análisis microscópicos en luz blanca y fluorescente

Petrográfico. Cuantifica macro y microscópicamente los constituyentes del carbón para determinar su composición rango y utilización. Este análisis cada vez toma mayor importancia, ya que establece con mayor precisión el comportamiento del carbón en sus diferentes usos, además permite evidenciar el posible potencial de generación de hidrocarburos de los carbones.

Se hicieron análisis microscopico en luz reflejada blanca y fluorescente con un microscopio Leitz MPV-COMBI, equipado con un fotómetro y una camera CCD Pixera Pro 150ES. El conteo de puntos para el análisis maceral se hizo de acuerdo a procedimientos estandares (Taylor et al., 1998 y el International Committee for Coal Petrology (1971, 1998). Para este análisis se utiliza un microscopio Laborlux 11 Pol de la Leitz con ocular de 10X y objetivo de 32X en aceite de inmersión.

El conteo de puntos se realizó de acuerdo a lo descrito en Blandón et al., (2002).

Petrográfico en luz fluorescente (secciones pulidas)

Con el fin de tratar de homogenizar el conteo de macerales liptiníticos en fluorescencia, se utilizó una cámara digital marca Pixera 150 ES adaptada a un microscopio MPV-COMBI de la Leitz y filtros (rojo, verde y azul) y objetivos especiales para fluorescencia de 20, 50 y 100X. Las condiciones de toma de las imágenes estandarizadas para el objetivo de 20x son las siguientes:

- Tamaño pequeño: 640 x 480
- Modo Manual
- Sensibilidad 400
- Diafragma de fluorescencia ajustado al campo de observación
- Tiempo de exposición depende si la intensidad de fluorescencia de las partículas a tomar es alta o baja. Así por ejemplo se trató de estandarizar el tiempo de exposición de 2 segundos para las partículas muy fluorescentes y de 8 segundos para las de poca fluorescencia

Bajo éstas condiciones se obtienen imágenes de los macerales liptiníticos en 2 segundos muy similares a las observadas en el microscopio y un realce mayor en 8 seg., en donde se pueden apreciar todos los macerales liptiníticos que no se alcanzaban a distinguir en 2 segundos (Fig. 3.4. O sea que anteriormente no era posible ver con mucha claridad la composición petrográfica del carbón porque no se tenían cámaras con la suficiente sensibilidad para observar los macerales de fluorescencia débil.

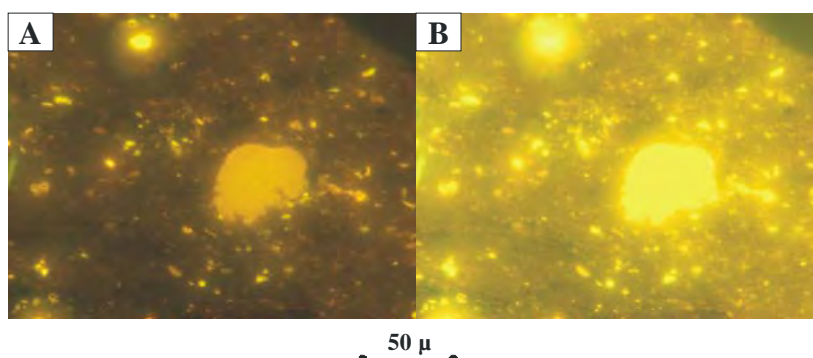


Fig. 3.4. Luz fluorescente reflejada. (A): 2 segundos y (B): 8 segundos
Reflected fluorescent light. (A): 2 seconds and (B): 8 seconds

Palinofacies. Se estudiaron bajo luz blanca transmitida y reflejada fluorescente los residuos de palinofacies, obtenidos a través del método de Schulze-modificado (Blandón et al., 2003), además se hizo el conteo semicuantitativo del área de cada uno de los componentes de la imagen.

Procedimientos de observación en luz blanca para las placas de palinofacies en luz transmitida.

- Lámpara de observación en 8 voltios
- Diafragma de condensador casi cerrado
- Filtro azul en el lado de la lámpara de observación
- Tamaño pequeño: 640 x 480
- Modo Manual
- Sensibilidad 400

Tiempo de exposición depende del objetivo. Así por ejemplo para el objetivo de 20X el tiempo es de 1/50 seg y para el objetivo de 50X el tiempo es de 1/10 seg. Cuarto oscuro (luces del laboratorio apagadas).

Con respecto al análisis digital de las imágenes en luz blanca, se siguió el procedimiento de calibración implementado en Blandón et al., (2002).

Procedimientos de observación en luz fluorescente para las placas de palinofacies

Para la captura de las imágenes en luz fluorescente se estandarizaron las siguientes condiciones:

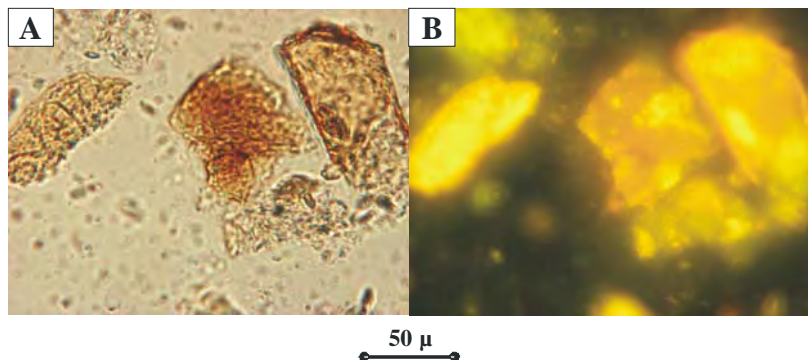


Fig. 3.5. Luz blanca transmitida (A) y luz fluorescente reflejada (B), 50X. (A) 1/10 seg., (B) 2seg.
Transmitted white light (A) and fluorescent reflected light (B), 50X. (A) 1/10 sec., (B) 2 sec.

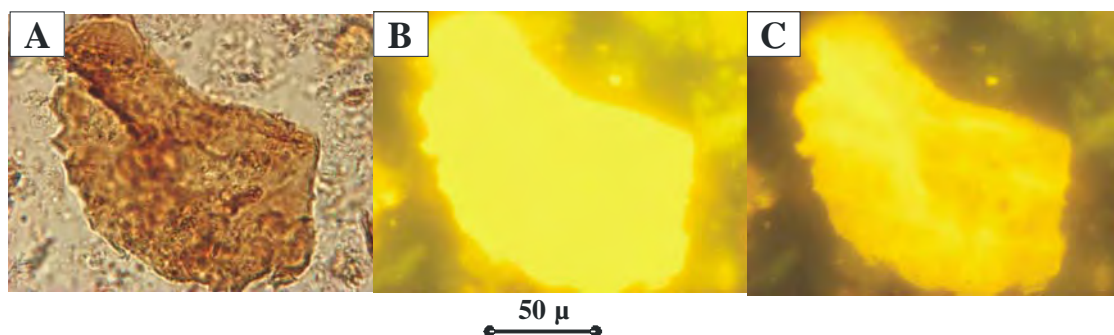


Fig. 3.6. Luz blanca transmitida (A) y luz fluorescente reflejada (B), 50X. (A) 1/10 seg., (B) 2 seg., (C) 1 seg.
Transmitted white light (A) and fluorescent reflected light (B), 50X. (A) 1/10 sec., (B) 2 sec., (C) 1 sec.

Para este análisis se utiliza un microscopio Leitz MPV Combi con ocular de 10x y objetivo de 20x flotar con una lámpara de mercurio de alta presión de 100 wattios que se utiliza para excitar la muestra y el filtro azul para obtener la fluorescencia de color amarillo verdoso típica de la materia orgánica de los carbones de bajo rango.

- Tamaño pequeño: 640 x 480
- Modo Manual
- Sensibilidad 400
- Diafragma de fluorescencia ajustado al campo de observación
- Tiempo de exposición depende del objetivo y si la intensidad de fluorescencia de las partículas a tomar es alta o baja. Así por ejemplo para el objetivo de 20x el tiempo es de 3 seg o ½ de seg. Y para el objetivo de 50x el tiempo es de 2 seg. 1 seg o ½ seg. Dependiendo de la intensidad de fluorescencia, de tal modo que a mayor intensidad, menor tiempo de exposición.
- Cuarto oscuro (luces del laboratorio apagadas)

Para evitar el efecto fading, las imágenes se deben tomar en el menor tiempo posible

Para enfocar la muestra primero se coloca en luz blanca normal y luego se pasa a la luz fluorescente, pero con frecuencia esto no es suficiente entonces es necesario enfocar en tiempos bajos.

Tipos de materia orgánica utilizada en la descripción de la petrografía y las palinofacies, ver imágenes patrón para los diferentes tipos de materia orgánica presentes en los carbones y en las lutitas carbonosas asociadas a éstos, en el anexo A2.

3.3.4. Análisis de pirolisis Rock-Eval

Pirolisis. Es un método rápido para la evaluación del tipo de kerógeno, madurez termal y potencial de generación de petróleo en una roca fuente (Fig. 3.7).

El instrumento pirolizador Rock-Eval VI produce cuatro picos en forma de pirograma designados como S₁, S₂, S₃ y S₄ (Fig., 3.7):

- S₁. Representa todo el hidrocarburo diagenético y catagenético presente en la roca antes de ser llevada al laboratorio. Este es un indicador de la cantidad de hidrocarburos que han ocurrido.
- S₂. Representa la capacidad generativa de hidrocarburos que permanece en la roca al tiempo del muestreo. Esta fracción está relacionada al contenido de hidrógeno.
- S₃. La cantidad de dióxido de carbono CO₂ formado del quebramiento térmico del kerógeno.
- S₄. Carbón orgánico total en porcentaje en peso

La temperatura de calentamiento (T_{máx}) en °C, a la cual el tope del pico S₂ ocurre es referida el grado de madurez termal de la muestra.

S₁, S₂ y S₃ se pueden expresar en ppm (partes por millón), ppt (partes por tonelada), kilogramo por tonelada de roca y miligramo por gramo.

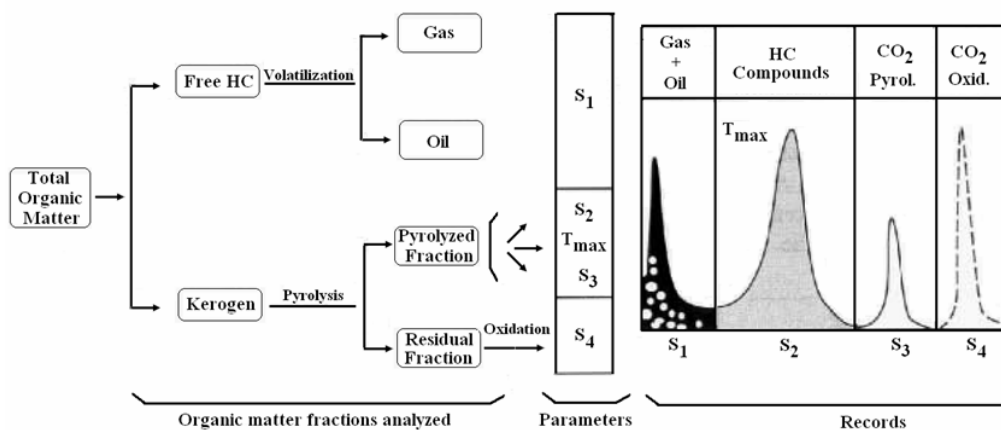


Fig. 3.7. Diagrama general mostrando las diferentes fracciones de la materia orgánica total de las rocas analizadas, los parámetros correspondientes y su registro, (Lafargue et al., 1998).
General diagram showing the different fractions of the total organic matter in rocks analyzed, the corresponding parameters and their recording, (Lafargue et al., 1998).

La composición global del kerógeno se puede comparar con la de los macerales del carbón usando el diagrama elaborado por Van Krevelen (1961), quién lo propuso para caracterizar los carbones y sus vías de carbonificación (Fig. 3.8). La clasificación del kerógeno de acuerdo al diagrama de Van Krevelen es aún el método más adecuado para caracterizar la naturaleza y potencial petrolero de la materia orgánica, además sirve de guía para la interpretación de otros métodos físicos, químicos y ópticos. Una versión moderna de esta clasificación se obtiene al graficar el índice de hidrogeno Vs el índice de oxígeno obtenidos de los resultados de la pirolisis rock-eval.

Kerógeno Tipo I. Con una relación inicial H/C alta porque no contienen lignina o celulosa (1.5 ó más) y una relación O/C baja (generalmente más pequeña que 0.1), comprende mucho material lípido, particularmente cadenas alifáticas. El contenido de núcleos poliaromáticos y enlaces heteroaromáticos es bajo, comparado con los otros tipos de materia orgánica. La pequeña cantidad de oxígeno presente se halla principalmente en enlaces ester. Cuando se somete a pirolisis de 550 a 600°C, el kerógeno produce un mayor contenido de materia volátil y/o compuestos extractables que cualquier otro tipo de kerógeno y por ende una mayor producción de aceite. La alta proporción de lípidos puede provenir de una acumulación selectiva de material de algas o de una biodegradación severa de la materia orgánica durante la depositación. La primera fuente

incluye sedimentos ricos en materia orgánica (principalmente algas), particularmente las derivadas de *Botryococcus lacustrinus* y formas asociadas; la segunda fuente incluye materia orgánica diseminada, la cual ha sido ampliamente retrabajada por microorganismos. Así el kerógeno se deriva principalmente de una biomasa retrabajada y otros lípidos microbiales. Esta situación parece ocurrir particularmente en ambientes lacustrinos. Su ocurrencia es relativamente rara, comparada con los otros tipos.

Kerógeno Tipo II. Con una relación H/C relativamente alta y O/C baja, los núcleos poliaromáticos, las cetonas heteroatómicas y los grupos ácidos carboxilos son más importantes que en el Tipo I, pero menos que en el III. Los enlaces ester son abundantes, los materiales saturados comprenden abundantes cadenas alifáticas y anillos nafténicos de longitud moderada. El sulfuro está presente en cantidades importantes localizadas en heterociclos y probablemente también como enlaces de sulfuros. El kerógeno de Tipo II se encuentra usualmente relacionado a sedimentos marinos, donde la materia orgánica autóctona se derivó de una mezcla de fitoplancton, zooplancton y microorganismos (bacterias) depositados en un ambiente reductor.

El producto de pirólisis de este tipo de kerógeno es más bajo que el del Tipo I. Es frecuente en muchas rocas fuentes de petróleo y lutitas aceitosas (Waples, 1982), incluye en este tipo de kerógeno, componentes lípidos (grasas y ceras) de la cubierta exterior de granos, (polen, esporas) y hojas.

Kerógeno Tipo III. Baja relación inicial H/C (usualmente menor que 1) y alta relación O/C (tan alta como 0.2 y 0.3). Este tipo de kerógeno comprende una importante proporción de núcleos poliaromáticos, cetonas heteroatómicas y grupos ácidos carboxílicos, pero no hay grupos ester (Robin, 1975). Oxígeno no carbonil es posiblemente incluido en enlaces eter. Los grupos alifáticos son constituyentes menores de la materia orgánica. Ellos consisten de unas pocas cadenas largas originadas de ceras de plantas superiores, grupos metil y otras cadenas cortas. Este tipo de kerógeno es menos favorable para generación de aceite que los tipos I ó II. Aunque este puede proporcionar rocas fuentes para gas si son enterrados a suficiente profundidad. Es también menos productivo sobre pirólisis y no incluye lutitas aceitosas. Se deriva esencialmente de plantas continentales y contiene muchos detritos vegetales identificables.

Un cuarto tipo básico de kerógeno es materia orgánica residual, el cual está caracterizado por una relación atómica O/C anormalmente alta (0.25 ó más) asociada con una baja relación H/C (0.5 o 0.6). Este material algunas veces llamado Kerógeno Tipo IV puede ser reciclado de sedimentos más viejos por erosión o profundamente alterado por meteorización sub-aérea, combustión u oxidación biológica en pantanos y suelos antes de la redepositación.

El Kerógeno Tipo IV es una forma de carbón muerto y no tiene potencial para generación de HC. Otra forma de carbón muerto, es material que ha perdido su H a través de procesos de maduración termal. En tales casos, ambas relaciones atómicas H/C y O/C son muy bajas.

La Tabla 3.5 es una guía para interpretar los resultados de los análisis de Rock-Eval.

Los índices de H y O obtenidos del pirolizador Rock-Eval son análogos a las relaciones atómicas H/C y O/C obtenidas de los análisis elementales:

$$\text{El índice de H} = \frac{S_2 \text{ (ppm)} \times 10}{\% \text{ COT}} \quad \text{ó} \quad \frac{S_2 \text{ (mg/gr)} \times 100}{\% \text{ COT}}$$

$$\text{El índice de O} = \frac{S_3 \text{ (ppm)} \times 10}{\% \text{ COT}} \quad \text{ó} \quad \frac{S_3 \text{ (mg/gr)} \times 100}{\% \text{ COT}}$$

Los valores dados por estos índices son usados para distinguir los tipos de kerógeno (I, II, III y IV); sin embargo el índice de carbono reactivo es preferible porque no incorpora valores para S_3 los cuales pueden ser erróneos especialmente en lutitas calcáreas.

$\frac{S_1 + S_2 * 100}{\% \text{TOC}}$ Tipo de kerógeno cuando es combinado con parámetros de madurez.

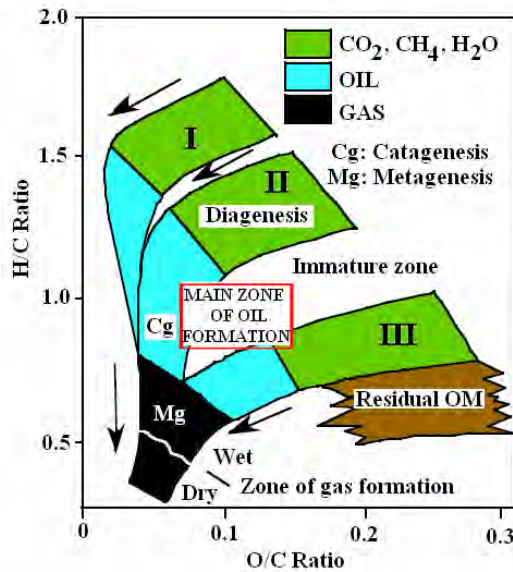


Fig. 3.8. Vías de evolución de los grupos de macerales en los carbones (después de Van Krevelen 1961, tomado de Tissot 1984).

Evolution of macerals groups in coals (after Van Krevelen 1961, in Tissot 1984.)

Relación H/C y O/C de los tipos de Kerógeno I-IV. Las flechas muestran las vías de evolución al incrementar la madurez. O: representa la formación de productos oxigenados (CO₂, H₂O, moléculas heteroatómicas pesadas); P: formación de petróleo; G: formación de gas. Después de Bostick (1979).
Ratio H/C and O/C of types of Kerogen I – IV. The arrows show the routes of evolution with increasing maturity. O = Formation of oxygenated products (CO₂, H₂O, heavy heteroatomic molecules); P = Formation of oil; G: Formation of gas. After Bostick (1979).

Evaluation	Parameter	Value	Classification
Hydrocarbon potential	S1+S2 (ppm)	< 2000 2000 – 6000 > 6000	Poor Regular Good
Hydrocarbon potential type of kerogen	$\frac{(S1+S2) \times 10^{-2}}{\text{TOC}}$	Depend of thermal maturation	Depend of thermal maturation
Type of kerogen	S2/S3	< 5.0 5.0 – 10.0 > 10	Produce gas Ancertain mixed Produce oil
Thermal maturation	T máx	< 430 °C 430 – 465 °C > 465°C	Inmature Mature Overmature
Productivity index	S1/S1+S2	< 0.28 > 0.28	Prone rock Oil migrated
Hydrocarbons produced	S1	0–0.5 mg Hc/g of rock 0.5 – 1.0 1.0 – 2.0 2.0 – 6.0 > 6.0	Poor Regular Good Very good Excelent
Hydrocarbon by to produce	S2	< 2.0 mg Hc/g of rock 3.0 – 5.0 > 5.0	Poor Regular Good
Quantity of organic matter	TOC	0 – 0.5 0.5 – 1.0 1.0 – 2.0 2.0 - 4.0 > 4.0	Poor Regular Good Very good Excelent

Tabla 3.5. Guía para la interpretación de los análisis de pirólisis Rock-Eval.
Guide for the interpretation of Rock –Eval pyrolysis data.

Limitaciones de los análisis de Rock - Eval.

- No hay distinción entre productos líquidos y gaseosos.
- Se pueden aplicar solamente cuando el kerógeno, a pesar de estar polimerizado, es inmaduro.
- El índice de hidrógeno es menospreciado cuando aumenta la madurez. Así, bajas estimaciones del "total de hidrocarburos" se deberían obtener por pirolisis de rocas maduras a menos que se hiciera corrección por madurez. Para evitar esto es necesario trabajar con muestras inmaduras o hacer una corrección por madurez similar a la obtenida empleando la relación H/C.

La pirolisis Rock-Eval se hizo con una maquina Rock-Eval 6 en la Universidad de Orleans (Francia) de cada uno de los plies de los ocho mantos y de las muestras representativas de cada uno de los mantos totales.

3.3.5. Análisis geoquímicos

Análisis del bitumen. El grupo de HC en sedimentos de grano fino que se pueden usar para caracterizar el potencial de generación, se extiende de C₁ a C₄₀. El análisis de C₁₅₊ fue la primera técnica usada para caracterizar la roca fuente y es aún útil para evaluar la calidad, tipo y grado de madurez. Esta fracción contiene aproximadamente todos los HC biogénicos, los cuales son sensitivos a los cambios de maduración con incremento en la temperatura.

Los análisis de C₁₅₊ involucran la molienda a grano fino de la roca a un tamaño de partícula específica y extracción con solventes. Después de la extracción, los solventes son removidos por evaporación usualmente a 40° C, el residuo remanente es referido como "BITUMEN". Este contiene los hidrocarburos más los compuestos nitrógeno, asfálticos, sulfuro y oxígeno. El rango de HC puede empezar tan bajo como C₁₁ ó C₁₂, dependiendo del método de remoción de solventes. La mayoría de los datos reportados indican que las recuperaciones más completas empiezan alrededor de C₁₅₊. El bitumen se separa por cromatografía líquida (Fig. 3.9) en saturados (parafinas + naftenos), aromáticos, compuestos NSO y asfaltenos.

Los análisis de C₁₅₊ se pueden efectuar en muestras de núcleos, ripios o afloramientos no meteorizados de rocas de grano fino:

Extracto orgánico C₁₅₊ = Total de materia orgánica extractable

C₁₅₊ es el total de los HC más los no HC, NSO'S y Asfaltenos presentes en una roca en partes por millón.

$$\text{Extract (ppm)} = \frac{\text{Peso del material extractable} \times 10}{\text{Peso de la roca antes de la extracción}}$$

El contenido de HC extractables permite definir la calidad de la roca fuente (Tablas 3.6, 3.7 and 3.8).

Se obtuvieron extractos de bitumen de 8 muestras de mantos totales y de algunos plies, utilizando extracción soxhlet con una mezcla benceno-metanol en una relación vol/vol de 60-40% durante 240 - 250 horas, de acuerdo a Bonilla (1986).

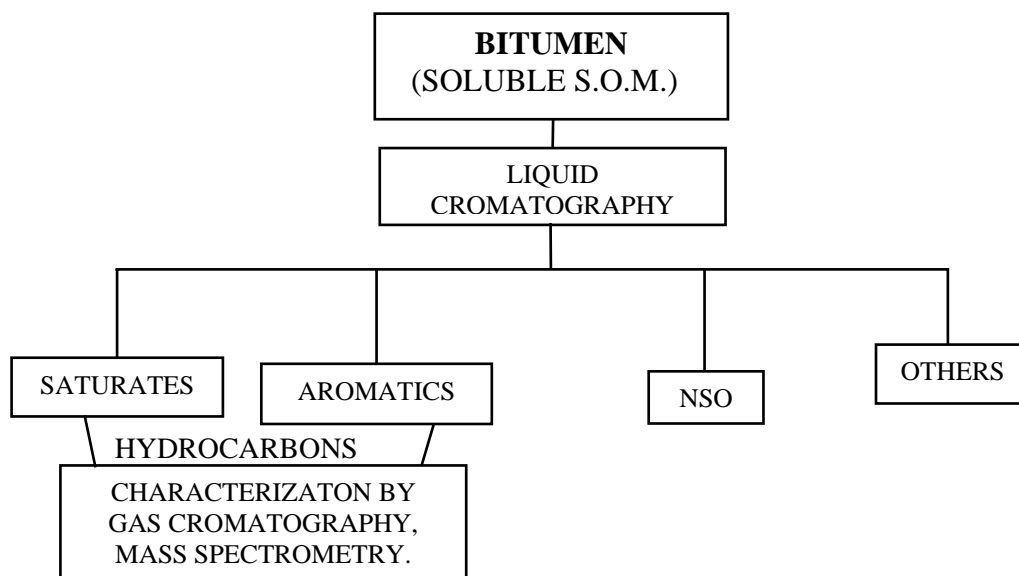


Fig. 3.9. Análisis del bitumen
Bitumen analysis

Hunt y Meinnert 1954	Philippi 1957	Baker 1972	Content of HC
	Excellent		> 5.000
	Very good	Few common	1.500-5.000
		Much better	
Good	Good		500-1.500
	Regular	Common,	150-500
Regular	Poor	Adequate	50-150
Poor	Very poor	Inadequate	0-50

Tabla 3.6. Calidad de la roca fuente definida por el contenido de HC extractables según varios autores.
Source rock quality defined after the extractable HC content (after various authors).

C ₁₅₊ in ppm/% TOC	Classification
< 50	Steril
50 – 100	Poor
100 – 250	Regular
250 – 500	Good
500 – 1000	Very good
1000 – 1500	Excellent

Tabla 3.7. Cantidad de extracto de bitumen según Leenher et al. (1986).
Amount of bitumens extracted (after Leenher et al., 1986).

HC content in ppm	Classification
> 5000	Excellent
1500 – 5000	Very good
500 – 1500	Good
150 – 500	Regular
50 – 150	Poor
< 50	Very poor

Tabla 3.8. Calidad de la roca fuente con base en el contenido de hidrocarburos en ppm (Hunt, 1979).
Source rock quality based on the HC content in ppm (Hunt, 1979).

A. Extracción de bitumen en carbones y lutitas carbonosas

Se pesaron entre 20 y 52 gramos de muestra a un tamaño de grano menor de 0.2 mm y se colocaron a 105°C durante 90 minutos con el fin de quitarles la humedad. Una vez seca la muestra se empacaron en cartuchos de extracción watman de 40 x 112 mm previamente extraídos durante al menos diez minutos con una mezcla benceno-metanol en una relación 60/40 vol/vol.

Para la extracción se utilizó un equipo soxhlet de 250 ml, en cuyo balón se colocaron aproximadamente 200 ml de la mezcla benceno-metanol antes descrita (Fig. 3.10).

El tiempo de extracción varió entre 240 y 250 horas y se hizo en planchas de calentamiento con agitación magnética, la temperatura a la cual evapora el solvente es de aproximadamente 200°C y la agitación se colocó en 4. Una vez se terminó la extracción (cuando la solución del recipiente de extracción se torna de color amarillo muy claro), el solvente se separa del bitumen por destilación a una temperatura de aproximadamente 60°C en un trampa de destilación. Luego se evapora el exceso de solvente por calentamiento y posteriormente se pesa hasta obtener peso constante



Fig. 3.10. Extracción de bitumen de muestras de carbón y lutita carbonosa de la Formación Amagá.
Bitumen extraction from coal and coaly shale samples of Amagá Formation.

Posteriormente los extractos se separaron en hidrocarburos saturados y aromaticos, resinas y asfaltenos por cromatografía líquida usando n-hexano, benceno, metanol y cloroformo, por elusión de acuerdo a Bonilla (1988).

B. Cromatografía líquida

Para la cromatografía líquida se utilizó una columna de vidrio de 36 cm de longitud y 16 mm de diámetro externo provista de una llave de teflón en su parte inferior y un recipiente de vidrio soldado para el solvente en la parte superior con un volumen de 250. La columna fue empacada en su mitad inferior con alúmina activada (400°C durante 3 horas) en polvo baker por el método del slurry, utilizando como solvente n-hexano normal.

Para cada columna se requieren aproximadamente 28 grs de alumina. La mitad superior fue empacada inmediatamente después del paso anterior con silica gel Baker malla 60-200 activada (400°C durante 6 horas). Para cada columna se necesitaron aproximadamente 20 grs del slurry, utilizando de igual manera n-hexano. Luego se pesaron aproximadamente 200 mg de extracto de bitumen de cada muestra para realizar el análisis cromatográfico. Se agregó aproximadamente 2 a 4 ml de una mezcla benceno-metanol 1 a 1 para disolver el bitumen y agregarlo gota a gota en la parte superior de la columna previamente empacada. El solvente que se agregó con la muestra se evaporó haciendo pasar un pequeño flujo de nitrógeno. Inmediatamente se seca el bitumen en la parte superior se adiciona 162.6 ml de n – Hexano normal para análisis, esto con el fin de eludir los hidrocarburos saturados (estos son de color blanco), la gota de solvente se debe controlar, de tal manera que todo el solvente se demora en salir aproximadamente 6.5 horas. Luego antes de que se termine el n - Hexano se agregan 175 ml de benceno para eludir los hidrocarburos aromáticos (los cuales son de color amarillo claro). Después de que salgan los hidrocarburos aromáticos se

adicionan 175 ml de una mezcla benceno – metanol 1/1 para extraer las resinas, las cuales son de color pardo rojizo (Fig. 3.11)



Fig. 3.11. Cromatografía líquida de extractos de bitumen de muestras de carbones y lutitas carbonosas.
Liquid chromatography of bitumen extracts of coal and coaly shale samples.

Como las muestras en general son inmaduras, los contenidos de asfaltenos son muy altos, éstos quedan pegados a la sílica y la alúmina y son de color pardo oscuro a negro y aunque se adicionó cloroformo no fue posible separar totalmente los asfaltenos.

3.3.6. Asociación de liptinitas principales y secundarias (método ALPS)

Este consiste en la evaluación de la fracción volumétrica de liptinitas principales y secundarias, las cuales se obtienen a través del análisis de imagen semi-automático. Esto facilita el análisis de los mantos de carbón y ayuda a diferenciarlos de otros mantos (Blandón & Restrepo, 2002). En este caso, el mismo método se aplicó, no con resultados de análisis de imagen sino con resultados de petrografía y palinofacies manual. El término “liptinitas principales” significa los tres o cuatro macerales liptiniticos que tienen el mayor porcentaje en la muestra y normalmente representan más del 60% de las liptinitas en la muestra cuando los porcentajes de liptinitas son normalizados al 100%. “Liptinitas secundarias” significa los tres o cuatro macerales liptiniticos que tienen el menor porcentaje en la muestra y normalmente representan menos del 40% de las liptinitas en la muestra.

3.3.7. Microscopia electrónica

Se efectuó en un equipo JEOL 6400GSM (Departamento de Geología y Paleontología, Universidad de Ginebra) a muestras de palinofacies preparadas con el método de Shulze modificado, con el fin de identificar algunos de los componentes de la materia orgánica; en el anexo A3, se muestran las partículas identificadas.

3.3.8. Difracción de rayos X

De acuerdo a Valkengurg et al., (1997), la influencia del clima sobre la mineralogía de las arcillas ha sido estudiada por muchos autores (Millot, 1970; Weaver, 1989; Robert and Kennett, 1994). La illita/smectita y caolinita, se tienden a formar en suelos como resultado de la meteorización química en áreas tropicales y sub-tropicales con abundante precipitación. En contraste, la illita (y los minerales relacionados, tales como clorita), típicamente se forman en suelos con poca meteorización química en climas fríos y o secos, y áreas de alto relieve donde la erosión mecánica es predominante. Esto sugiere que los cambios climáticos en una región dada serán reflejados por cambios en la mineralogía de las arcillas en los suelos de esa región, y que la erosión de esos suelos y su posterior depositación como sedimentos en áreas oceánicas adyacentes preservarán un registro de los cambios climáticos en la secuencia estratigráfica.

Para estos mismos autores, las proporciones relativas de illita/smectita, illita y caolinita depositados offshore son también influenciados por las distancias desde la costa. Snowdon and Forsthoff (1976), observaron que en el delta del Rio en Lowsian/Mississippi, el mineral caolinita se deposita primero en mayores proporciones donde el agua fresca empieza a mezclarse con el agua salina del golfo de Mexico. Sin embargo, después de esto la proporción relativa de caolinita depositada decrece ostensiblemente hacia el mar, mientras la illita/smectita tiende a incrementar, Porham, 1996.

Snowdon y Forsthoff, (1976) creen que este efecto se debe a la más rápida floculación en el agua salada de la caolinita comparado con la illita/smectita. La tendencia de la caolinita a ser depositada más cerca de la costa que la illita/smectita, también se puede relacionar al mayor tamaño de partícula original de la caolinita.

Se efectuó a las lutitas y limolitas del techo, la base y algunas intercalaciones de los mantos de carbón, con el fin de determinar el posible origen de los minerales arcillosos aquí presentes y para conocer la importancia o no de ellos para correlación de los mantos. Dichos análisis se efectuaron en un equipo XDS 2000 Scintag Diffractometer en el Instituto de Geología de la Universidad de Neuchâtel (Suiza).

3.3.9. Análisis de imagen

Antes del análisis de imagen se necesita hacer la adquisición, el procesamiento y la segmentación. Las imágenes luego se miden y analizan. Para estandarizar la captura de las imágenes, es necesario establecer condiciones apropiadas para el microscopio y la cámara CCD. Esas condiciones dependen de los recursos del laboratorio y de las características técnicas de la cámara CCD. El equipo usado consistió de una cámara Pixera 150 ES y un microscopio petrográfico ortophlan MPV COMBI de marca Leitz con una lámpara de mercurio HBO de alta presión para fluorescencia.

La metodología llevada a cabo para el procesamiento de las imágenes se desarrolló en dos etapas: La primera etapa se realiza en imágenes de secciones pulidas observadas en fluorescencia. Esta cuenta con tres pasos: el paso A (Fig. 3.12) se apoya en el trabajo de Restrepo et al. (2002). Para realizar la segmentación, sin embargo, se encontró que algunas liptinitas de colores naranjados no se identificaban bien, para lo cual se diseñó un paso B (Fig. 3.13) en donde se segmenta específicamente este color definiendo unos umbrales para cada canal de color y luego de esto, el experto utilizando el conteo manual de puntos identifica las liptinitas. Por último, el paso C (Fig. 3.14) consiste en presentar los resultados; para esto, las imágenes que contienen los puntos clasificados se combinaron con las imágenes segmentadas y las imágenes a color de donde se midió el color de fluorescencia de la muestra tanto de manera total como específica por tipos de liptinitas y además, se presenta la fracción volumétrica obtenida para cada maceral.

La etapa 2 (Fig. 3.15) consistió en analizar la fluorescencia de cada uno de los plies en el manto 1 Nechi, pero para este proceso sólo se utilizó un tiempo de exposición. En esta imagen a color, se

aplicó una segmentación OTSU (Escalera, 2001), con la cual se midió la fracción volumétrica y los colores promedio de fluorescencia para cada nivel analizado.

En la etapa 3 (Fig. 3.16) se analizaron muestras de palinofacies observadas en fluorescencia y en las imágenes capturadas se realizó una segmentación OTSU (Escalera, 2001), con la cual se midió la fracción volumétrica y el color promedio de fluorescencia medido sobre la imagen a color.

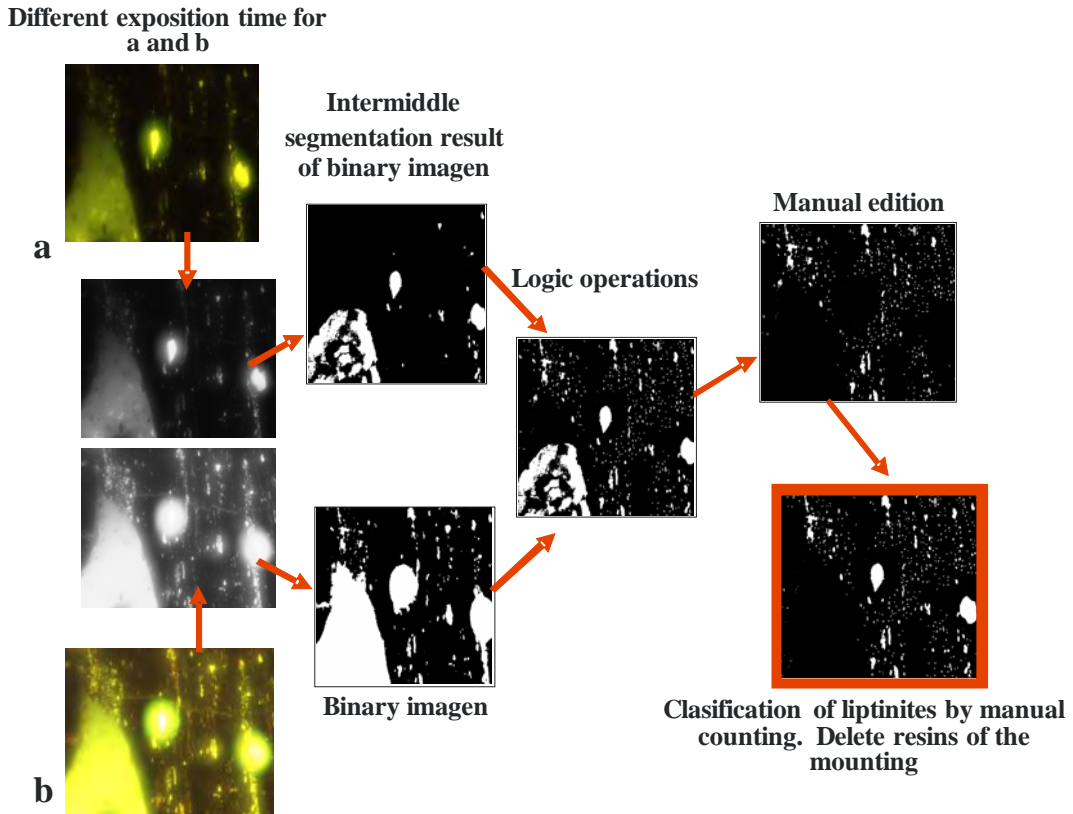


Fig. 3.12. Paso A de la etapa 1 de análisis de imagen.
Step A of stage 1 in image analysis.

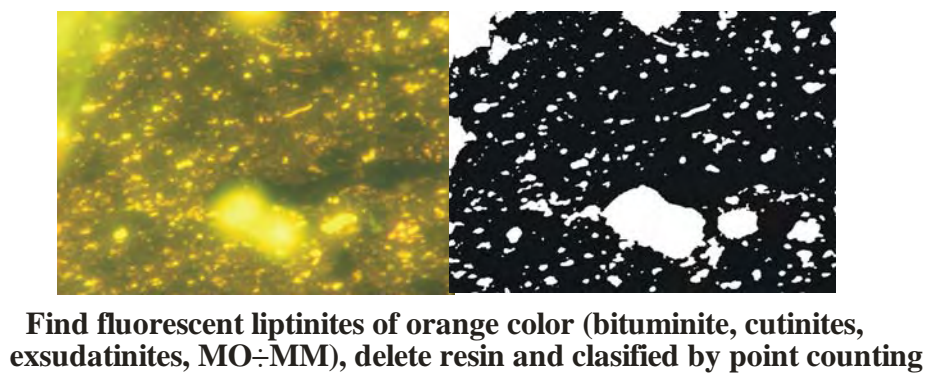


Fig. 3.13. Paso B del etapa 1 de análisis de imagen.
Step B of stage 1 in image analysis.

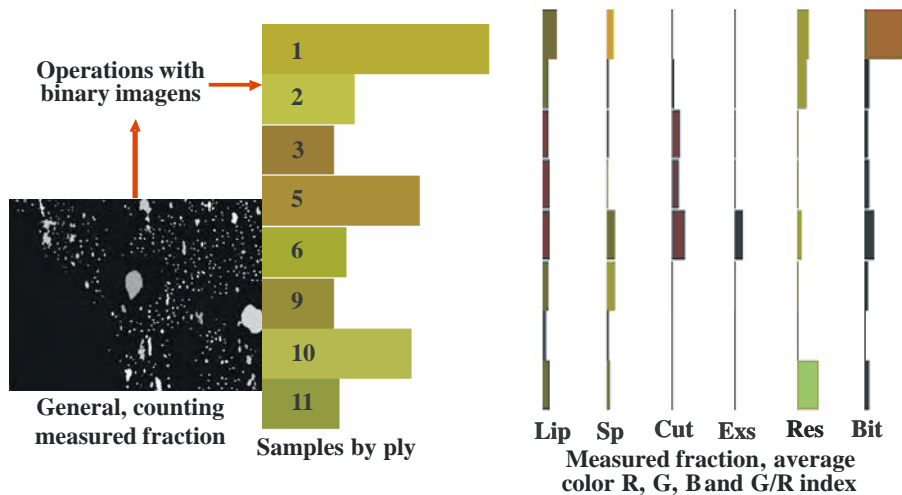


Fig. 3.14. Paso C: Resultados de la etapa 1 (figuras anteriores)
Step C: results of stage 1 (see previous figures)

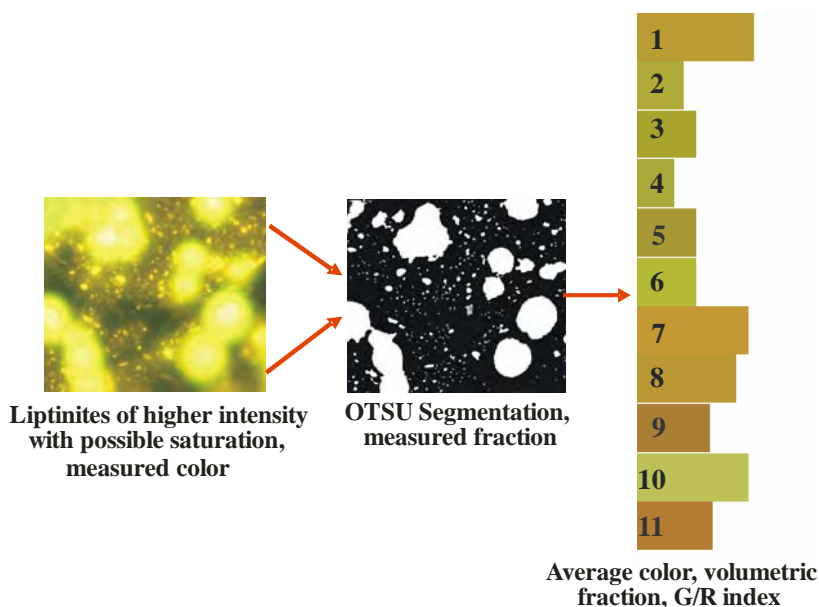


Fig 3.15. Etapa 2 del procesamiento digital de imágenes.
Stage 2 of digital image processing.

Observaciones: Las condiciones que se usaron fueron las siguientes: un tiempo de exposición de 8 segundos, una sensibilidad de ISO 400, luz de excitación azul y el formato de imagen utilizado fue JPG.

1* En el análisis de los objetos en las imágenes, es esencial poder distinguir entre los objetos de interés y el resto. A este último grupo se le denomina background. Las técnicas que se usan para hallar los objetos de interés, usualmente se denominan técnicas de segmentación (segmentando el foreground del background). Las técnicas de segmentación más comunes son el thresholding y el edge finding. Es importante entender que no existe una técnica de segmentación que sirva para todas las imágenes y que la técnica de segmentación no es perfecta.

En este caso se distinguen las imágenes a color de la materia orgánica (foreground) de la resina (background) y se convierten en imágenes en blanco y negro.

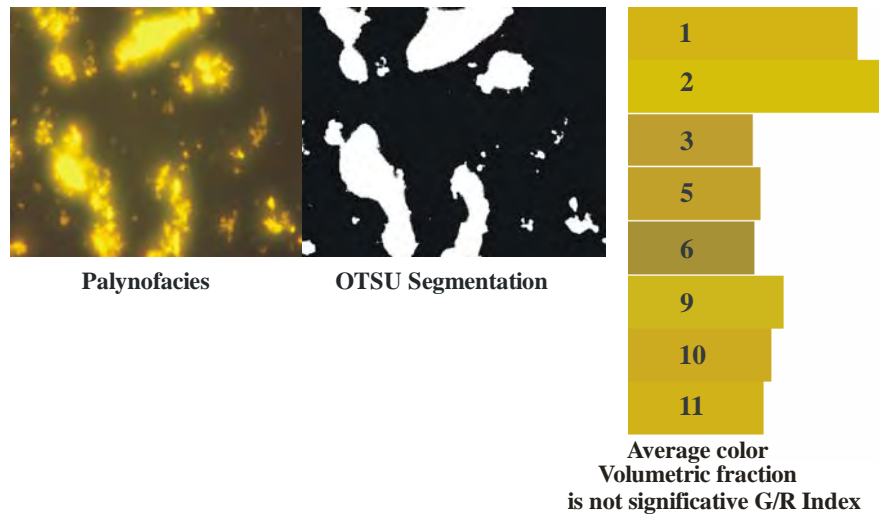


Fig. 3.16. Etapa 3 del tratamiento digital de imágenes
Stage 3 of digital image processing

Medida de la fluorescencia total

Las imágenes a color tienen tres canales, rojo, verde y azul. Se hizo una ecualización con el objetivo de incrementar el contraste. Luego la imagen a color se convierte a niveles de gris, de acuerdo a las características del objeto, altos niveles pertenecen a partículas fluorescentes, y bajos niveles corresponden al background, el cual se observa en el histograma y por esta razón es posible aplicar un algoritmo OTSU porque permite hacer una separación bimodal. Las partículas que tienen altos niveles de fluorescencia son blancas en este caso y la imagen binaria se usó para identificar materia orgánica fluorescente y medir los valores de intensidad de los canales rojo, verde y azul en cada uno de los objetos fluorescentes.

El promedio y la desviación estándar se miden a partir de los niveles de gris de cada uno de los canales. Se capturaron 50 imágenes de las secciones pulidas de cada ply de carbón, usando un objetivo de 20x fluorotar. Para cada ply de carbón se midió el promedio y la desviación estándar de las intensidades en los canales rojo, verde y azul. Esas medidas representan la variación de la intensidad de fluorescencia, que es la variación de la materia orgánica presente en la muestra (Arango et al., 2004).

Para analizar los colores de fluorescencia, los canales más importantes son el rojo y el verde. La combinación del rojo y el verde genera el color de las partículas. Esas son estudiadas usando el índice Verde/Rojo. Colores pardos significan una abundancia de los componentes de colores rojos y amarillos y los colores amarillos significan la misma cantidad del color rojo y del verde. Ejemplos de los colores de fluorescencia en materia orgánica sedimentaria se muestra en la figura 3.17.

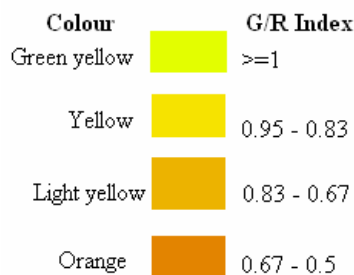


Fig. 3.17. Índice de color G/R basado sobre imágenes digitales.
G/R color index based on digital images.

3.4. ESTADÍSTICA

En el trabajo de recolección de la información sobre un campo determinado uno de los problemas con se enfrenta es la elección de las variables a medir. Por lo tanto normalmente se recoge información sobre un número amplio de variables. Así en los casos donde resultan muchas variables se presentan algunos problemas con la estimación de parámetros. De otro lado aparte del problema de estimación, esta el de la comprensión, de tal forma que se hace necesario abocar alguna técnica que resuma la información contenida en las variables y facilite su análisis.

El análisis de componentes principales tiene como objetivo principal la estructuración de un conjunto de datos multivariado mediante la reducción del número de variables, (Díaz, 2002). Además de:

- Generar nuevas variables que expresan la información contenida en un conjunto de datos.
- Reducir la dimensión del espacio donde están inscritos los datos.
- Eliminar las variables (si es posible) que aporten poco al estudio del problema.
- Facilitar la interpretación de la información contenida en los datos.
- Determinar unos pocos factores (componentes principales) que retengan la mayor variabilidad contenida en los datos. Las nuevas variables poseen algunas características deseables, tales como independencia y no correlación.

En el caso de la no correlación entre las variables originales, el análisis de componentes principales no tiene mucho que hacer, ya que los componentes se corresponderían con cada variable por orden de magnitud en la varianza; es decir, la primera componente coincide con la variable de mayor varianza, la segunda componente con la variable de segunda mayor varianza y así sucesivamente.

Para el análisis de componentes principales se utilizó el programa Multi – Variate Statistical Package Versión 3.13 y para los análisis de los datos de petrografía, palinofacies y esporomorfos, aparte del programa antes mencionado, se utilizó el programa Tilia TG View versión 2.02 para obtener los dendrogramas.

4. RESULTADOS

4.1. LITOLOGÍA Y MANTOS ESTUDIADOS

4.1.1 Introducción

Los mantos estudiados corresponden al Miembro Sabaletas de la Formación Amagá, (Fig 2.3). La figura 4.1 presenta la columna estratigráfica generalizada del sector estudiado con las respectivas minas y mantos, el tipo de análisis efectuado, el número de muestras analizadas y la localización de los resultados en los anexos. Dicha columna consta esencialmente de arcillolitas, lutitas, limolitas, areniscas y algunos mantos de carbón económicamente explotables, tales como los mantos 1, 2 y 3.

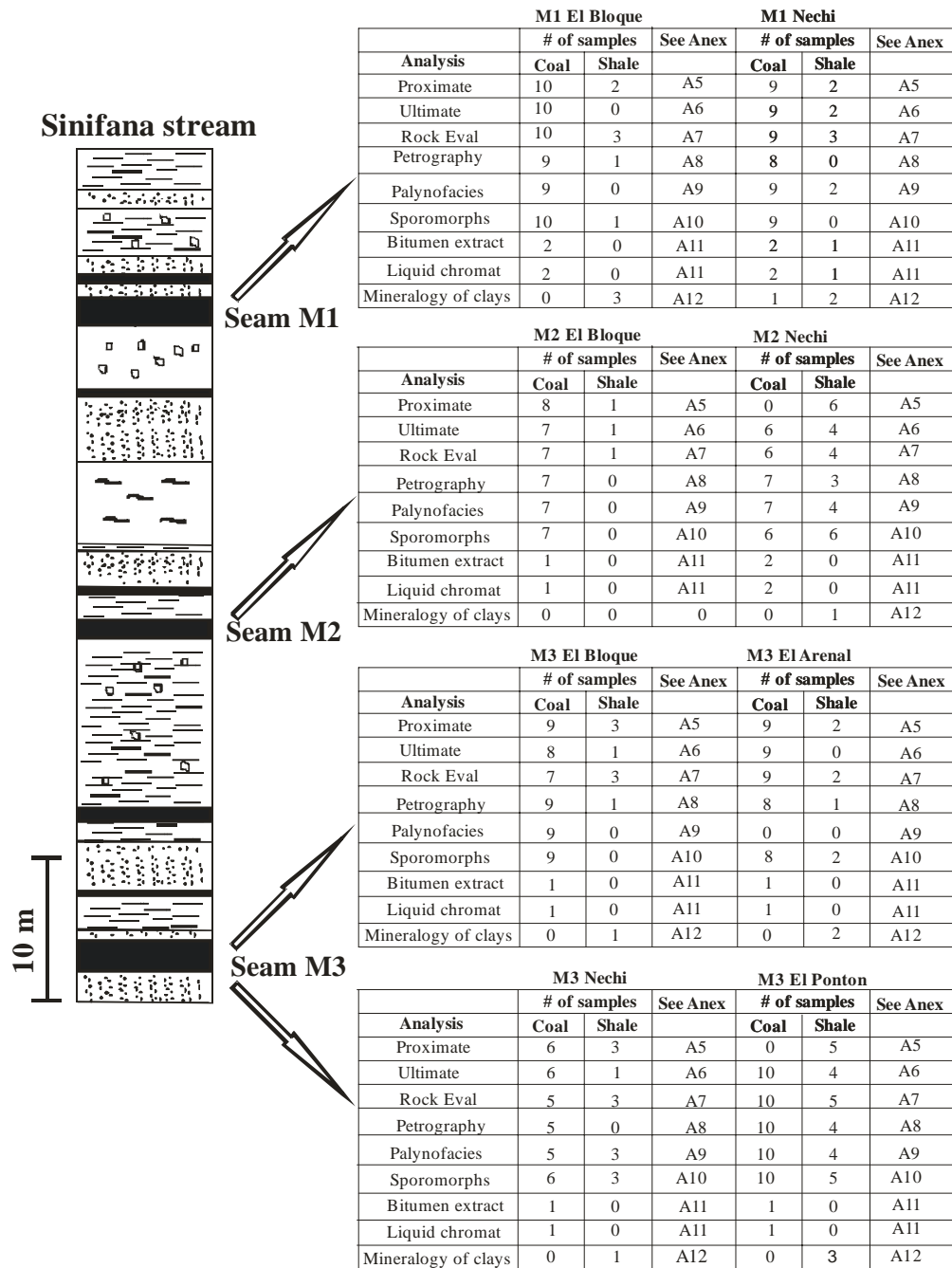


Fig. 4.1. Columna estratigráfica de la zona estudiada y el tipo de análisis efectuado. Resultados detallados están en los respectivos anexos.

Stratigraphical column of zone studied and type of analysis carried out. See detailed results in respective appendices.

4.1.2. Mina el Bloque

En la mina el Bloque se estudiaron 3 mantos. La descripción litológica de cada manto aparece en el Anexo A4 y la figura 4.2, muestra la litología de cada uno de los plies estudiados en los tres mantos a lo largo de la mina.

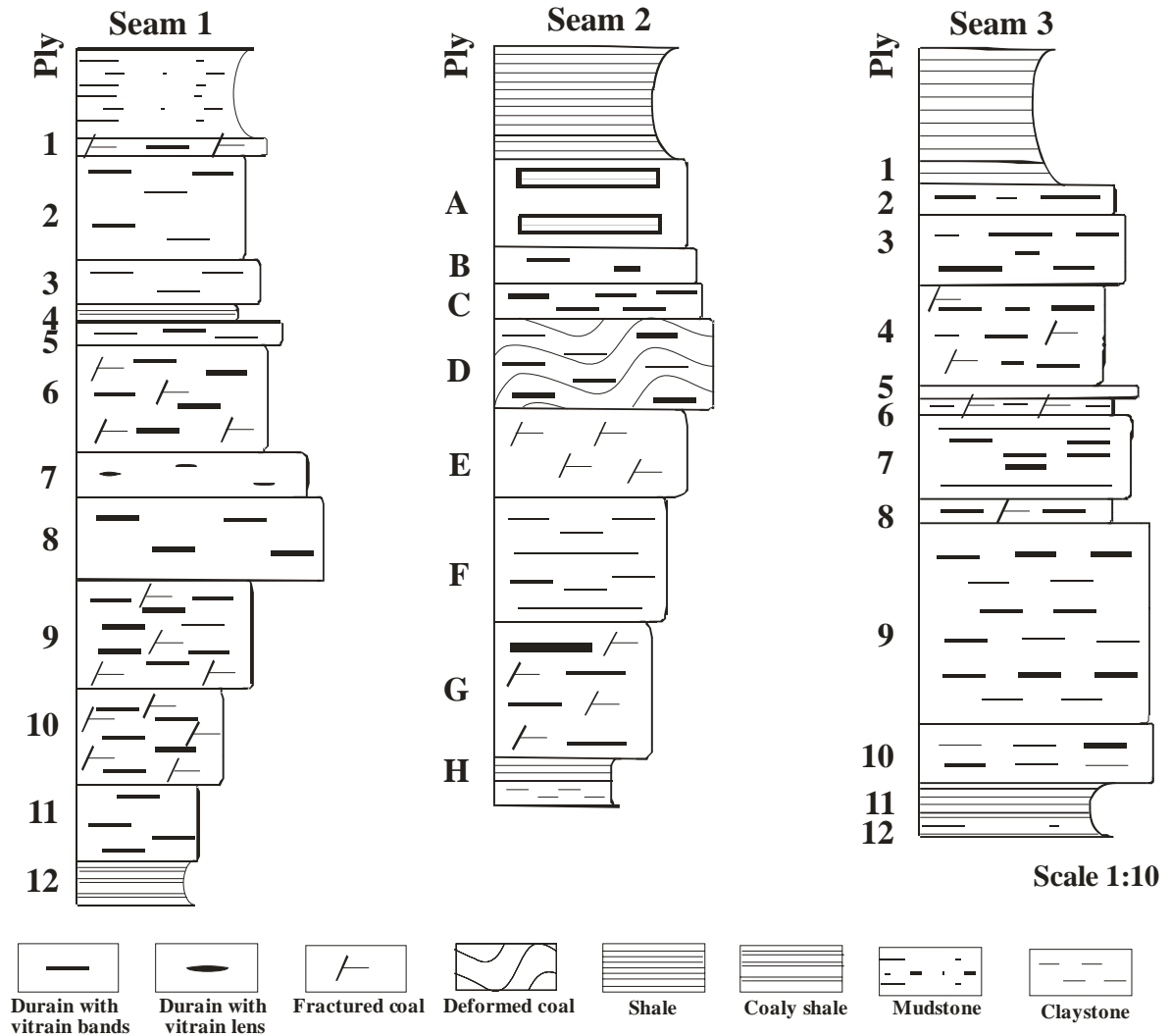


Fig. 4.2. Descripción litológica detallada de los mantos 1, 2 y 3 de la mina El Bloque.
Detailed lithological description of seams 1, 2 and 3 in El Bloque Mine.

4.1.3 Mina Nechi

En la mina Nechi se estudiaron detalladamente los plies de 3 mantos, a lo largo de la mina (Anexo A4) y los cuales se describen en la figura 4.3.

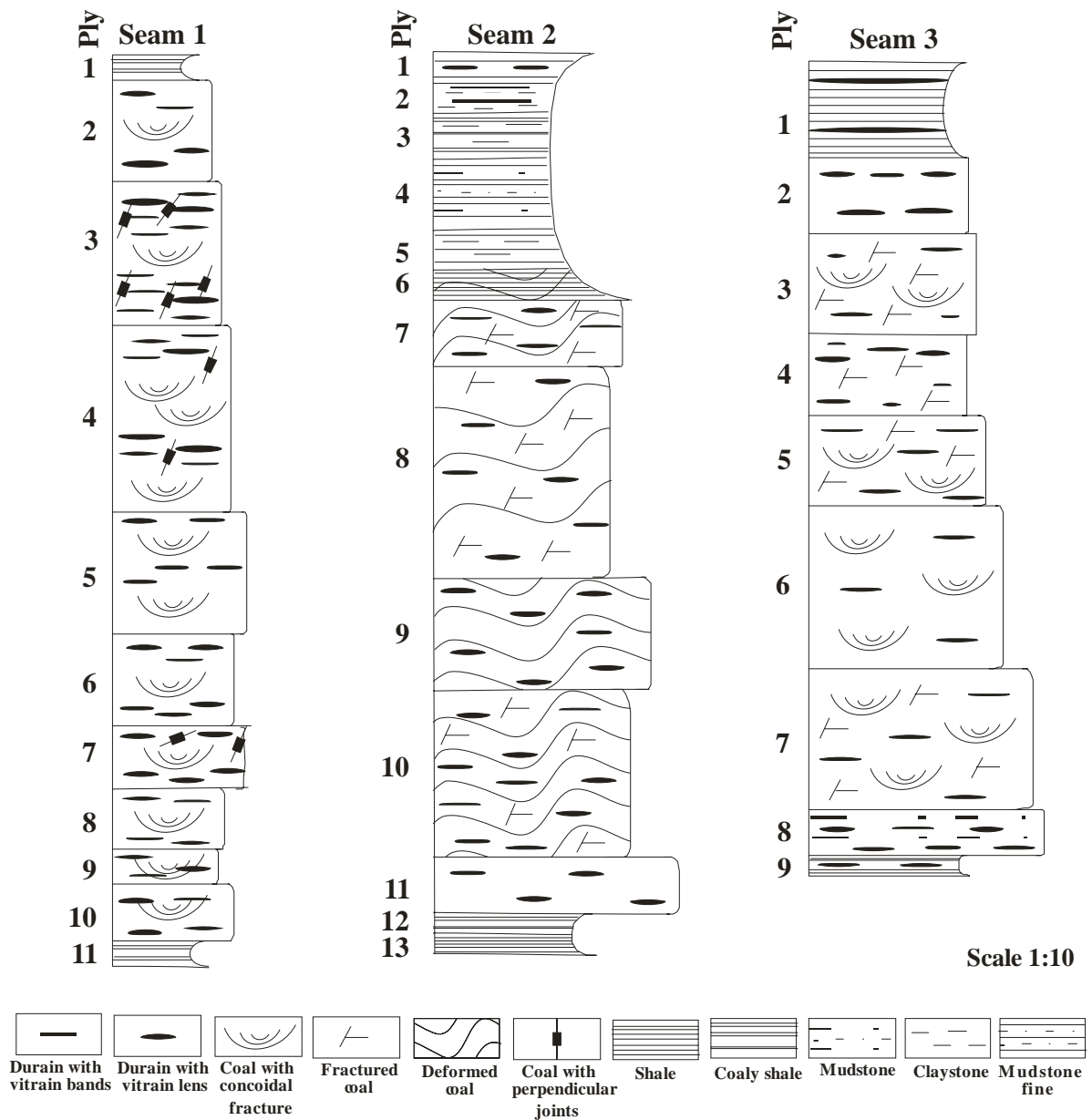


Fig. 4.3. Descripción litológica detallada de los mantos 1, 2 y 3 de la mina Nechi.
Detailed lithological description of seams 1, 2 and 3 in Nechi Mine.

4.1.4. Minas El Pontón y El Arenal

En las minas El Pontón y El Arenal se estudiaron cada ply en los mantos 3. La descripción se encuentra detallada en el (Anexo A4) y un resumen en la (Fig. 4.4).

En la descripción litológica se puede observar que el ply predominante en los carbones es el caracterizado por dureno bandeado con lentes de vitreno en diferentes tamaños, igualmente son comunes las intercalaciones de lutitas y el fracturamiento tanto en forma poligonal como concoidal.

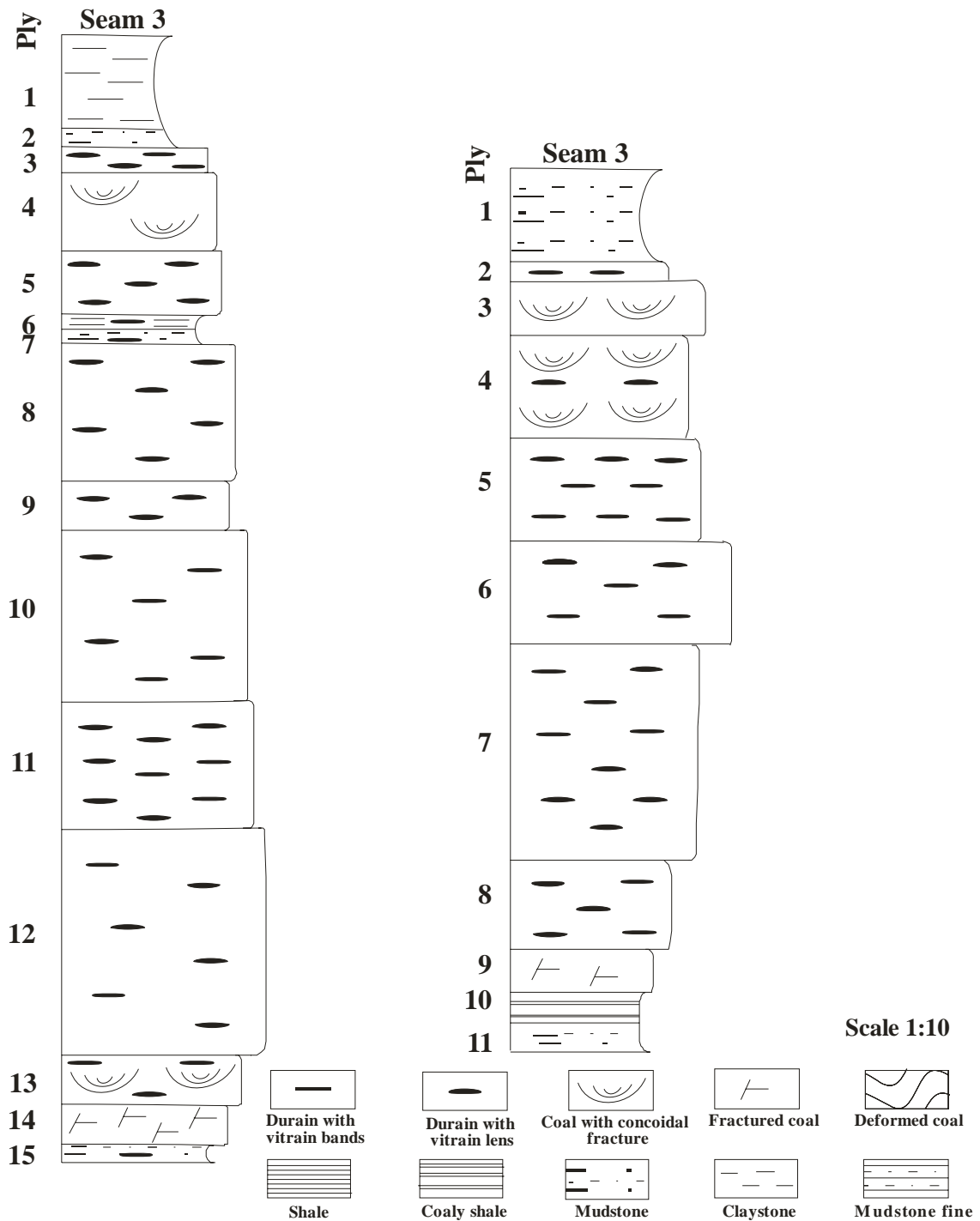


Fig. 4.4. Descripción litológica de cada uno de los plies del manto 3 de las minas El Pontón y El Arenal.
Lithological description of seams 3 in El Pontón and El Arenal Mines.

4.2. ANÁLISIS PRÓXIMOS

4.2.1. Mina El Bloque (Fig. 4.5 y Anexo A5)

El contenido de humedad de los plies de carbones en los tres mantos esta entre 5.3 y 10.7; y el manto 1 es el que presenta menor humedad. Los plies se caracterizan por su bajo porcentaje de cenizas (generalmente < 5% en la mayoría de las muestras), pero dos plies del manto 1 están por encima del 12% y uno del manto 2 por encima del 25 %. Las muestras del manto 3 son las que tienen los porcentajes de cenizas más bajos.

El contenido de materia volátil (lac) varía entre 42.9 y 55.8 %, siendo el manto 1 el que tiene mayor porcentaje y el manto 2 el de menor. El azufre generalmente es menor del 1%, en la mayoría de las muestras, solamente es superior a este valor en el ply 5 del manto 1 (1.02%), en la muestra A del manto 2 (1.75%) y en la muestra 1 del manto 3 (2.35%); en estos dos últimos mantos, se observa enriquecimiento en el contenido de azufre hacia el techo de los mantos. Las lutitas de la base de los mantos presentan porcentajes de azufre muy bajos < 0.1%, mientras que las del techo son mayores de 0.5%.

La figura 4.5, muestra el comportamiento general de los análisis próximos de los tres mantos, incluyendo las lutitas, aquí se pueden diferenciar claramente las lutitas por sus altos contenidos de cenizas y materias volátiles y su bajo porcentaje de humedad, y los plies de carbones que tienen buen potencial generador de hidrocarburos, por su mayor porcentaje de materias volátiles y su baja humedad.

4.2.2. Mina Nechí (Fig. 4.6 y Anexo A5)

El contenido de humedad de los plies de carbones en los tres mantos de esta mina varía entre 8.5 y 11.3, siendo el M2 el que presenta la menor humedad, lo cual me estaría indicando que este manto posiblemente tiene un tipo diferente de materia orgánica. El contenido de cenizas para la mayoría de las muestras es inferior al 5%, pero en el M2 hay varias muestras con porcentajes altos (7, 11, 22 y 47%) y en el manto 3 dos muestras presentan porcentajes mayores que 5%. Las muestras del M1 son las que presentan los menores porcentajes de cenizas.

La materia volátil para los tres mantos varía entre 44 y 51.5%, sin embargo, el M1 es el que presenta los mayores porcentajes de materia volátil. En las muestras de carbón de M2 se observa un menor contenido de humedad que M1, el contenido de azufre es variable pero tiende a aumentar hacia el techo, además este manto presenta intercalaciones de lutitas carbonosas que presentan contenidos de azufre altos. En el manto 3 el contenido de humedad en los ply de carbón varía entre 7.5 – 11, mientras que en el manto 2, esta entre 8.9 y 11.2 confirmando que el contenido de humedad esta más directamente relacionado al tipo de materia orgánica que al grado de carbonificación cuando se analizan en detalle las muestras de cada ply y no el manto total como normalmente se hace.

En cuanto al contenido de azufre, las muestras del manto 1 son las que presentan los menores porcentajes, ya que todas las muestras están por debajo del 0.5%. En el M2 los porcentajes son mayores y se incrementan hacia el techo del manto y en las lutitas carbonosas donde alcanza un 5.6%. En el M3 la mayoría de las muestras están por debajo del 0.5% e igual que M2 el contenido de azufre se incrementa hacia el techo del manto. Las lutitas de la base de los mantos tienen bajos contenidos de azufre (<0.2), mientras que las del techo presentan porcentajes mayores a 0.4%

En la Figura 4.6 aparecen los resultados de los análisis de los tres mantos incluyendo las lutitas; al igual que en la mina el Bloque, se puede diferenciar claramente las lutitas y los plies de carbones que tienen buen potencial generador de hidrocarburos por su mayor contenido de MV y su baja humedad.

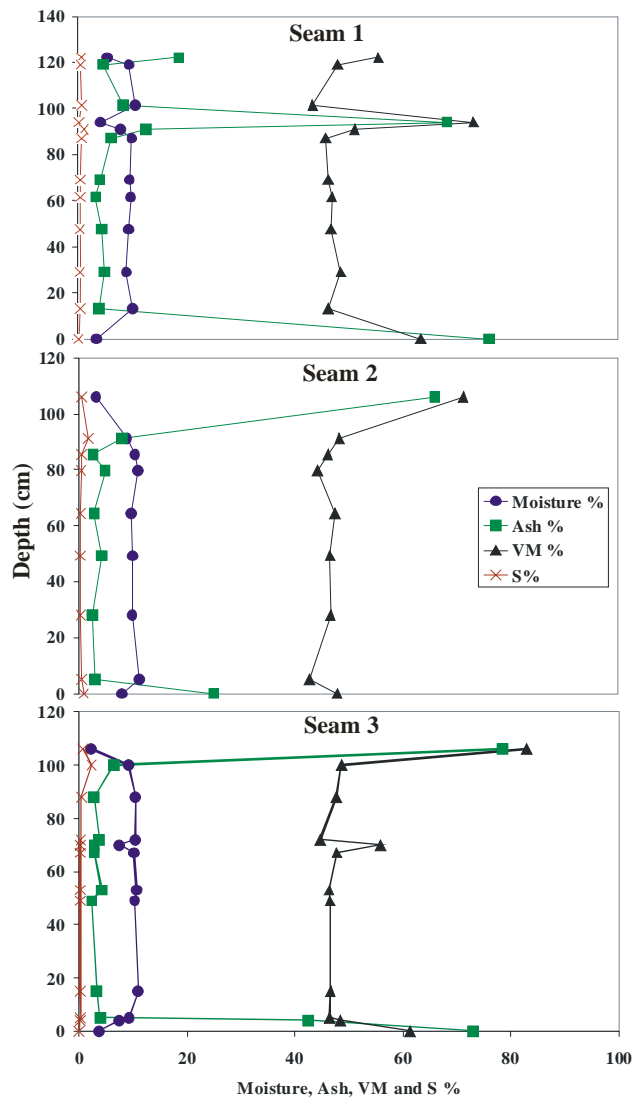


Fig. 4.5. Análisis próximos de los mantos 1, 2 y 3 de la mina El Bloque (ver litología en Fig. 4.2)
Proximate analysis of seams 1, 2 and 3 in El Bloque Mine (see Fig. 4.2 for lithology).

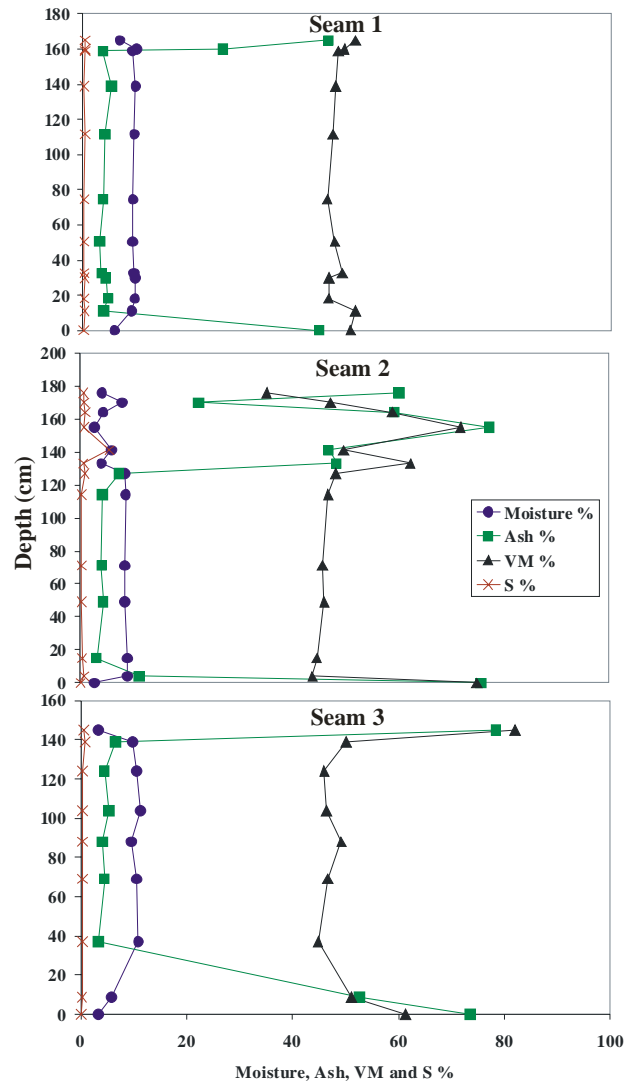


Fig. 4.6. Análisis próximos de los mantos 1, 2 y 3 de la mina Nechí (ver litología en Fig. 4.3)
Proximate analysis of seams 1, 2 and 3 in Nechi Mine (see Fig. 4.3 for lithology).

4.2.3 Mina El Pontón (Fig. 4.7, 4.8 y Anexo A5)

Por medio de los análisis próximos es posible diferenciar dos grupos de plies de carbones, los de la parte superior (grupo 1) que abarca los plies 3, 4 y 5 y los de la parte inferior (grupo 2) que corresponden a los plies 8 a 14. Esta separación en grupos también se identificó en el análisis de componentes principales.

A su vez la parte superior se puede dividir en dos subgrupos, el ply 3 y los plies 4 y 5. El ply 3 se caracteriza por presentar el más alto contenido de cenizas, azufre y materia volátil (21.5, 6.78 y 51.1% respectivamente) y el más bajo contenido de humedad residual (6.9 %).

Los plies 8 a 14 del grupo 2 se caracterizan por tener bajos contenidos de cenizas y azufre (menor que 5 y 0.7% respectivamente) y altos contenidos de materia volátil y humedad (mayor de 43 y 9.6% respectivamente). Además dentro de esta parte inferior, se tienen dos muestras en la parte central (plies 11 y 12 que corresponden al subgrupo 2) que presentan los menores porcentajes de humedad y azufre (9.6-9.8% y 0.25-0.26% respectivamente) y los más altos contenidos de materia volátil (46.7-47.4%).

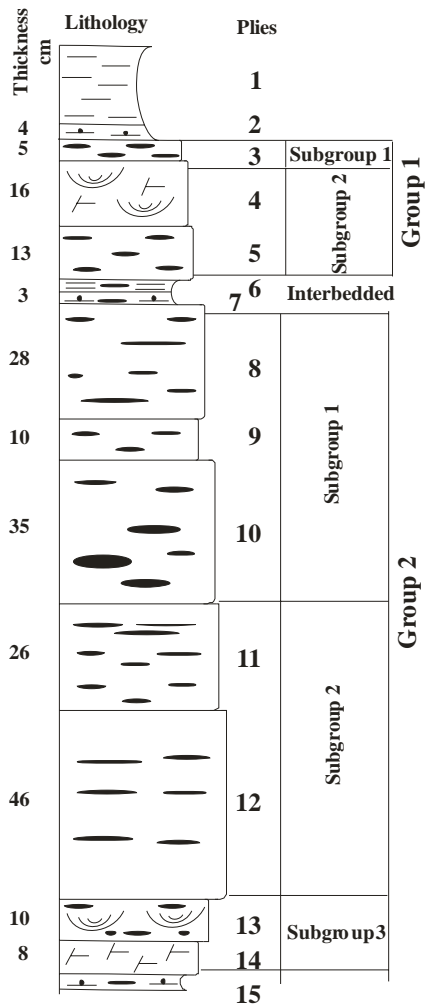


Fig. 4.7. Mina El Pontón, manto 3. División de la columna estratigráfica en grupos y subgrupos de los análisis próximos de plies.

Mine El Pontón, seam 3. Stratigraphical column subdivision in groups and subgroups for proximate analysis of plies.

La figura 4.8, muestra los resultados de los análisis próximos, incluyendo las lutitas, las cuales se diferencian claramente de los plies de carbones.

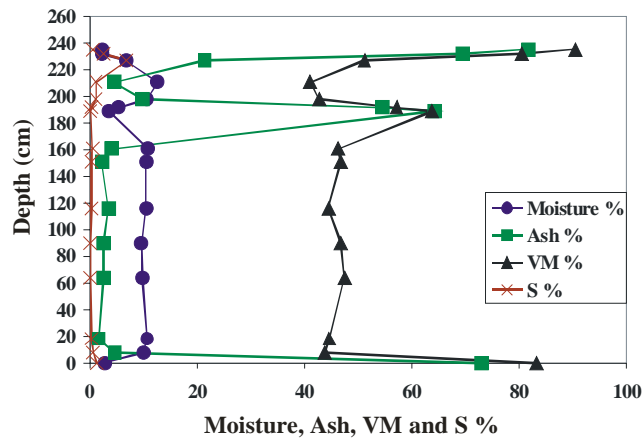


Fig. 4.8. Análisis próximos del manto 3 de la mina El Pontón
Proximate analysis of seam 3 in El Ponton Mine.

4.2.4. Mina El Arenal, Fig. 4.9 y Anexo A5

Para esta mina, las muestras de los plies de carbón en el manto 3 tienen humedades que varían entre 8.8 y 11.4%, el contenido de cenizas por lo general es menor del 10%, pero en las muestras del techo y el piso son mucho más altos 23.6 y 18.4 respectivamente. Las materias volátiles varían entre 40.5 y 52.9 y el porcentaje de azufre por lo general es menor del 0.6 %, pero se incrementa un poco hacia el techo del manto.

En la figura 4.9, en donde se muestran los resultados de los análisis próximos del manto, incluyendo las lutitas de la base y del techo, se observa que hay claras diferencias entre las muestras de la parte superior (plies 3 y 4) con respecto a las de la parte inferior (5, 6, 7 y 8), mientras que el ply 9 aunque tiene más cenizas no presenta menor humedad.

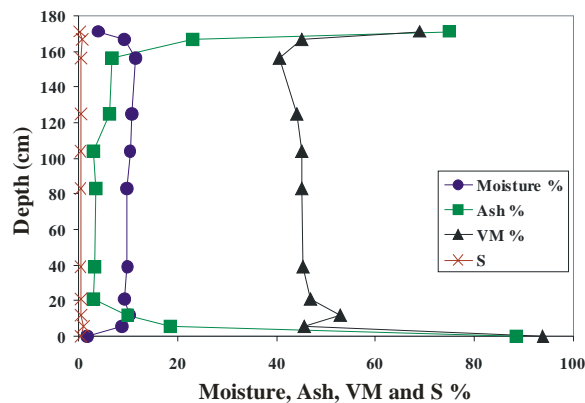


Fig. 4.9. Análisis próximos del manto 3 de la mina El Arenal (ver litología en Fig. 4.4)
Proximate analysis of seam 3 in El Arenal Mine (see Fig. 4.4 for lithology).

4.3. ANÁLISIS ELEMENTAL

Para los análisis elementales, no se analizaron los plies de lutitas, ya que si no se concentra la materia orgánica, presentan comportamientos anómalos, como se puede ver en el ply 4 del M1 de la Mina el Bloque (Fig. 4.10).

4.3.1. Mina El Bloque (Fig. 4.10 y Anexo A6)

El contenido de hidrógeno (lac) en todos los plies es mayor del 6%, y la relación H/C para todas las muestras está por encima del 1%. El contenido de nitrógeno es mayor de 1 % pero menor del 2%. El porcentaje de carbono por lo general esta por encima del 70% y se nota mayor variación en M3 y en especial en el ply 4. El contenido de oxígeno esta por debajo del 20% en todas las muestras.

4.3.2. Mina HENCHÍ (Fig. 4.11 y Anexo A6)

Para todas las muestras de los tres mantos de la mina Nechi el contenido de carbono es superior al 70%; el contenido de hidrógeno es mayor del 6.3 %, pero existen dos muestras con porcentajes por encima del 7% en los mantos 1 y 2. El contenido de nitrógeno por lo general es inferior al 2%, pero es claro que las muestras de M2 tienen el mayor contenido y las de M3 el menor.

La relación H/C es mayor de 1 para todas las muestras, sin embargo las muestras de M2 presentan valores mayores. El manto que presenta mayor variación es el M1.

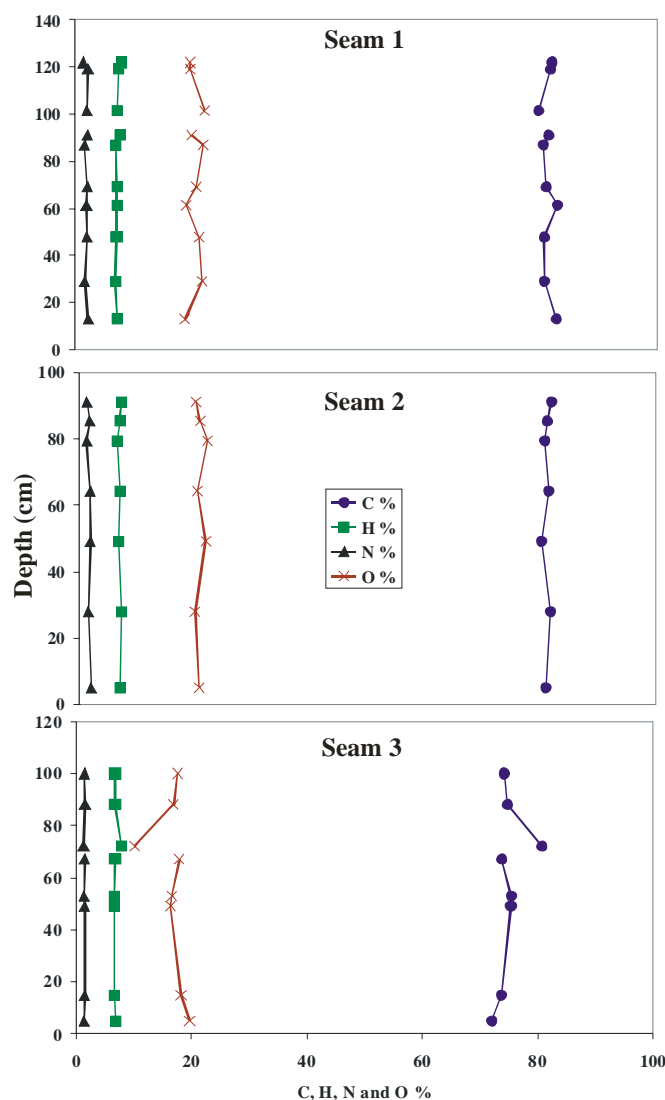


Fig. 4.10. Análisis elemental de los mantos 1, 2 y 3 de la mina El Bloque (ver litología en Fig. 4.2).
Ultimate analysis of seams 1, 2 and 3 in El Bloque Mine (see Fig. 4.2 for lithology).

4.3.3. Mina El Pontón (Fig. 4.12 y Anexo A6)

Para todas las muestras excepto 1 (ply 3) el contenido de carbono, e hidrógeno es mayor del 70% y el 6% respectivamente y el de oxígeno es mayor del 20%. El contenido de nitrógeno varía entre 1.25 y 1.65, pero para la muestra 4 es menor del 1%. La relación H/C es mayor de 1 para todas las muestras.

4.3.4. Mina El Arenal (Fig. 4.13 y Anexo A6)

Excepto para una muestra (ply 2) que tiene un porcentaje de carbono menor del 70% e hidrógeno menor del 6%, las demás muestras presentan valores de carbono e hidrogeno mayores de 70 y 6% respectivamente, y contenidos de oxígeno muy cercanos al 20%. El contenido de nitrógeno es inferior al 1.6% para todas las muestras.

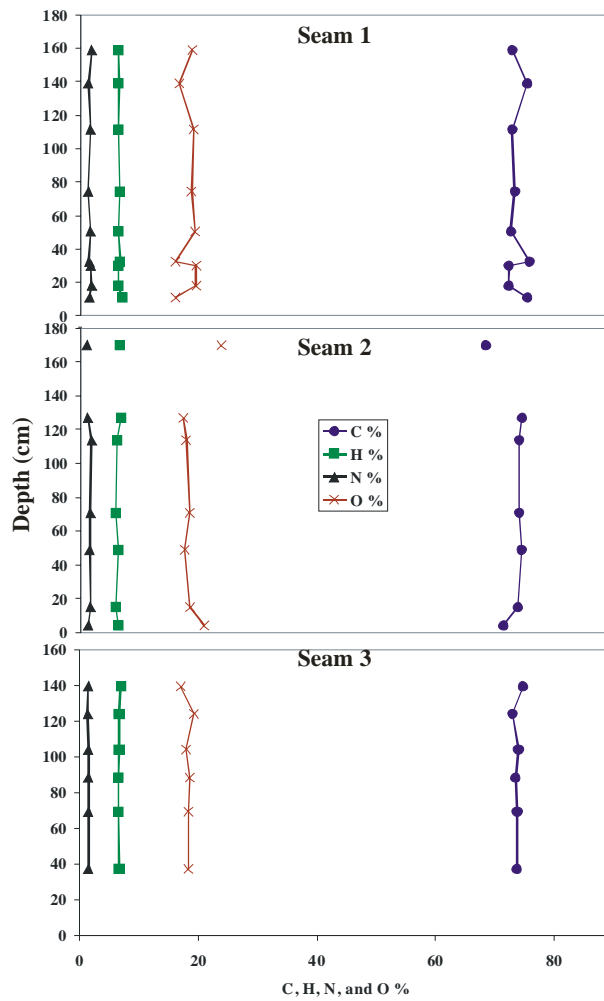


Fig. 4.11. Análisis elementales de los mantos 1, 2 y 3 de la mina Nechí (ver litología en Fig. 4.3).
Ultimate analysis of seams 1, 2 and 3 in Nechi Mine (see Fig. 4.3 for lithology).

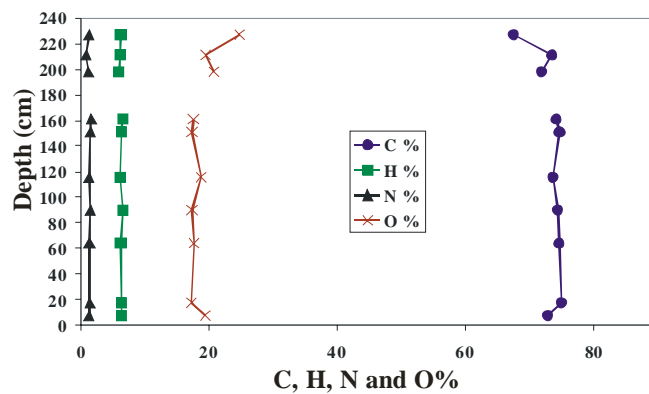


Fig. 4.12. Análisis elementales del manto 3 de la mina El Pontón (ver litología en Fig. 4.4).
Ultimate analysis of seam 3 in El Pontón Mine (see Fig. 4.4 for lithology).

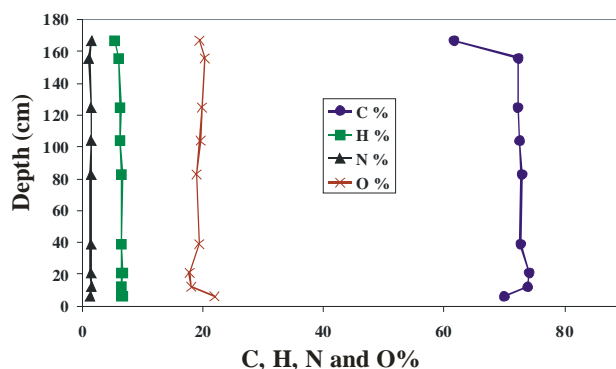


Fig. 4.13. Análisis elementales del manto 3 de la mina El Arenal (ver litología en Fig. 4.4).
Ultimate analysis of seam 3 in El Arenal Mine (see Fig. 4.4 for lithology).

4.4 PIROLISIS ROCK-EVAL

4.4.1. Mina El Bloque (Fig. 4.14, 4.15, 4.16 y Anexo A7)

Los resultados de pirólisis de las muestras de carbón de M1 El Bloque, indican que las muestras 1 y 4 tienen: la mayor relación de carbono pirolizado/carbono orgánico total (CP/COT), S1, S2, y el menor contenido de carbono mineral (CMIN). En el manto 2 la muestra que presenta esta característica es la 1 y en el M3 es la muestra 4. Las lutitas en general tienen altos índices de hidrógeno, pero la cantidad de petróleo que pueden producir es la más baja comparada con los carbones. Para M3 El Bloque la mayoría de las muestras presentan HI por encima de 200 y por lo tanto el S1 es mayor de 1 y el S2 varía entre 139 y 288, destacándose la muestra 4 con el mayor HI, S1 y S2. La muestra 3 por el contrario es la que presenta las menores posibilidades de generación.

En la figura 4.14 se pueden observar las diferencias y semejanzas entre los mantos, así por ejemplo se nota que M2 es mucho más homogéneo y con menos potencial que M1 y M3, también, se observa que M1 y M3 presentan características similares, ya que las muestras con mejor potencial se observan hacia la parte superior de los mantos.

La figura 4.15 muestra la comparación entre el S1 y el Carbono Mineral para los tres mantos de la mina El Bloque aquí se puede observar que en términos generales el carbono mineral aumenta gradualmente desde la base hacia la parte intermedia de los mantos y disminuye hacia el techo, pero los mantos 1 y 3 presentan una mayor variación. Con respecto al S1, en los mantos 1 y 3 las muestras con mayor potencial (1 y 4 respectivamente) presentan una gran separación en el gráfico o sea que normalmente presentan menor contenido de carbono mineral que S1, convirtiéndose éstos parámetros en buenos indicadores de selección de rocas con alto o pobre potencial de generación. El Manto 2 presenta características diferentes, ya que la mayoría de las muestras tienen contenidos de S1 menores que los de carbono mineral.

El tipo de kerógeno para los tres mantos de la mina El Bloque, varía entre tipo III y II (Fig. 4.16). Aquí también se puede observar la inmadurez de la materia orgánica y las diferencias y semejanzas entre los mantos, así por ejemplo M1 y M3 presentan características semejantes y distintas a M2, comprobándose de esta manera el mejor potencial de los mantos 1 y 3 con respecto al M2.

4.4.2. Mina Nechí (Fig. 4.17, 4.18, 4.19 y Anexo A7)

De los mantos de esta mina las muestras que presentan mayores índices de hidrógeno y por lo tanto mayores contenidos de S1 se encuentran en el M1. En el M2 se tienen varias muestras con índices de hidrógeno menores que 200 y por lo tanto con $S1 < 0.5$, $S2 < 100$, pero existen otras muestras con $IH > 200$, $S1 > 0.85$ y $S2$ variable entre 120 y 146. En el M1, las muestras 8 y 9 y 6 y 7 se

parecen. El carbono mineral es menor del 1% en las primeras muestras y mayor que uno en las restantes y se vuelve a disminuir hacia el piso del manto.

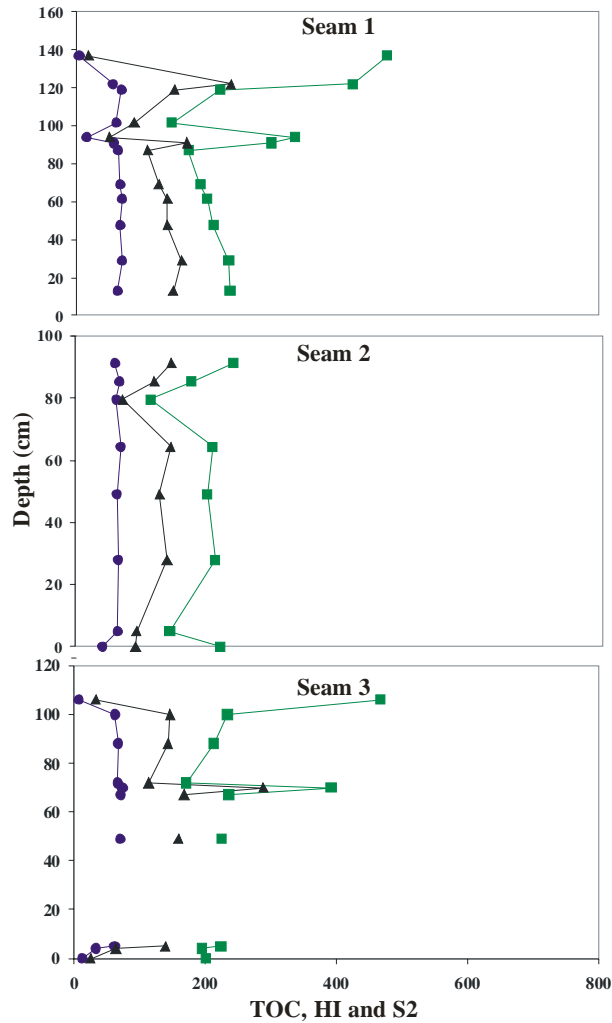


Fig. 4.14. Análisis de pirólisis Rock-Eval (COT, IH, S2) de los mantos 1, 2 y 3 de la mina El Bloque
Rock-Eval pyrolysis analysis (TOC, HI, S2) of seams 1, 2 and 3 in El Bloque Mine.

En el manto 1 Nechí al igual que M1 El Bloque la mayoría de las muestras presentan $IH > 200$, pero el S1 no es mayor de 1 en todas ellas, y el S2 varía entre 135 y 223, y en promedio son mayores que para M1 El Bloque. A diferencia de M1 El Bloque, las muestras que presentan mayor potencial se encuentran hacia la base del manto indicando que estos dos mantos posiblemente no son los mismos o se encuentran invertidos.

El manto 2 de la mina Nechí se diferencia de M2 de la Mina El Bloque porque tiene una intercalación de lutitas carbonosas que no tiene este último; los IH para los carbones son mayores ya que todos están por encima de 150 y por lo tanto los valores de $S2 > 100$; con respecto al S1 algunas muestras son mayores de 1 mientras que otras son menores.

En el manto 3 la muestra 2 es la que presenta las mejores posibilidades de generación, las demás muestras tienen IH por debajo de 200 y valores de $S1 < 1$ y el S2 varía entre 111 y 153.

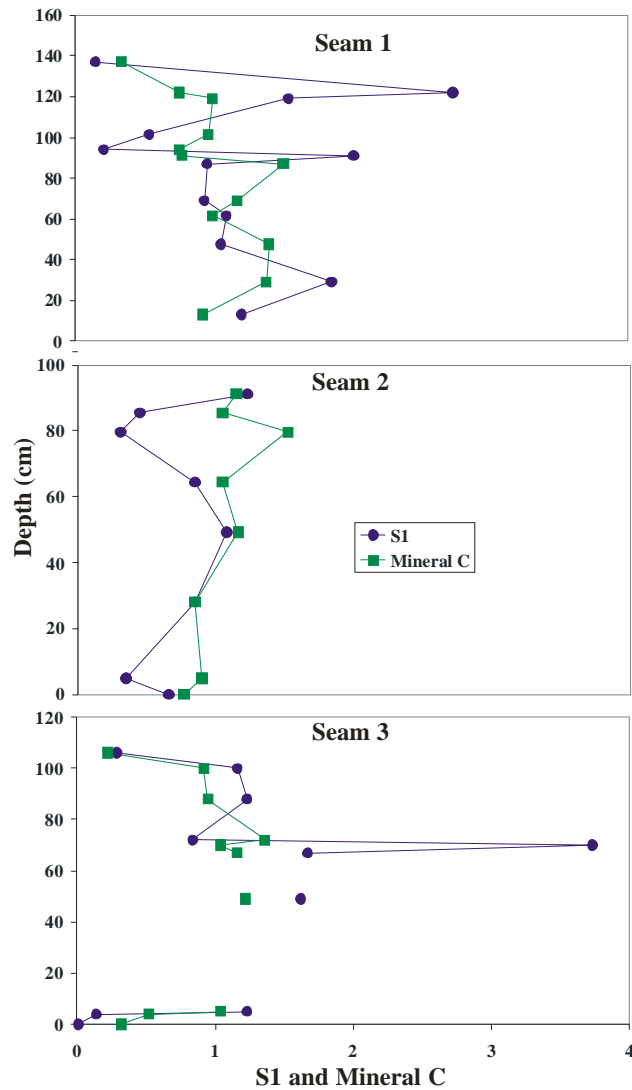


Fig. 4.15. Análisis de pirólisis Rock-Eval (S1, C Mineral) de los mantos 1, 2 y 3 de la mina El Bloque
Rock-Eval pyrolysis analysis (S1, Mineral C) of seams 1, 2 and 3 in El Bloque Mine.

La figura 4.17 presenta los resultados de los análisis de COT, IH y S2 de los tres mantos de la mina Nechí, aquí se pueden ver las diferencias y semejanzas entre los mantos, así por ejemplo se nota que M3 es mucho más homogéneo y con menos potencial que M1 y M2, también, se observa, que M1 y M2 presentan algunos plies con buen potencial, pero en general M1 presenta contenidos de S2 mayores que todos los mantos.

En la figura 4.18 se puede observar que en términos generales el carbono mineral aumenta gradualmente desde la base hacia la parte intermedia de los mantos y disminuye hacia el techo. Con respecto al S1, en el M1 hay una relación inversa, en muchas de las muestras ya que a mayor carbono mineral, menor S1 y los plies con mayor potencial presentan separación inversa en las curvas. En M2 se ve la diferencia entre los plies de lutitas y los de carbones, ya que en estos casos el contenido de carbono mineral y el S1 de las lutitas son bajos comparados con los carbones. Y a diferencia de la mina El Bloque, el manto 3 es muy diferente a M1, evidenciando la desigualdad entre los mantos de estas dos minas.

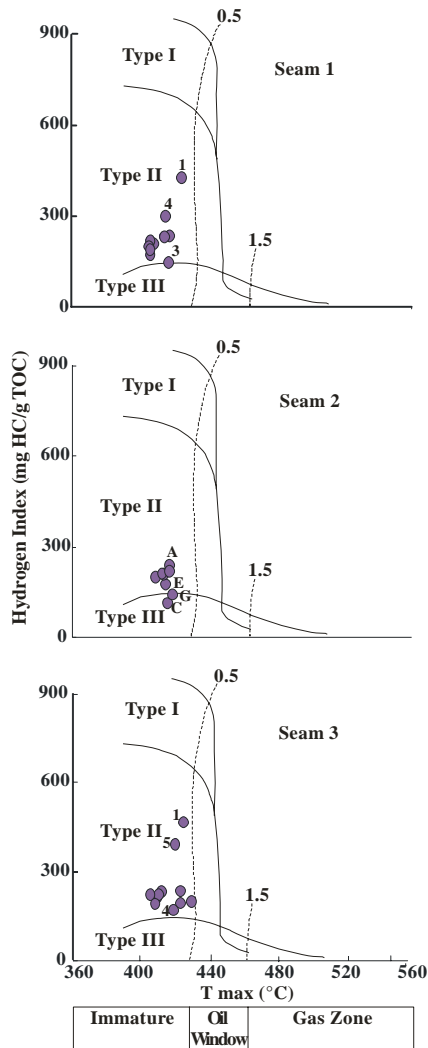


Fig. 4.16. Mina El Bloque. Tipos de kerogeno

- A. Manto 1, las muestras 1 y 4 tienen el mayor IH y la muestra 3 el más bajo (ver texto).
 B. Manto 2, la muestra A tiene el mayor IH, y la muestra C el más bajo (ver texto)
 C. Manto 3, la muestra 4 tiene el mayor IH, y la muestra 3 el más bajo (ver texto)
- El Bloque Mine. Types of kerogen*
- A. Seam 1, samples 1 and 4 have the highest HI's and sample 3 the lowest (see text).
 B. Seam 2, sample A has the highest HI, sample C the lowest (see text)
 C. Seam 3, sample 4 has the highest HI, sample 3 the lowest (see text)

El tipo de kerógeno para los tres mantos de la mina Nechí, al igual que para la mina El Bloque varía entre tipo III y II, pero normalmente hay más muestras dentro del tipo II que en el tipo III. Aquí también se puede observar la inmadurez de la materia orgánica y las diferencias y semejanzas entre los mantos, así por ejemplo M1 presenta sólo kerógeno tipo II, mientras que M2, presenta mayor variabilidad, ya que presenta muestras con kerógeno tipo III y otras de tipo II comprobándose de esta manera el mejor potencial del manto 1 con respecto al M2 y M3.

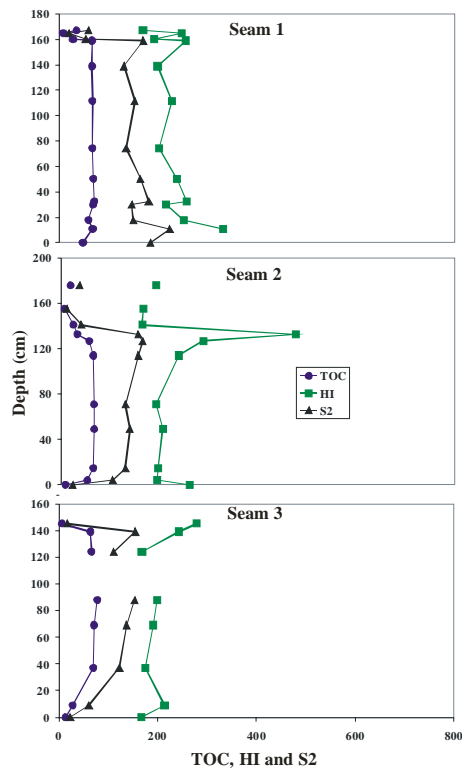


Fig. 4.17. Análisis de pirólisis rock-eval (COT, IH, S2) de los mantos 1, 2 y 3 de la mina Nechi
Rock-Eval pyrolysis analysis (TOC, HI, S2) of seams 1, 2 and 3 in Nechi Mine.

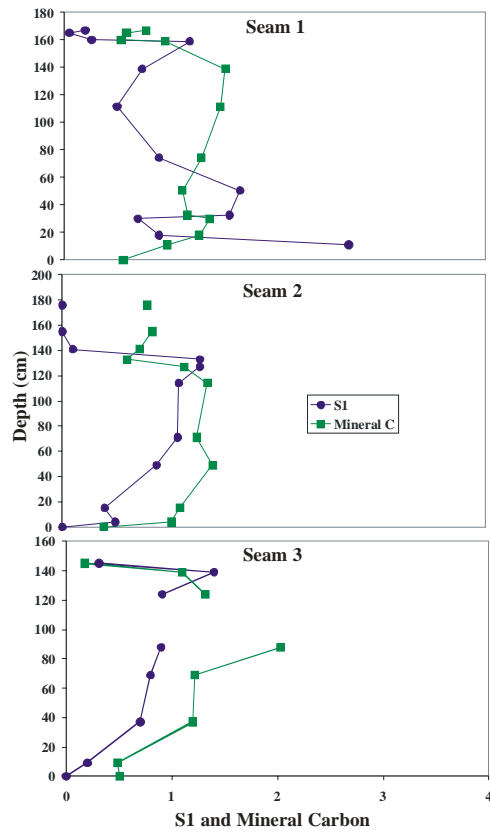


Fig. 4.18. Análisis de pirólisis Rock-Eval (S1, Carbono Mineral) de los mantos 1, 2 y 3 de la mina Nechi
Rock-Eval pyrolysis analysis (S1, Mineral Carbon) of seams 1, 2 and 3 in Nechi Mine.

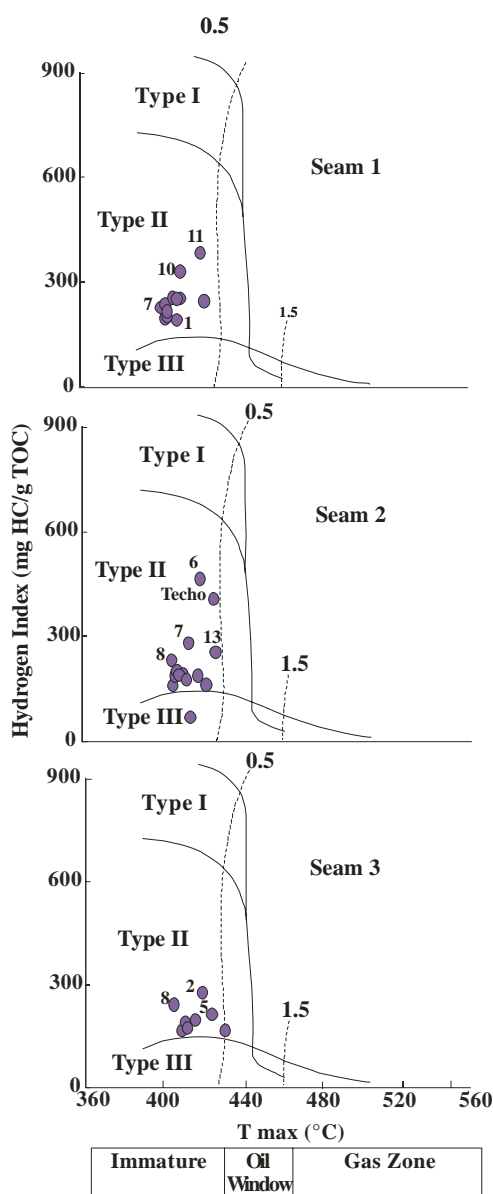


Fig. 4.19. Mina Nechí. Tipos de kerógeno

- A. Manto 1, la muestra 11 tiene el mayor IH y la muestra 1 el más bajo (ver texto).
- B. Manto 2, la muestra 6 tiene el mayor IH, y la muestra 5 el más bajo (ver texto)
- C. Manto 3, la muestra 1 tiene el mayor IH, y la muestra 3 el más bajo (ver texto)

Nechi Mine. Types of kerogen

- A. Seam 1, sample 11 has the highest HI and sample 1 the lowest (see text).
- B. Seam 2, sample 6 has the highest HI, sample 5 the lowest (see text)
- C. Seam 3, sample 1 has the highest HI, sample 3 the lowest (see text)

Con base en los resultados de pirolisis es posible decir que el manto 3 de la mina El Bloque es muy diferente al M3 de la Mina Nechí, esto significa que estos dos mantos no son correlacionables aunque tengan el mismo nombre y se encuentren geográficamente muy cerca.

De otro lado, al comparar los gráficos, se observan diferencias importantes entre las características de los mantos 1, 2 y 3 de las minas El Bloque y Nechi.

En todos los mantos de esta zona se observa que el carbono mineral aumenta desde la base de los mantos hasta la parte media y luego disminuye hacia el techo del manto. En la mina el Bloque se

presenta un comportamiento parecido, pero aquí el M2 es mucho más homogéneo (Figs. 4.15 y 4.18).

4.4.3. Mina El Pontón, (Fig. 4.20, 4.21, 4.22 y Anexo A7)

En esta muestra se tienen las lutitas con los más altos IH (459, 490, y 707) y a su vez el carbón con menor IH = 64, de igual manera todas las muestras de carbón presentan IH < 200, sin embargo se observan varias con S1 > 1 y S2 >100. Si se comparan estas características con las de M3 El Bloque, se nota que tampoco hay correlación entre éstos dos mantos.

Si se compara la muestra 2 que tiene un alto IH (707) con la muestra 11 que tiene bajo IH (175) y alto COT (76.36%) se nota que puede producir más petróleo la segunda debido al alto contenido de m.o. Pero si las dos tuvieran el mismo % de COT y las diferencias marcadas en el IH, la muestra que presenta mayor HI generaría cuatro veces más petróleo que la mas pobre en IH. O sea que lo que realmente importa a la hora de producir hidrocarburos no es solamente la calidad de la m.o., sino que también es necesario una cantidad suficiente de esta, así se necesitaría al menos 10% de materia orgánica de muy buena calidad (IH > 400) para considerar una roca como posible potencial de hidrocarburos.

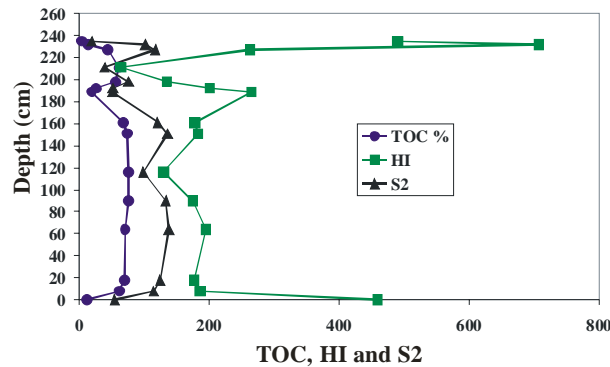


Fig. 4.20 Análisis de pirólisis Rock-Eval (COT, IH, S2) del manto 3 de la mina El Pontón
Rock-Eval pyrolysis analysis (TOC, HI, S2) of seam 3 in El Ponton Mine

Es importante ver como el contenido de carbono mineral aumenta gradualmente desde la lutita de la base del manto (ply 15) hasta el ply 10 y de ahí empieza a disminuir hasta llegar a la intercalación (muestras 6 y 7), a partir de la cual empieza de nuevo el incremento del carbono mineral hasta nuevamente empezar a descender.

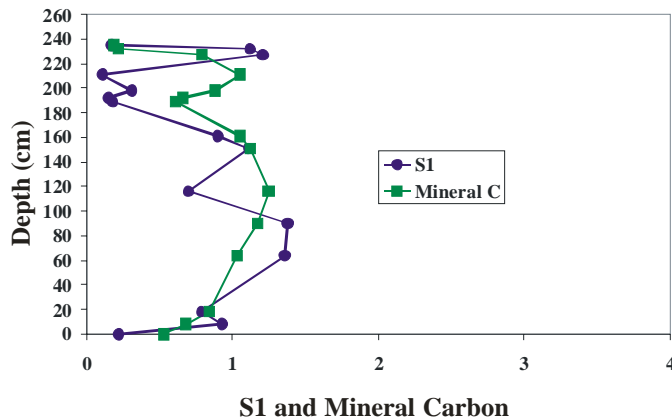


Fig. 4.21. Análisis de pirólisis Rock-Eval (S1, Carbono Mineral) del manto 3 de la mina El Pontón.
Rock-Eval pyrolysis analysis (S1, Mineral Carbon) of seam 3 in El Ponton Mine.

A lo largo del manto de carbón y sus lutitas asociadas, se tienen todos los tipos de kerógenos, los cuales estarían asociados a condiciones ambientales y de vegetación diferentes, igualmente se observa la inmadurez de la materia orgánica.

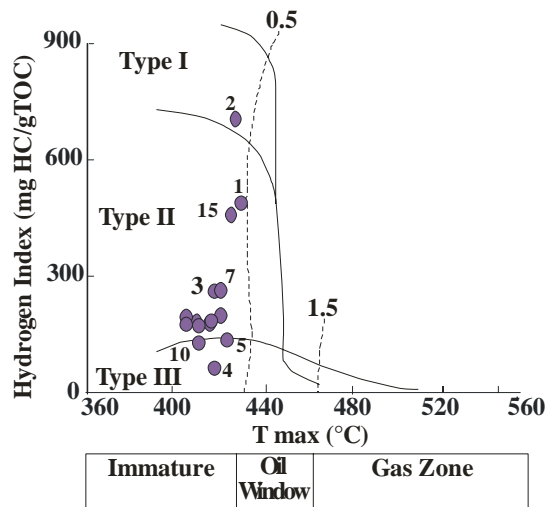


Fig. 4.22. Mina El Pontón, Manto 3. Tipos de kerógeno
 Las muestras 1 y 2 tienen el mayor IH y la muestra 4 el más bajo (ver texto).
El Ponton Mine, Seam 3. Types of kerogen
Samples 1 and 2 have the highest HI's and sample 4 the lowest (see text).

Teniendo en cuenta el porcentaje de carbono mineral, el índice de hidrógeno y el valor de S1, se puede verificar el agrupamiento hecho con los análisis próximos, pero aquí se nota más claramente que el subgrupo 1 y 3 de los grupos 1 y 2 respectivamente, se podrían tomar como grupos independientes dadas las diferencias marcadas entre ellos.

4.4.4. Mina El Arenal, (Fig. 4.23, 4.24, 4.25 y Anexo A7)

En el manto 3 de esta mina, el IH es menor de 200 y el S1 varía entre 0.5 a 1.4 para la mayoría de los plies, solo existe uno que tiene 0.13 en S1.

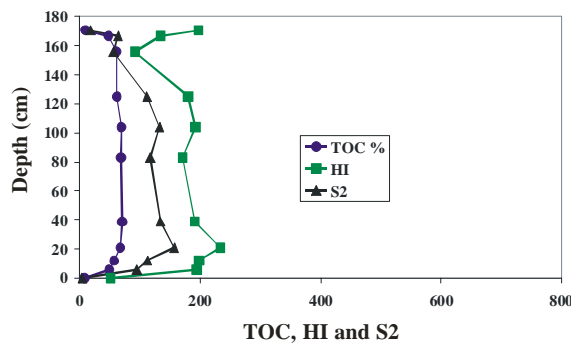


Fig. 4.23. Análisis de pirolisis Rock-Eval (COT, IH, S2) del manto 3 de la mina El Arenal
Rock-Eval pyrolysis analysis of seam 3 in El Arenal Mine.

Al igual que en los otros mantos, el carbono mineral incrementa desde la base del manto hasta la parte media y luego disminuye hacia el techo del manto.

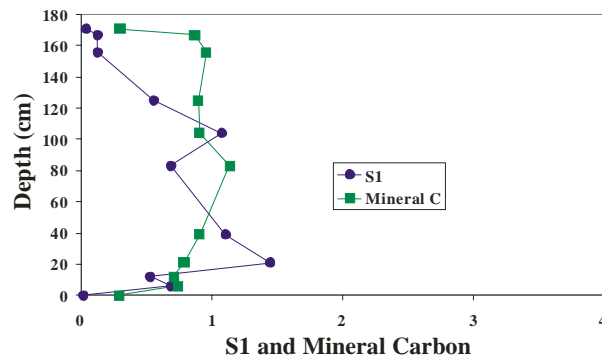


Fig. 4.24. Análisis de pirólisis Rock-Eval (S1, Carbono Mineral) del manto 3 de la mina El Arenal
Rock-Eval pyrolysis analysis (S1, Mineral Carbon) of seam 3 in El Arenal Mine.

El tipo de kerógeno varía entre tipo II y III, e igual que para los otros mantos se verifica el bajo rango de los carbonos.

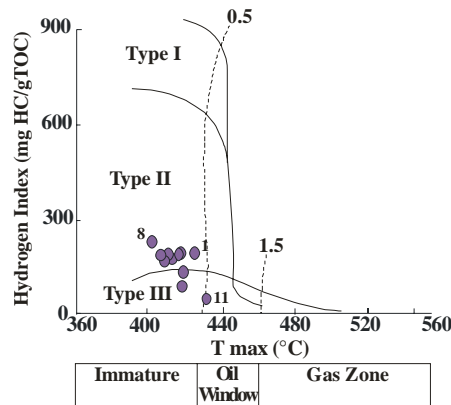


Fig. 4.25. Mina El Arenal, Manto 3. Tipos de kerógeno
 La muestra 8 tienen el mayor IH y la muestra 11 el más bajo (ver texto).
Mine El Arenal, Seam 3. Types of kerogen
Sample 8 has the highest HI is and sample 11 the lowest (see text).

Al comparar las figuras de S1 y carbono mineral para el manto 3 de las minas el Arenal y el Pontón, (Figs. 4.21 y 4.24) se observan semejanzas en el comportamiento de las muestras 4, 5 y 6 y 9, 10 y 11 de la mina el Arenal con las muestras 8, 9 y 10 y 13, 14 y 15 de la mina El Pontón.

4.5. PETROGRAFÍA

4.5.1. Implementación de las palinofacies en el estudio de los carbonos

La Tabla 4.1 es un resumen de las diferencias que existen entre el estudio de la materia orgánica con petrografía y con palinofacies. Es importante en el estudio de rocas fuentes de petróleo usar los dos métodos al mismo tiempo. La petrografía tradicional no es completamente eficiente para interpretar la calidad y madurez de la materia orgánica, (Bertrand, 1984; Collinson et al., 1994; Fleet and Scott, 1994; Powell and Boreham, 1994). Con el método de preparación de palinofacies implementado aquí (ver capítulo 3) es posible correlacionar macerales vistos en petrografía y los componentes vistos en palinofacies. Además, las diferencias que existen entre ellos, indica cuales macerales son fácilmente solubles en reactivos químicos. Para hallar la correlación entre los componentes en petrografía y palinofacies, se procesaron muestras enriquecidas en cada uno de los componentes. Además fue posible confirmar esto, no solamente por el conteo de cada componente en petrografía sino también en palinofacies.

<u>Palinofacies</u> (Enlargement 500x and 1000x)	<u>Petrography</u> (Enlargement 320x)
Thin section Particle size < 0.2 mm	Polished section Particle size > 0.2 mm
Specific identification of pollen, spores and cuticles => botanical affinities	No specific identification of pollen, spores and cuticles => no botanical affinities
Distinction of different types of resins or algae	Different types of resins or algae can't be distinguished
Fluorescence of all vitrinitic, liptinitic and some inertinitic constituents due to loss of humic acids	Fluorescence in vitrinite and some inertinites masked by humic acids
Loss of Bitumens, humic acids and some resinities and hydrogen-rich vitrinites	Exsudatinites and resinities are visible in vitrinites, but aren't when dispersed in liptinitic matrix
Part of liptodetrinites lost through filtration	All organic matter preserved, but difficulty differentiating when the liptinite components are high and mixed
Preserved liptinitics components (pollen, spores, cuticles, resins, algae) can be quantified more precisely because they are disperse	Liptinite content underestimated because many particles are intimately bound with vitrinite, the fluorescence which humic acids masks
Inert constituents clearly identified, because non fluorescent	Risk of classifying as inert some components whose fluorescence is masked
Precise paleoenvironmental interpretation, because all palynomorphs are visible	Paleoenvironmental interpretation less reliable because all constituents can not be properly differentiated.
The disappearance of some components such as resinite (oil) and vitrinite (rich in hydrogen), can be used as a parameter for evaluation oil generation potential	The use of greater magnification objectives and of high sensibility cameras are recommended so as to observe the true coal texture and components
In conclusion, to understand the coal's behavior as petroleum source rock, it is necessary to supplement the normal petrography study with that of palynofacies because of the need to verify the solubility of some components and typical associations.	

Tabla 4.1. Comparación entre los datos obtenidos de los estudios petrográficos y de palinofacies
Comparison between data obtained from petrographical and palynofacies studies.

En la tabla 4.2 se presentan las características más importantes que permiten correlacionar los macerales vistos en secciones pulidas con los componentes observados en las preparaciones para palinofacies, y en la figura 4.26 se pueden observar las imágenes de los macerales observados en secciones pulidas tanto en luz reflejada blanca como fluorescente y los correspondientes componentes observados en las preparaciones para palinofacies tanto en luz transmitida blanca y reflejada fluorescente.

La figura 4.26, muestra los diferentes componentes orgánicos en petrografía y palinofacies en luz blanca y fluorescente, los cuales no se deterioran durante la preparación con el método implementado, ya que es posible observar los colores de fluorescencia. La vitrinita correlaciona con: los tejidos amarillos delgados, las partículas irregulares formadas por otras partículas, tejidos muy bien preservados e irregulares con superficie rugosa; las liptodetrinitas con pequeñas partículas dispersas; la bituminita con materia orgánica amorfa de color rojizo, las esporinitas con granos de polen y esporas; los rosarios (resinitas-alginitas?) (asociaciones de pequeños cuerpos redondeados que tienen un color verdoso en luz reflejada normal, pero en luz fluorescente, estos tienen una alta intensidad de color amarillo verdosa. Ellos son comunes en los carbones Terciarios de Colombia, especialmente en la Formación Amagá. Estos se podrían generar de algas (esto todavía no se ha confirmado) con rosarios (resinas-algas?); cutinita con cutículas; la alginita con algas; la resinita con algunas resinas; algunas funginitas con esporas de hongos, (Fig. 4.26). La exsudatinita no tiene un equivalente en palinofacies porque el bitumen es removido durante el proceso de preparación de las palinofacies (Fig. 4.26). De la misma manera algunas "resinite oil" (Teichmuller, 1989) son solubles en los reactivos usados en la preparación de palinofacies. De otro lado las telinitas quedan prácticamente transparentes y es difícil de verlas en luz blanca, sólo si la muestra ha sido preparada con mucho cuidado se pueden preservar y se observan cuando se aprende a reconocerlas.

Petrography (polished sections)	Palynofacies (Slides)	
Component	Normal Light	Fluorescent Light
Telinite	Thin tissues transparent very preserved	Yellow to yellow orange
Collotelinite	Thin tissues of light yellow color	Yellow to yellow orange
Collodetrinite	There were formed by a matrix of light yellow color and in which surface it is observed particles of little sizes and different forms.	Matrix yellow to yellow orange and with particles with variable fluorescence inside
Corpogelinite	Rounded particles of matrix of light yellow color	Yellow to yellow orange
Liptodetrinites	Little particles scattered in the plate that vary in color from almost transparent to brown yellow	The fluorescence is variable between yellow green and yellow brown
Rosaries	Rounded particles with very light green color with high relief in individual or aggregated way.	Yellow green color and light yellow with high intensity
Cutinities	Tissues of different color from almost transparent to light brown.	Color with variable fluorescence between brown yellow and intense yellow
Sporinites	Normally, they are rounded and with oval shape. Their color varies from very light yellow to reddish yellow.	Variable color between brown yellow and intense yellow.
Bituminite	Amorphous mass with reddish yellow color and rough surface	Variable color between yellow and intense yellow
Resinite	Rounded bodies with yellow to brown yellow color with high relief	Strong color with yellow fluorescence
Alginite	Rounded bodies with reddish yellow color.	Strong color with yellow green to yellow fluorescence.
Funginite	Rounded bodies with dark brown to reddish brown color	Non fluorescent to a weak tonality brown red.

Table 4.2. Descripción de las palinofacies de los carbones y lutitas carbonosas de la Formación Amagá.
Palynofacies description of the coals and carbonaceous shales of Amagá Formation.

La solubilidad de las resinitas fue probada comparando lo observado en las secciones pulidas en luz reflejada fluorescente de la muestra original con una muestra la cual fue extraída con una mezcla benceno-metanol (en relación 6:4) durante 240 horas (Fig. 4.27). De la muestra extractada se hizo una sección pulida y se observó en luz reflejada fluorescente y se pudo ver que las resinitas desaparecieron completamente dejando únicamente los huecos, (Fig. 4.27). La vitrinita pierde mucha intensidad de fluorescencia. Por el contrario, la exsudatinita y los otros macerales liptiníticos (esporinita, cutinita, rosarios, etc.) continúan igual.

Una posible explicación para la pérdida de resinitas sería que éstas tienen una mayor solubilidad en los reactivos que se utilizan para la preparación de palinofacies y que esto podría ser una indicación del potencial de generación de las resinitas de carbones de bajo rango.

La muestra que tiene las mejores características como roca fuente tiene más “resinite oil” y esos componentes no aparecen en las palinofacies, indicando su temprana generación de aceite, tal como muchos autores lo han dicho, (Snowdon and Powell, 1982; Teichmuller, 1989; Collinson et al., 1994).

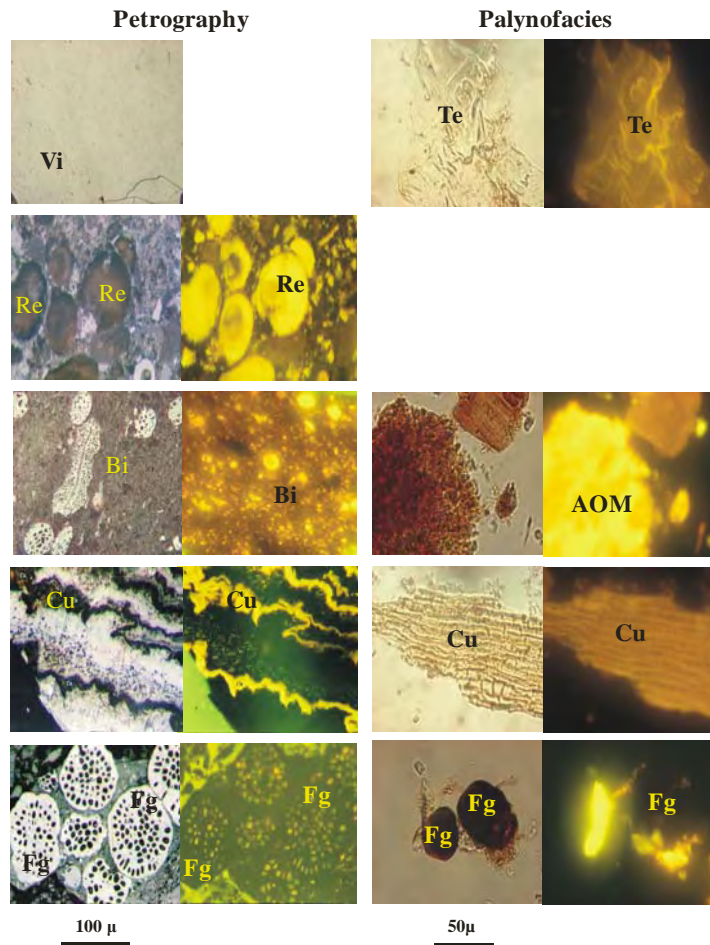


Fig. 4.26. A) Luz reflejada y fluorescente, inmersión en aceite; vitrinita, resinita oil, bituminita, cutinita, funginita.

B) Luz transmitida normal y fluorescente, objetivo seco. Tejidos amarillos delgados, resinas (desaparecen durante la preparación) materia orgánica amorfa cutículas, y hongos.

A) *Reflected normal and fluorescent lights, immersion oil; vitrinite, resinite, bituminite, cutinite and funginite.*

B) *Transmitted normal and fluorescent lights, dry objective; thin yellow tissues, resin, amorphous OM, cuticle and fungi.*

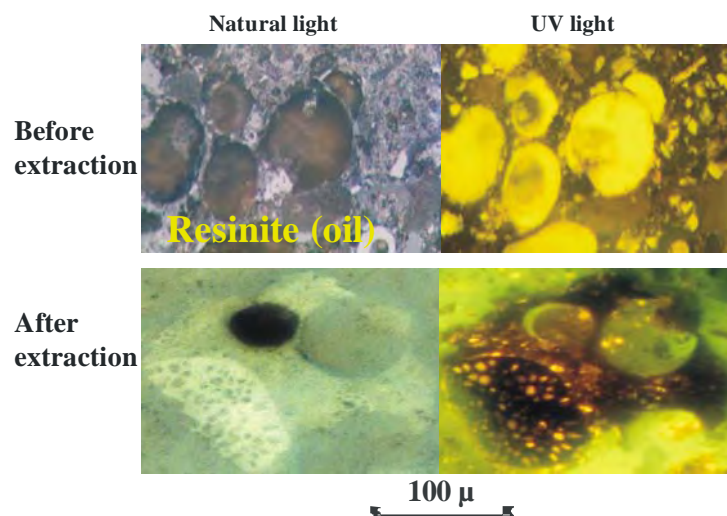


Fig. 4.27. Mina El Bloque, muestra 1 del manto 1. Imágenes de resinita oil antes y después de la extracción.
El Bloque Mine, Sample 1 of seam 1. Images of resinite oil before and after extraction

4.5.2. Mina El Bloque, (Fig. 4.28, 4.29 y Anexo A8)

Los datos petrográficos indican que las muestras de carbón son más ricas en vitrinita (>70% para la mayoría de las muestras) y liptinitas (> 18%) y pobres en inertinitas (<5% para la mayoría de las muestras).

M2 el Bloque presenta mayores contenidos de vitrinita y menores de liptinitas, mientras que las muestras de los mantos 1 y 3 presentan características muy similares y con contenidos de vitrinitas mucho menores que el manto dos y porcentajes de liptinitas mayores (Fig. 4.28). Los contenidos de inertinitas por lo general son bajos para los tres mantos, pero se destacan las muestras 1 y 4 de los mantos 1 y 3 respectivamente por presentar mayores contenidos de inertinitas.

Las Figuras 4.29 a, b y c muestran los resultados del conteo de macerales de cada uno de los plies y de cada manto de la mina El Bloque.

En el manto 1 los macerales vitriniticos están representados por colotelinita, colodetrinita, corpogelinita y telinita, la vitrodetrinita aparece en poca cantidad hacia la parte superior e inferior del manto y la corpogelinita es escasa en la parte inferior. Dentro de los macerales liptiníticos se tienen principalmente liptodetrinita, esporinita, y cutinita, pero hacia el techo del manto se observa incremento en el contenido de resinitas oil y de bituminita. Los macerales inertiníticos consisten de inertodetrinita y funginita, con un leve incremento hacia la parte superior del manto. De acuerdo a la presencia, o ausencia de un determinado maceral, y con la ayuda del análisis cluster el manto se puede dividir en las siguientes zonas:

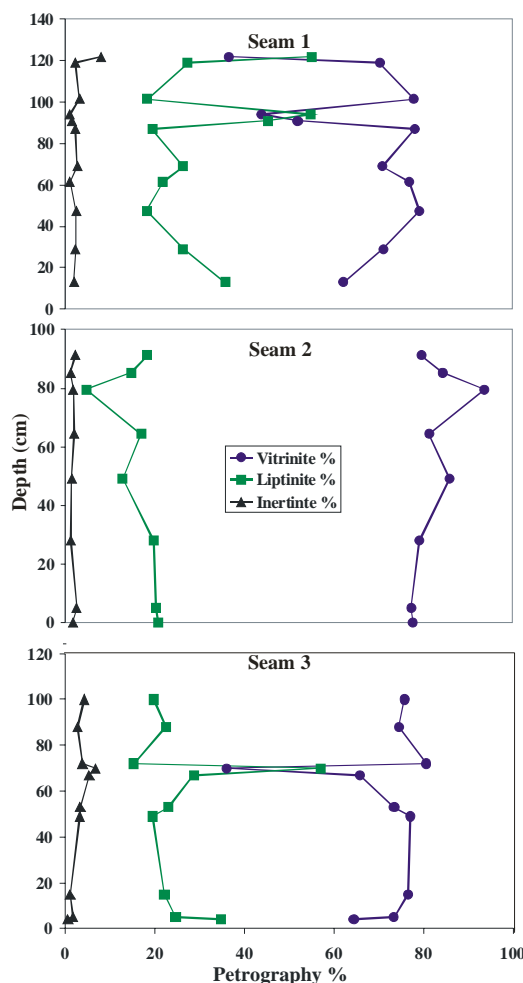


Fig. 4.28. Petrografía resumida de cada uno de los mantos de la mina El Bloque
Summary of petrographical data of seams in El Bloque Mine

- Zona I: Presencia de telinita, vitrodetrinita, resinita y bituminita en pocas cantidades
- Zona II: Abundancia de colodetrinita, corpogelinita, telinita y homogeneidad en los demás componentes.
- Zona III: Presencia de bituminita y exsudatinita, disminución de colotelinita y colodetrinita y muy poca telinita y presencia de corpogelinita.
- Zona IV: incremento del contenido de cutinitas y esporinitas en la parte inferior de la zona y comportamiento contrario en la parte superior.
- Zona V: Abundancia bituminita, liptodetrinita y resinita oil y disminución de colotelinita.

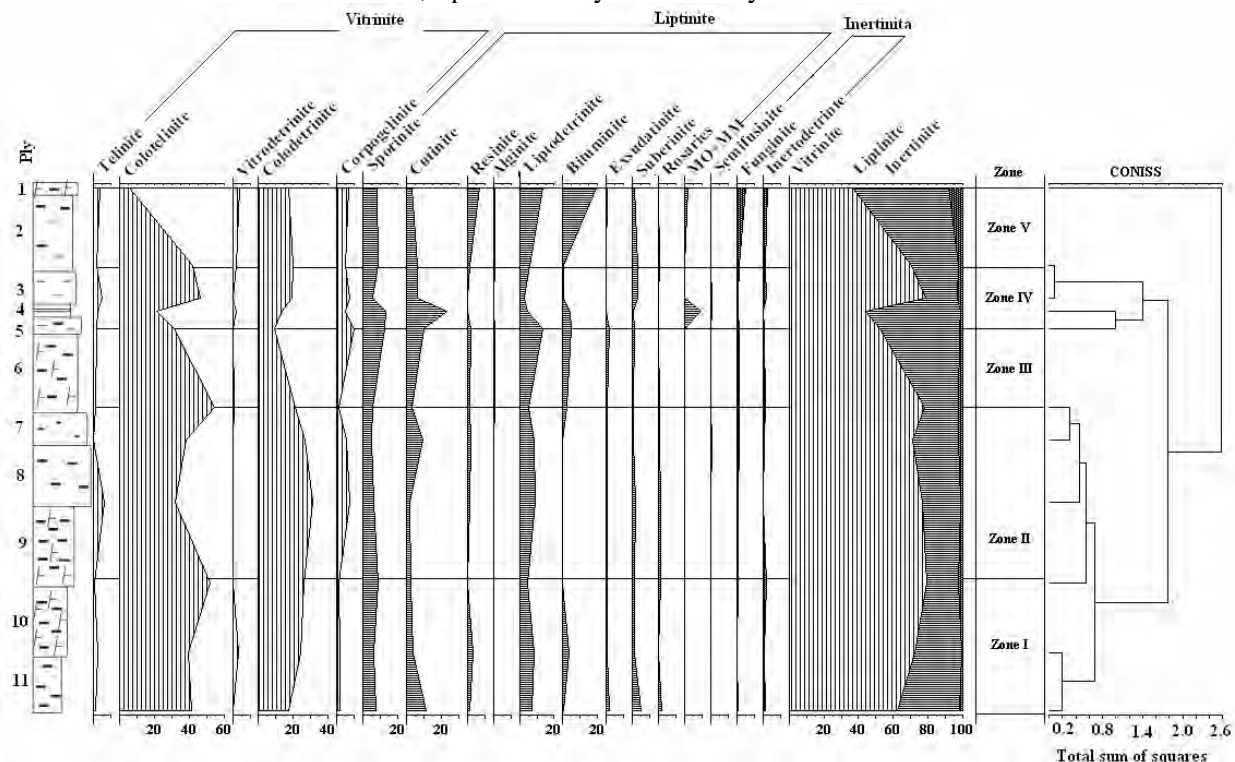


Fig. 4.29 a. Petrografía detallada de M1 de la mina El Bloque
Detailed petrography of seam 1 in El Bloque Mine

En el manto 2, los macerales vitriníticos más importantes son la colotelinita y la colodetrinita, los otros macerales aparecen en muy pocas proporciones. En los macerales liptiníticos se tienen esporinitas, rosarios, liptodetrinitas, cutinitas, y resinitas. Este manto presenta características diferentes a manto 1, ya que no se observa bituminita y los macerales liptiníticos aparecen en menor proporción y en las inertinitas solo se observan funginitas. De otro lado este manto es mucho más homogéneo, pero a pesar de eso también se puede dividir en las siguientes zonas:

- Zona I: Presencia de MO + MM, disminución de colodetrinitas aumento de colotelinitas hacia el techo de la zona.
- Zona II: Disminución de colotelinita y aumento de colodetrinita, hacia el techo de la zona.
- Zona III: homogeneidad en casi todos los componentes.
- Zona IV: Aumento de colotelinita, disminución y aumento de colodetrinita y aumento de rosarios.
- Zona V: Composición variable de colotelinita y colodetrinita.

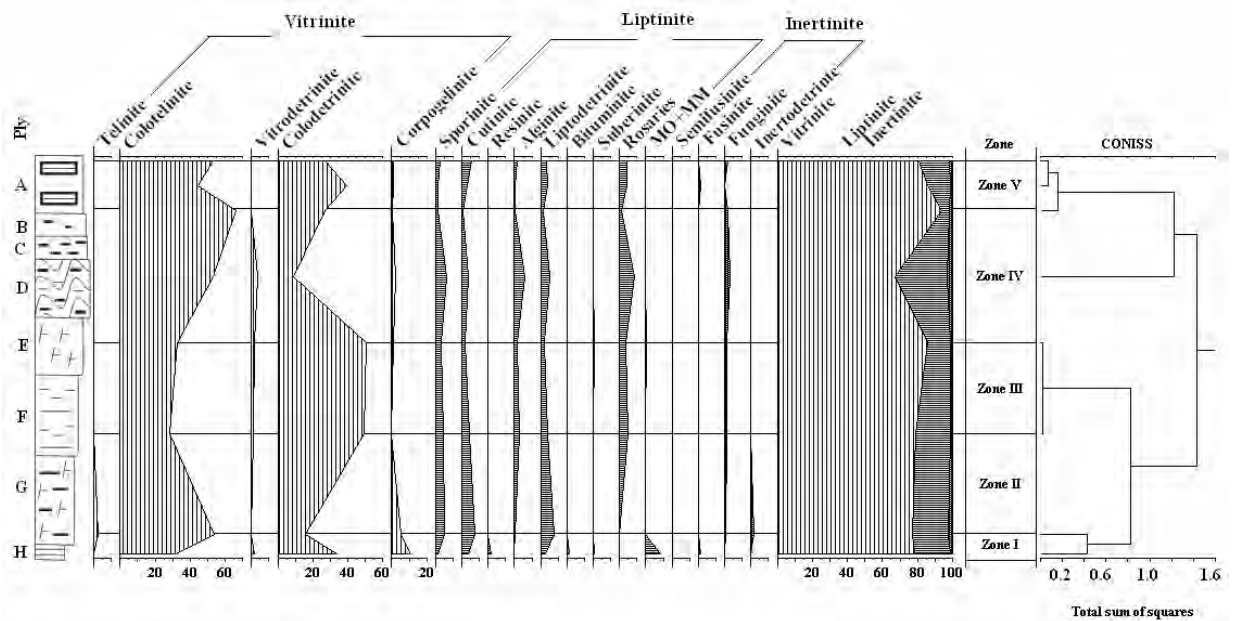


Fig. 4.29 b. Petrografía detallada de M2 de la mina El Bloque
Detailed petrography of seam 2 in El Bloque Mine

En el manto 3 las vitrinitas están representadas básicamente por colotelinitas y colodetrinitas, pero también se observa carpogelinita. En cuanto a los macerales liptiníticos, predominan las liptodetrinitas, esporininitas y cutininitas, aquí sobresale la muestra 4 por la disminución drástica en el contenido de vitrinitas y en el aumento de las liptininitas y en especial de la bitumininita y la esporininita. En las inertininitas se observa fungininita e inertodetrinita.

- Zona I: Presencia de telinita, vitrodetrinita, resinita y bitumininita en pocas cantidades
- Zona II: Abundancia de colodetrinita, carpogelinita y telinita y homogeneidad en los demás componentes.
- Zona III: Presencia de bitumininita y exsudatinita, disminución de colotelinita y colodetrinita y muy poca telinita y presencia de carpogelinita.
- Zona IV: incremento del contenido de cutininitas y esporininitas en la parte inferior de la zona y comportamiento contrario en la parte superior.
- Zona V: Abundancia bitumininita, liptodetrinita y resinita oil y disminución de colotelinita.

4.5.3 Mina Nechí (Fig. 4.30, 4.31 y Anexo A8)

El manto 1, se caracteriza porque varios plies de carbones tienen porcentajes de vitrinitas por debajo del 60% y de liptininitas por encima del 30%, mientras que las inertininitas no superan el 3%. En el manto 2, el contenido de vitrinitas en todos los plies de carbones está por encima del 69%, mientras que el de liptininitas es menor del 20% en la mayoría de las muestras y el de inertininitas no supera el 3.5%. La mayoría de las muestras del manto 3 tienen contenidos de vitrinita por encima del 75%, mientras que las liptininitas están por debajo del 26% y las inertininitas igualmente, no superan el 3%.

La Fig. 4.31 a, b y c, muestra los resultados del conteo detallado de los macerales de la mina Nechí.

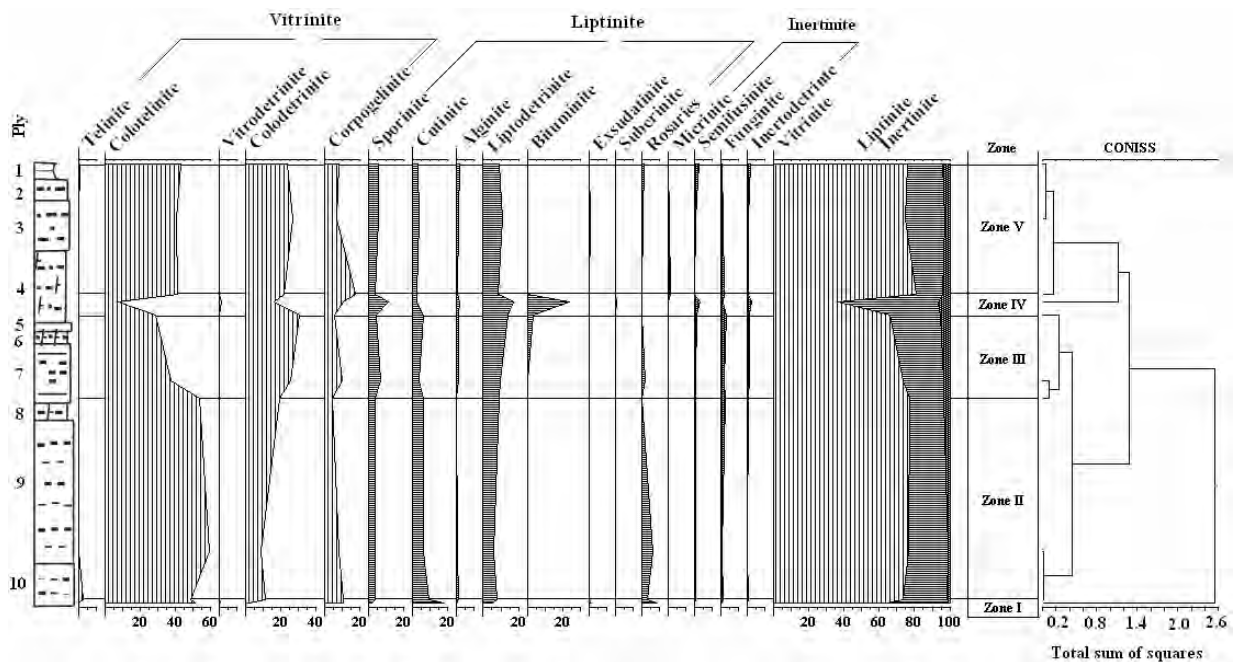


Fig. 4.29c. Petrografía detallada de m3 de la mina El Bloque
Detailed petrography of seam 3 in El Bloque Mine

En el manto 1 de la mina Nechi las vitrinitas corresponden a colotelinitas y colodetrinitas principalmente, pero también hay telinitas y corpogelinitas y las liptinitas están representadas por: esporinitas liptodetrinitas, y cutinitas, las inertinitas aparecen en muy poca cantidad. Se destaca que en este manto la bituminita aparece hacia la base del manto y el incremento de las liptinitas es hacia la base. Las zonas en que se divide este manto son las siguientes (Fig. 4.31 a):

- Zona I: Incremento en colotelinita y de colodetrinitas hacia el techo de la zona.
- Zona II: Presencia de bituminita y homogeneidad en la mayoría de los demás componentes.
- Zona III: Leve disminución de colodetrinita, aumento de colotelinita.
- Zona IV: Homogeneidad en casi todos los componentes.
- Zona V: Leve disminución de telinita y colotelinita y aumento de colodetrinita.

Los macerales vitríníficos predominantes en manto 2 nechi son la colotelinita y la colodetrinita, y en menor cantidad se tiene corpogelinita, y vitrodetrinita, los macerales liptíníficos son la esporinita y liptodetrinita, y en menor cantidad aparece la cutinita, pero en algunas zonas del manto se ve bituminita y MO + MM, las inertinitas son muy escasas. Este manto se puede dividir en las siguientes zonas, (Fig. 4.31 b):

- Zona I: Presencia de MO + MM disminución en corpogelinita, colodetrinitas y liptodetrinita hacia la base de la zona.
- Zona II: Disminución de colotelinita y corpogelinita y aumento de colodetrinita y homogeneidad en los demás componentes.
- Zona III: Disminución de colotelinita, y corpogelinita y aumento de colodetrinita presencia de bituminita y de rosarios pero en poca cantidad.
- Zona IV: Disminución de colodetrinita hacia el techo de la zona y homogeneidad en los demás componentes.
- Zona V: Abundancia de MO + MM, bituminita y esporinita y disminución drástica de colodetrinita, presencia de vitrodetrinita.
- Zona VI: Comportamiento variable en casi todos los componentes.

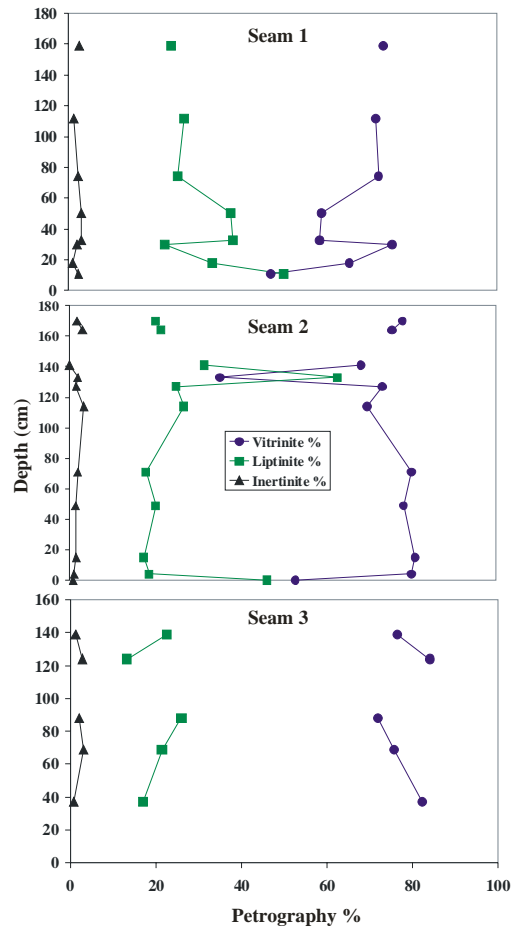
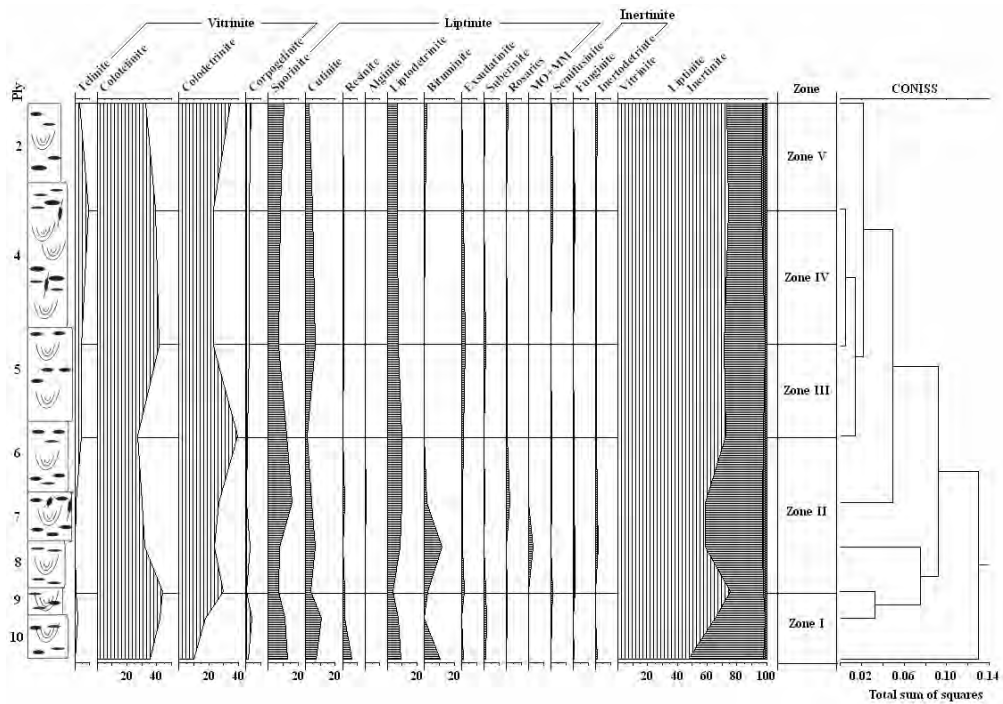


Fig. 4.30. Petrografía resumida de cada uno de los mantos de la mina Nechi
Summary of petrographical data of seams in Nechi Mine



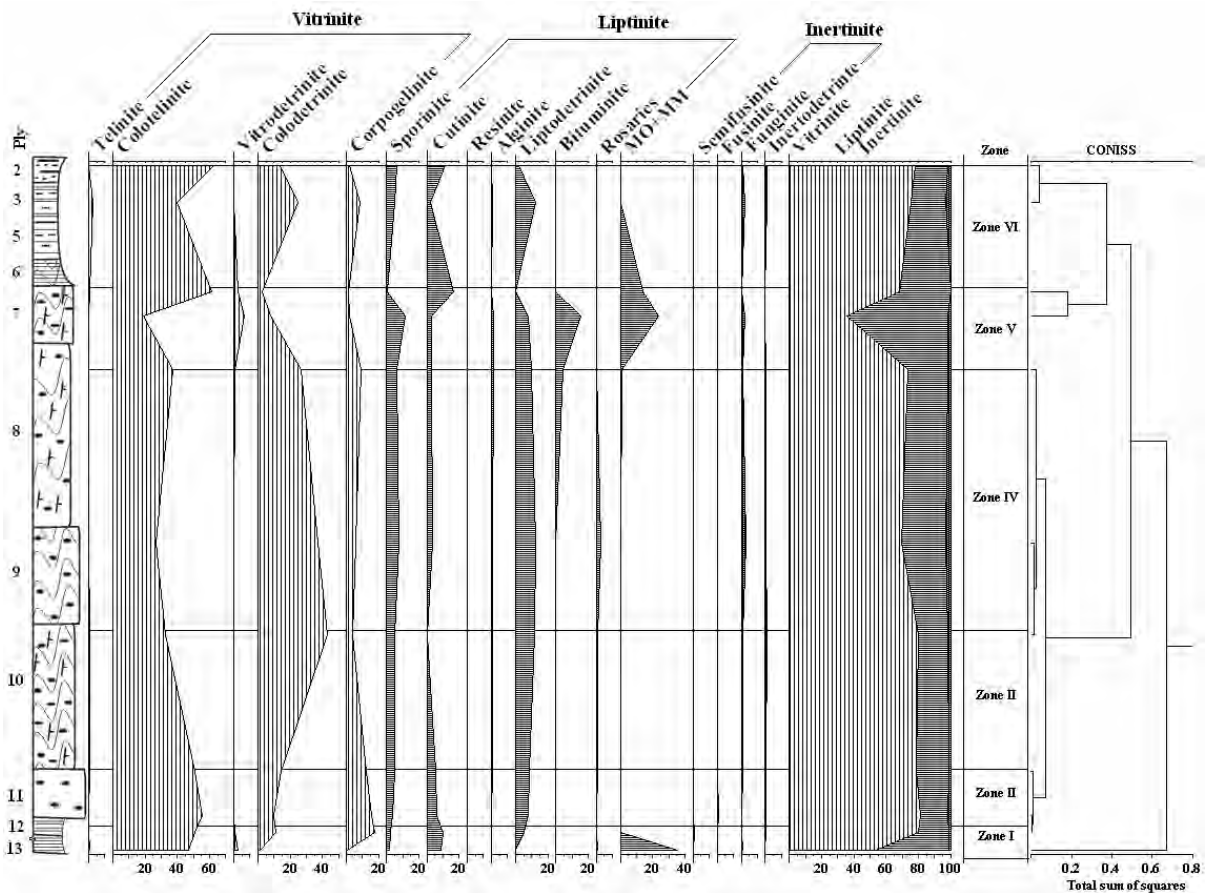


Fig. 4.31 b. Petrografía detallada de M2 de la mina Nechi
Detailed petrography of seam 2 in Nechi Mine

M3 Nechí es muy homogéneo, aquí los macerales vitriniticos están representados por colotelinita, colodetrinita y corpogelinita, dentro de las liptinitas se tienen básicamente liptodetrinitas, esporininitas y cutininitas, las inertininitas corresponden a fungininitas e inertodetrinitas. En este caso la homogeneidad se puede deber al poco número de muestras analizadas debido a que varias de ellas corresponden a lutitas cuya materia orgánica esta íntimamente ligada con la matriz mineral y por lo tanto en estos casos el conteo maceral no es representativo ni significativo, por esta razón no se hizo. Sin embargo a grandes rasgos el manto se puede dividir en las siguientes zonas, (Fig. 4.31 c):

- Zona I: Disminución del contenido de colotelinitas y leve aumento de colodetrinitas hacia el techo de la zona.
- Zona II: Presencia de bitumininita y comportamiento homogéneo en el resto de componentes.
- Zona III: Leve disminución de colodetrinita, y aumento de esporininita.

De lo anterior se puede decir que en general los plies de carbones de la mina Nechi son ricos en vitrinitas, dentro de las cuales las más abundantes son la colotelinitas seguidas por las colodetrinitas, luego aparecen las liptinitas, cuyos macerales predominantes son las liptodetrinitas, esporininitas, cutininitas, resininitas etc. y por último en una cantidad muy baja se encuentran las inertininitas, las cuales están representadas por fungininitas.

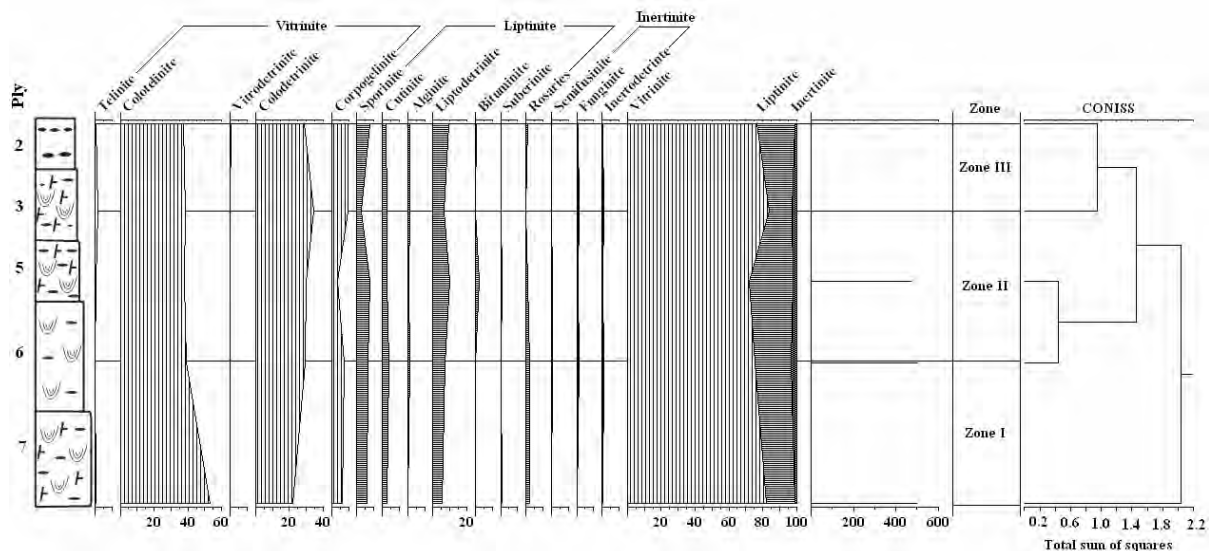


Fig. 4.31 c. Petrografía detallada de M3 de la mina Nechi
Detailed petrography of seam 3 in Nechi Mine

4.5.4. Mina El Pontón (Fig. 4.32, 4.33 y Anexo A8)

En los carbones, el maceral predominante es la vitrinita, la cual aparece con más del 69%, seguido por las liptinitas con más del 15% en la mayoría de las muestras, excepto en la muestra 4 donde el porcentaje es inferior al 1%. Por último, las inertinitas que por lo general están por debajo del 4.5%.

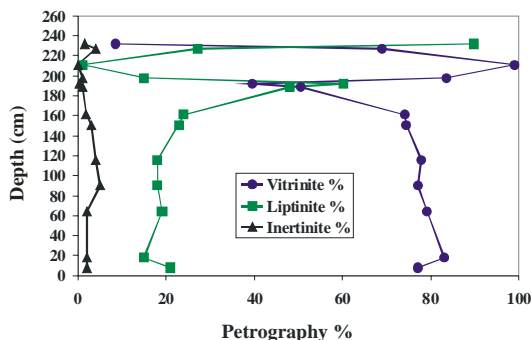


Fig. 4.32. Petrografía resumida del manto 3 de la mina El Pontón
Summary of petrographical data of seam 3 in El Pontón Mine

En la figura 4.33 se puede ver la gran variación por la presencia de intercalaciones de lutita. Dentro de los macerales vitriníticos predomina la telinita y colotelinita en las muestras 3, 4 y 5 que corresponden a la parte superior del manto, y la colotelinita y colodetrinita en los plies de la parte inferior del manto, plies 8 – 14. Se observa incremento de telinita y corpogelinita hacia el techo del manto. En cuanto a las liptinitas, la parte de techo se diferencia por el incremento en el contenido de esporinitas y bituminita.

En la parte superior se destaca la muestra 3 porque presenta el mayor porcentaje de bituminita y MO + MM, a su vez que el mayor porcentaje de cenizas y azufre 21.5 y 6.78% respectivamente. Y con respecto a los macerales inertiníticos, el predominante es la funginita, y la muestra que presenta el mayor porcentaje es la 3.

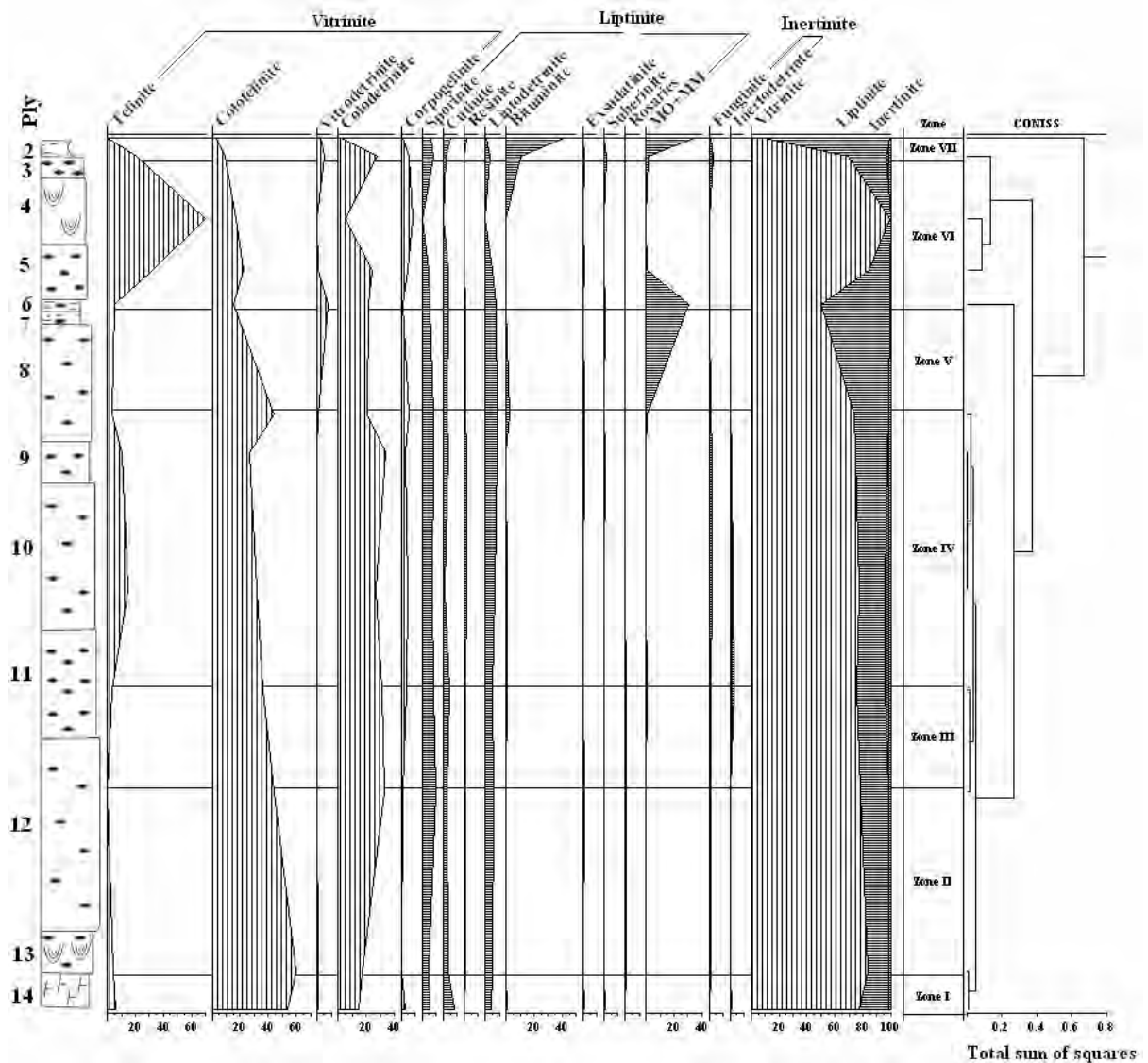


Fig. 4.33. Petrografía detallada de m3 de la mina El Pontón
Detailed petrography of seam 3 in El Ponton Mine

El manto se puede dividir en las siguientes zonas, (Fig. 4.33):

- Zona I: Leve incremento en esporinitas y cutinitas hacia la base de la zona y disminución de colotelinita y colodetrinita.
- Zona II: Disminución de colotelinita y aumento de colodetrinita hacia el techo de la zona y homogeneidad en los demás componentes.
- Zona III: Disminución de colotelinita, bajo contenido de telinita.
- Zona IV: Presencia de telinita y comportamiento variable de la colotelinita y colodetrinita.
- Zona V: Abundancia de MO + MM, presencia de vitrodetrinita y poca telinita.
- Zona VI: Abundancia de telinita, disminución de colotelinita.
- Zona VII: Predominio de bituminita y MO + MM.

4.5.5. Mina El Arenal (Fig. 4.34, 4.35 y Anexo A8)

El contenido de vitrinita varía entre 71 y 89%, el de liptinitas entre 11 y 28% y el de inertinitas esta por debajo del 2%. El maceral vitrinitico más importante es la colotelinita, seguida por la colodetrinita.

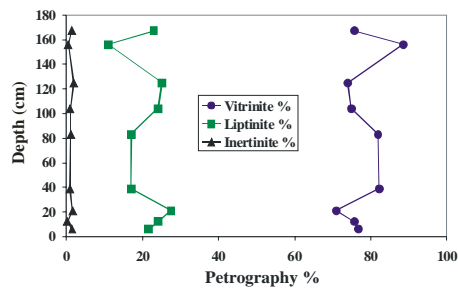


Fig. 4.34. Petrografía resumida del manto 3 de la mina El Arenal
Summary of petrographical data of seam 3 in El Arenal Mine

Los macerales vitríníficos principales son la colotelinita y la colodetrinita, pero también se observa telinita y corpogelinita hacia el techo del manto. Las liptinitas corresponden a liptodetrinitas, esporinitas y cutinitas, con algunas zonas con incremento en pocas cantidades de otros componentes, las inertinitas son muy escasas en este manto. De acuerdo al análisis cluster se puede dividir en las siguientes zonas:

- Zona I: Incremento hacia la base de la zona de cutinitas, corpogelinitas y colotelinita, disminución de colodetrinita y presencia de suberinita, exsudatinita y MO + MM.
- Zona II: Incremento hacia el techo de la zona de colotelinita y homogeneidad en los demás componentes.
- Zona III: Disminución de colotelinita, incremento en colodetrinita y homogeneidad en los demás componentes.
- Zona IV: Disminución de colodetrinita y telinita.
- Zona V: Abundancia de telinita, disminución de colotelinita y colodetrinita.
- Zona VI: Disminución de telinita, presencia de vitrodetrinita y MO + MM.

Este manto es más homogéneo verticalmente comparado que los demás mantos analizados.

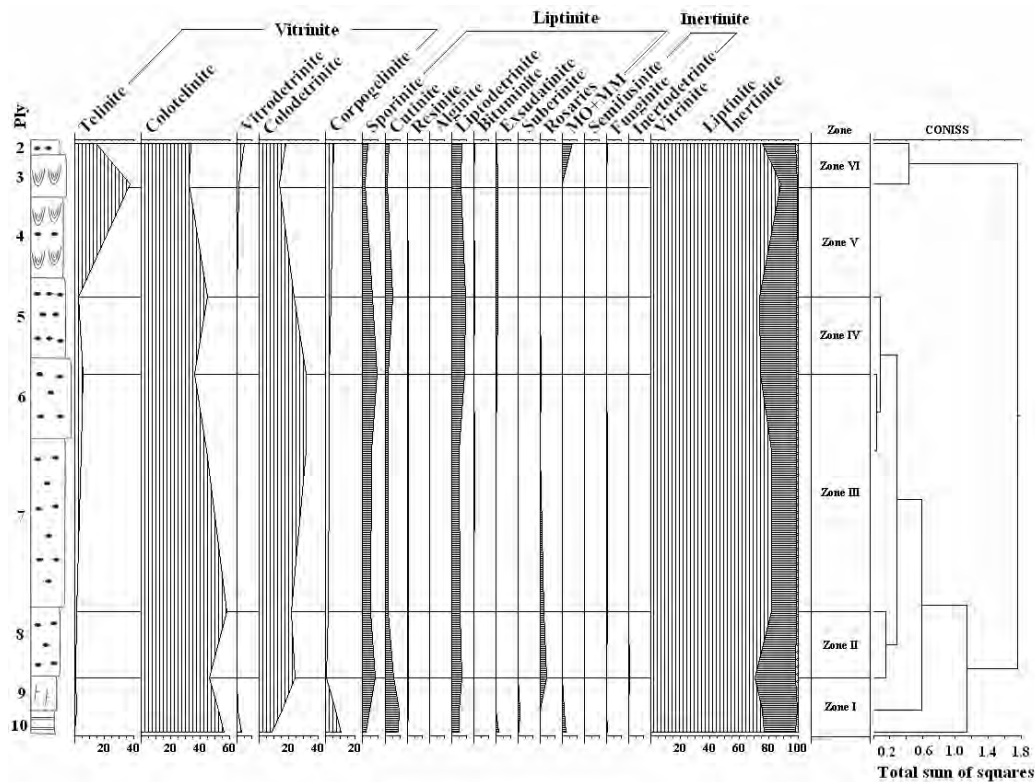


Fig. 4.35. Petrografía detallada de m3 de la mina El Arenal
Detailed petrography of seam 3 in El Arenal Mine

4.6. PALINOFACIES

4.6.1. Mina El Bloque (Fig. 4.36, 4.37 y Anexo A9)

Los análisis de palinofacies presentan la misma tendencia de los datos petrográficos, así por ejemplo, para los mantos 1 y 3 los tejidos vitriníticos son los más altos (>60 para la mayoría de las muestras), los componentes liptiníticos están en segundo lugar (>20%) y los componentes inertiníticos continúan siendo bajos (< 8%), pero en este caso, las muestras que en petrografía presentan alto contenido de inertinita (plies 1 y 4 de los mantos 1 y 3 respectivamente) en palinofacies, éstas son las más bajas. Y para el manto 2, los tejidos vitriníticos son los más altos (>75 para la mayoría de las muestras), los componentes liptiníticos están en segundo lugar (<25%) y los componentes inertiníticos continúan siendo bajos (<8%). Confirmando de esta manera la semejanza entre los mantos 1 y 3 y la diferencia de éstos con el manto 2.

En el manto 1 El Bloque, los componentes vitriníticos están representados por tejidos delgados tejidos bien preservados, partículas irregulares formadas por otras partículas, partículas irregulares de superficie rugosa, y partículas irregulares transparentes, hacia la base del manto se observa el predominio de tejidos delgados. Dentro de los componentes liptiníticos se tiene los esporomorfos y en los componentes inertiníticos esporas e hifas de hongos. Se destaca en la parte superior del manto por la abundancia de materia orgánica amorfa y en la base la presencia de rosarios, también se observa que las lutitas son más ricas en cutinitas y *Retitricolporites irregularis*.

En cuanto a los componentes inertiníticos se nota la ausencia hacia el techo y el predominio de esporas de hongos en la parte central del manto. De acuerdo a las variaciones que presentan los distintos componentes se pueden diferenciar 8 zonas así (Fig. 4.37 a):

- Zona I: Abundancia de tejidos delgados de color amarillo y de rosarios.
- Zona II: Terminación de los granos de *Ciclusphaera*, *Spirosyncolpites* y esporas verrugadas e incremento de tejidos bien preservados.
- Zona III: Homogenización de las partículas irregulares formadas por otras partículas y ausencia de *Ciclusphaera*.
- Zona IV: Incremento en los tejidos bien preservados y en los granos de *Ciclusphaera*.
- Zona V: Abundancia de partículas irregulares transparentes, granos de *Ciclusphaera*, y microreticulados tricolporados y disminución de irregulares formadas por otras partículas.
- Zona VI: Incremento en partículas irregulares de superficie rugosa y tejidos bien preservados y disminución en partículas irregulares formadas por otras partículas y en tejidos delgados de color amarillo.
- Zona VII: Presencia de rosarios y disminución de tejidos bien preservados y tejidos delgados de color amarillo
- Zona VIII: Predominio de materia orgánica amorfa y la disminución de las partículas irregulares formadas por otras partículas y de tejidos delgados de color amarillo.

En el manto 3 los componentes vitriníticos consisten de partículas irregulares de la mitad del manto hacia arriba. Las partículas irregulares tienen zonas de incremento de la base hacia la parte media del manto y disminuye desde las intercalaciones hacia el techo del manto. El manto se dividió en las siguientes zonas (Fig. 4.37 b):

- Zona I: Disminución de partículas irregulares formadas por otras partículas, tejidos delgados de color amarillo, tejidos bien preservados y rosarios.
- Zona II: Disminución de rosarios, tejidos bien preservados y aumento de partículas irregulares formadas por otras partículas.
- Zona III: Disminución drástica de tejidos bien preservados, presencia de MOA.

- Zona IV: Incremento importante de materia orgánica amorfa y de los granos de *Ciclusphaera* y *Spirosyncolpites spiralis*.
- Zona V: Incremento de tejidos delgados amarillos y disminución de tejidos bien preservados y de las partículas irregulares formadas por otras partículas.
- Zona VI: Incremento en granos de polen psilados plegados y rosarios.

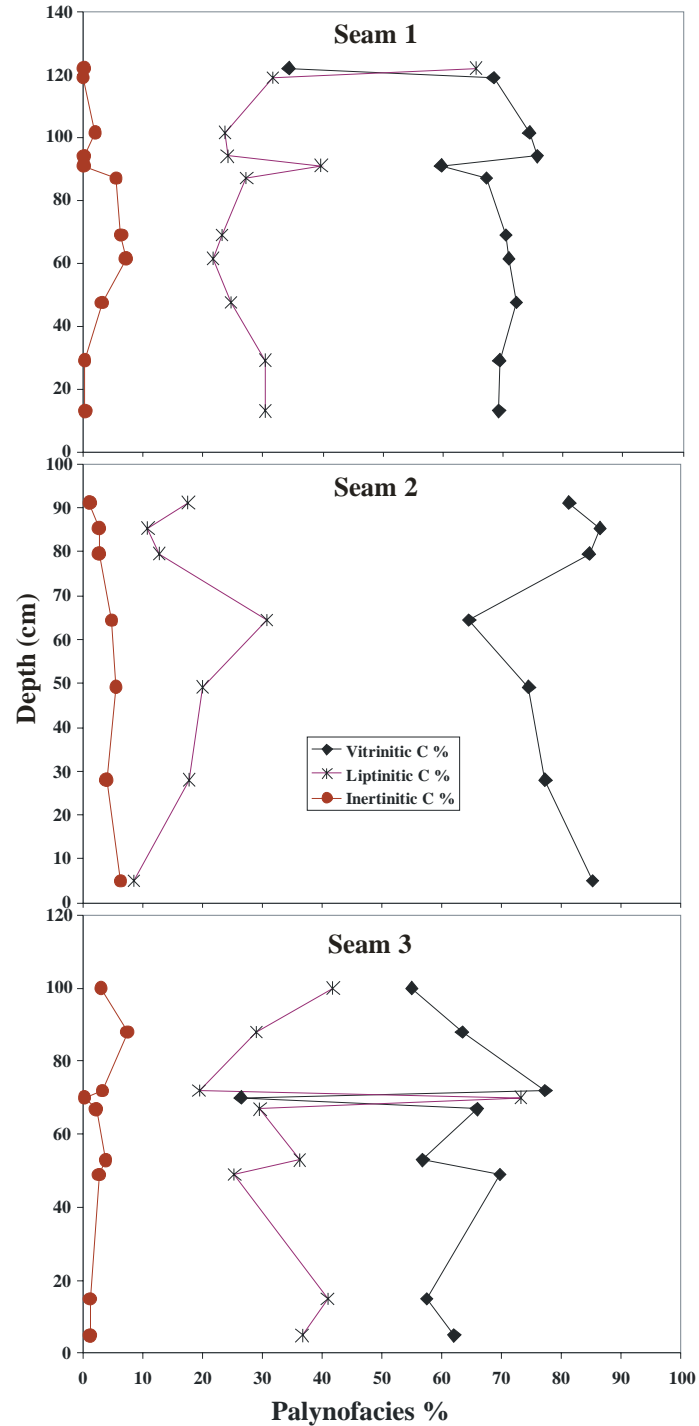


Fig. 4.36. Palinofacies resumida de cada uno de los mantos de la mina El Bloque
Summary of palynofacies in El Bloque Mine seams (C = Constituents)

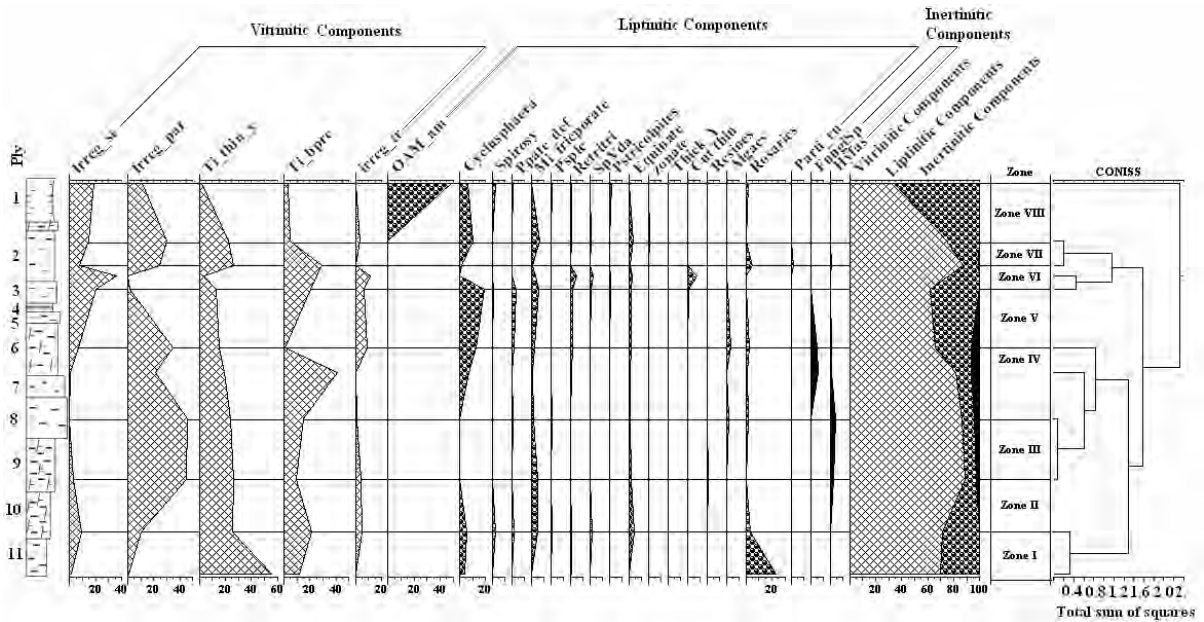


Fig. 4.37a. Distribución de las palinofacies de m1 de la mina El Bloque
Palynofacies distribution in seam 1 in El Bloque Mine

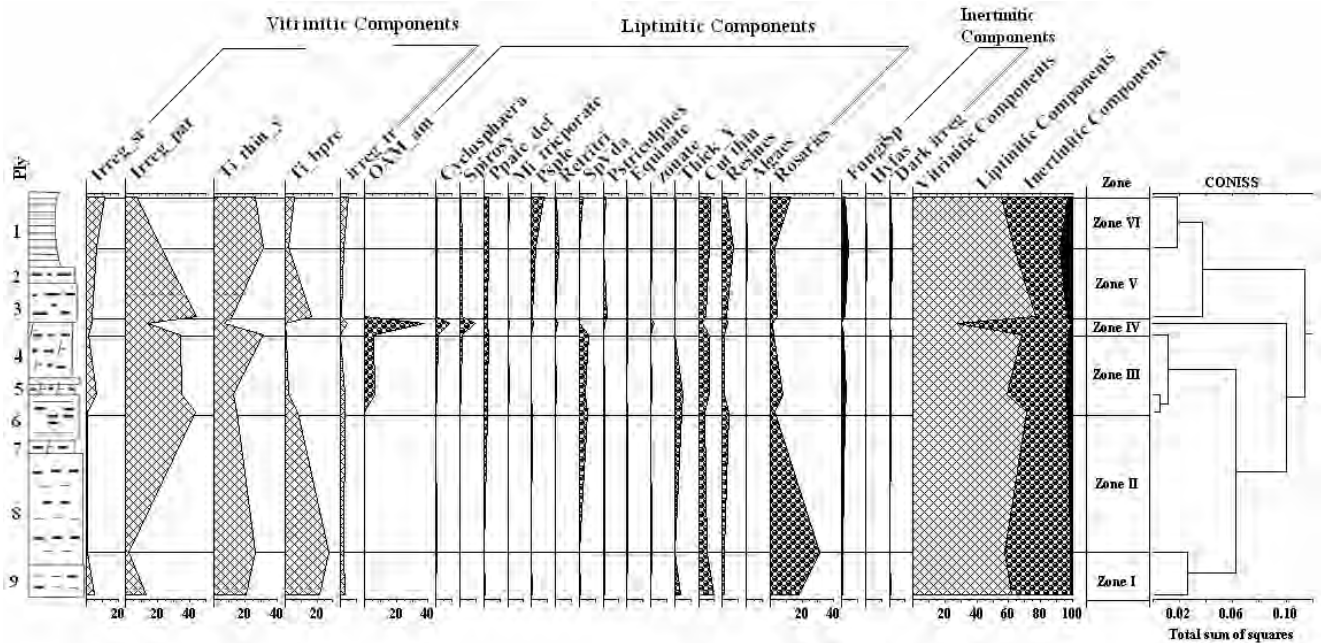


Fig. 4.37 b. Distribución de las palinofacies de M3 de la mina El Bloque
Palynofacies distribution in seam 3 in El Bloque Mine

4.6.2. Mina Nechi (Fig. 4.38, 4.39 y Anexo A9)

En la mina Nechi el manto 3 en las muestras de carbón tienen características más homogéneas que los mantos 1 y 2. En el manto 3 de la mina Nechi, se observa una tendencia de aumento del contenido de componentes liptiníticos de la base hacia la parte media del manto y luego disminuye hacia el techo. El manto 2 presenta una variación vertical menor, y en el manto 1 se observa lo contrario al manto 3 o sea que el contenido de componentes liptiníticos disminuye hacia la parte media del manto y aumenta hacia el techo del manto.

En general los contenidos de componentes liptiníticos varían en la mayoría de las muestras entre 20 y 40% y el de componentes vitriníticos varían entre 60 y 90%, se destacan varias muestras de la

base del manto 1, por presentar valores mayores de 40% de componentes liptiníticos y menores de 60% de componentes vitriníticos. El manto 3 es el que presenta menores porcentajes de componentes inertiníticos, pero en general para los otros mantos es inferior al 8%.

En M1 Nechi los componentes vitriníticos que predominan son los tejidos bien preservados, mientras que los otros componentes aparecen más o menos homogéneos a lo largo del manto. Dentro de los componentes liptiníticos se observan principalmente rosarios, materia orgánica amorfa y cutículas delgadas, los componentes inertiníticos están representados por funginitas.

Las zonas que se encontraron se diferencian así (Fig. 4.39 a):

- Zona I: Presencia de algas, granos de polen equinados, aumento de partículas irregulares transparentes y pocas partículas irregulares de superficie rugosa en comparación con el resto del manto.
- Zona II: Aumento drástico de tejidos bien preservados y disminución de materia orgánica amorfa.
- Zona III: Aumento gradual de tejidos bien preservados, terminación de la aparición de materia orgánica amorfa.
- Zona IV: Incremento de tejidos bien preservados, terminación de la aparición de granos de polen policolpados deformados y de otros granos.
- Zona V: Disminución de tejidos bien preservados
- Zona VI: Sigue la disminución de los tejidos bien preservados pero aumentan las partículas irregulares formadas por otras partículas.

Para el manto 2 Nechi, los componentes vitriníticos están representados principalmente por tejidos delgados de color amarillo y tejidos bien preservados, pero las partículas irregulares transparentes son importantes en algunos plies. Dentro de los componentes liptiníticos se tienen cutículas delgadas y granos de polen no clasificados. En este manto abundan hacia el techo unas partículas delgadas en formas de estrellas que se clasificaron como algas. Las zonas diferenciadas son las siguientes: (Fig. 4.39b).

- Zona I. Incremento de cutículas delgadas y MOA
- Zona II: Incremento de partículas irregulares de superficie rugosa, tejidos delgados amarillos y tejidos bien preservados.
- Zona III. Comportamiento homogéneo de la mayoría de los componentes.
- Zona IV. Presencia de esporas verrugadas y granos de polen psilatricolporites zonado
- Zona V. Incremento de otros granos de polen, aumento de partículas irregulares transparentes y disminución de tejidos bien preservados.
- Zona VI: Abundancia de partículas como estrellas que se denominaron algas y disminución de partículas irregulares transparentes.

En el manto 3 Nechi los componentes vitriníticos que se observan en la mayoría de los plies son los tejidos bien preservados y los tejidos delgados amarillos, pero se tiene incremento de tejidos delgados hacia el techo del manto y los irregulares transparentes hacia la base. Dentro de los componentes liptiníticos se tiene materia orgánica amorfa hacia el techo del manto y rosarios hacia la base, pero también hay cutículas delgadas. Los esporomorfos son escasos en comparación con los otros mantos. Las zonas se caracterizan así (Fig. 4.38 c):

- Zona I: Abundancia de partículas irregulares transparentes y disminución de tejidos bien preservados.
- Zona II: Disminución de partículas irregulares transparentes y aumento de tejidos bien preservados.
- Zona III: Abundancia de rosarios, y comportamiento homogéneo en el resto de los componentes.
- Zona IV: Disminución de tejidos delgados amarillos e incremento de materia orgánica amorfa
- Zona V: Máximo pico de tejidos delgados de color amarillo y mínimo de tejidos bien preservados.

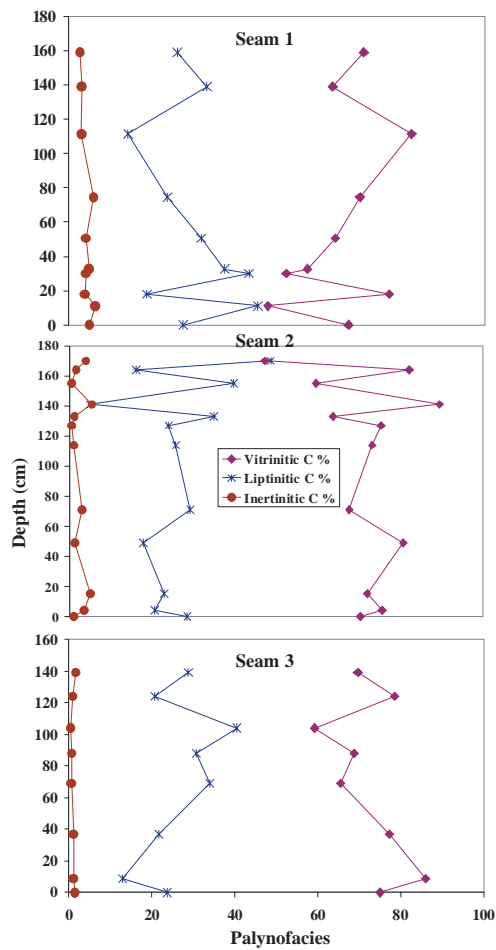


Fig. 4.38. Palinofacies resumida de cada uno de los mantos de la mina Nechi
Summary of petrography in each seam of Nechi Mine

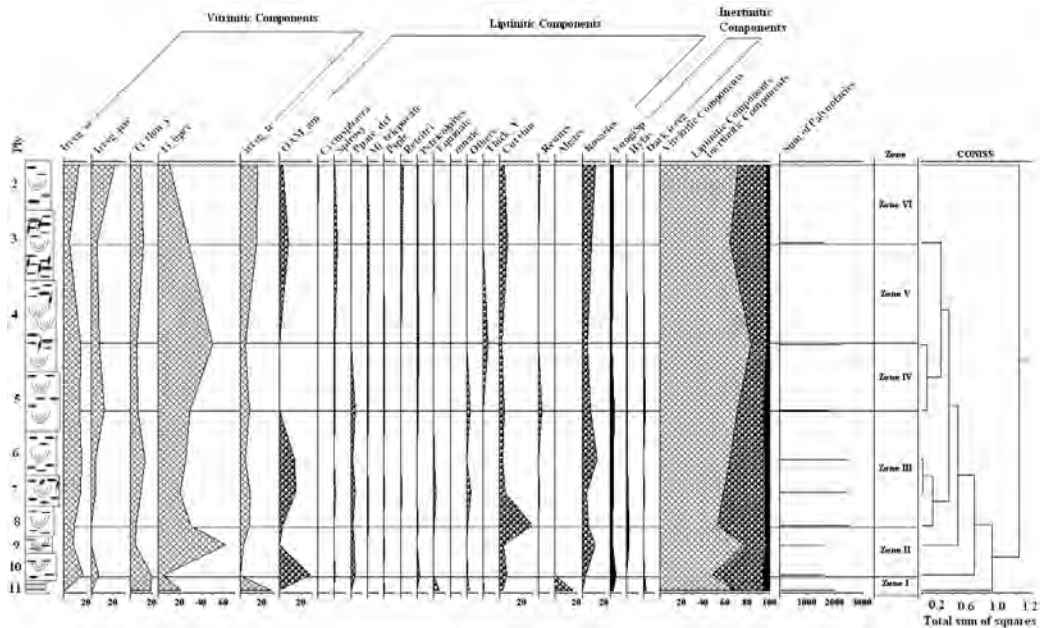


Fig. 4.39a. Distribución de las palinofacies de M1 de la mina Nechi
Palynofacies distribution in seam 1 of Nechi Mine

4.6.3. Mina El Pontón (Fig. 4.40, 4.41 y Anexo A9)

Se observa una tendencia de incremento del contenido de componentes liptiníticos de la base hacia el techo del manto y de igual manera una disminución del contenido de componentes vitriníticos, los componentes inertiníticos son variables, pero aparecen en poca cantidad hacia el techo y la base del manto, se destacan el ply 4 por ser extremadamente rico en componentes vitriníticos y muy pobre en componentes liptiníticos y el ply 2 por presentar las características totalmente opuestas o sea muy alto en componentes liptiníticos y muy pobre en componentes vitriníticos.

En los carbones, el componente maceral predominante son los tejidos vitriníticos, los cuales aparecen con más del 60%, seguido por los componentes liptiníticos con más del 15% en la mayoría de las muestras, excepto en la muestra 4 donde el porcentaje es inferior al 2%. Por último, los componentes inertiníticos que por lo general presentan comportamientos muy diversos, ya que se tienen muestras con porcentajes muy bajos (0.6% ply 3) y muestras con porcentajes mayores del 16% (ply 11).

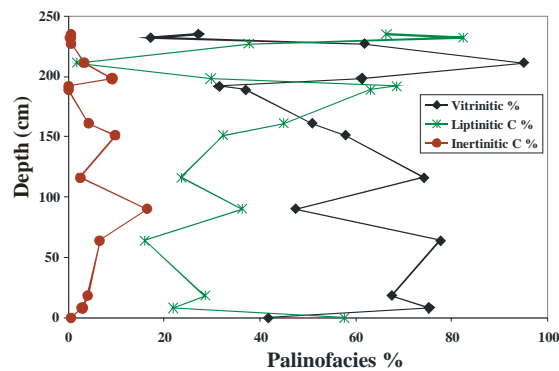


Fig. 4.40. Palinofacias resumida de cada uno de los plies de M3 de la mina El Pontón
Summary of palynofacies in each ply of seam 3 in El Ponton Mine

En el manto 3 El Pontón se presenta gran variabilidad vertical de los componentes, así los componentes vitriníticos que predominan son los tejidos bien preservados, seguidos por los tejidos delgados amarillos y los irregulares formados por otras partículas, dentro de los componentes liptiníticos aparecen con mayor frecuencia las cutículas delgadas y los granos de polen no identificados y dentro de las inertinitas se tienen las esporas de hongos y la muestra que presenta el mayor porcentaje es la 11. Se destaca la escasez de esporas de hongos en las muestras correspondientes a la intercalación del manto de carbón plies 6 y 7. Este manto se dividió en las siguientes zonas (Fig. 4.41):

- Zona I: Abundancia de cutículas delgadas
- Zona II: Pocas partículas irregulares formados por otras partículas, y abundancia de rosarios
- Zona III: Presencia de MOA, *Ciclusphaera*, *Spirosyncolpites spiralis*, *Retitricolporites irregularis*, resinas y esporas de hongos.
- Zona IV: Pocos granos de polen, disminución de tejidos delgados
- Zona V: Abundancia de cutículas delgadas, *ciclusphaera* y *spirosyncolpites spiralis*.
- Zona VI: Incremento drástico de cutículas delgadas
- Zona VII: Incremento drástico de tejidos bien preservados
- Zona VIII: Disminución de tejidos bien preservados, MOA, aumento de partículas irregulares de superficie rugosa.
- Zona IX. Aumento de MOA, partículas irregulares de superficie rugosa, granos de polen *Ciclusphaera* y *Spirosyncolpites spiralis* y disminución de tejidos bien preservados.

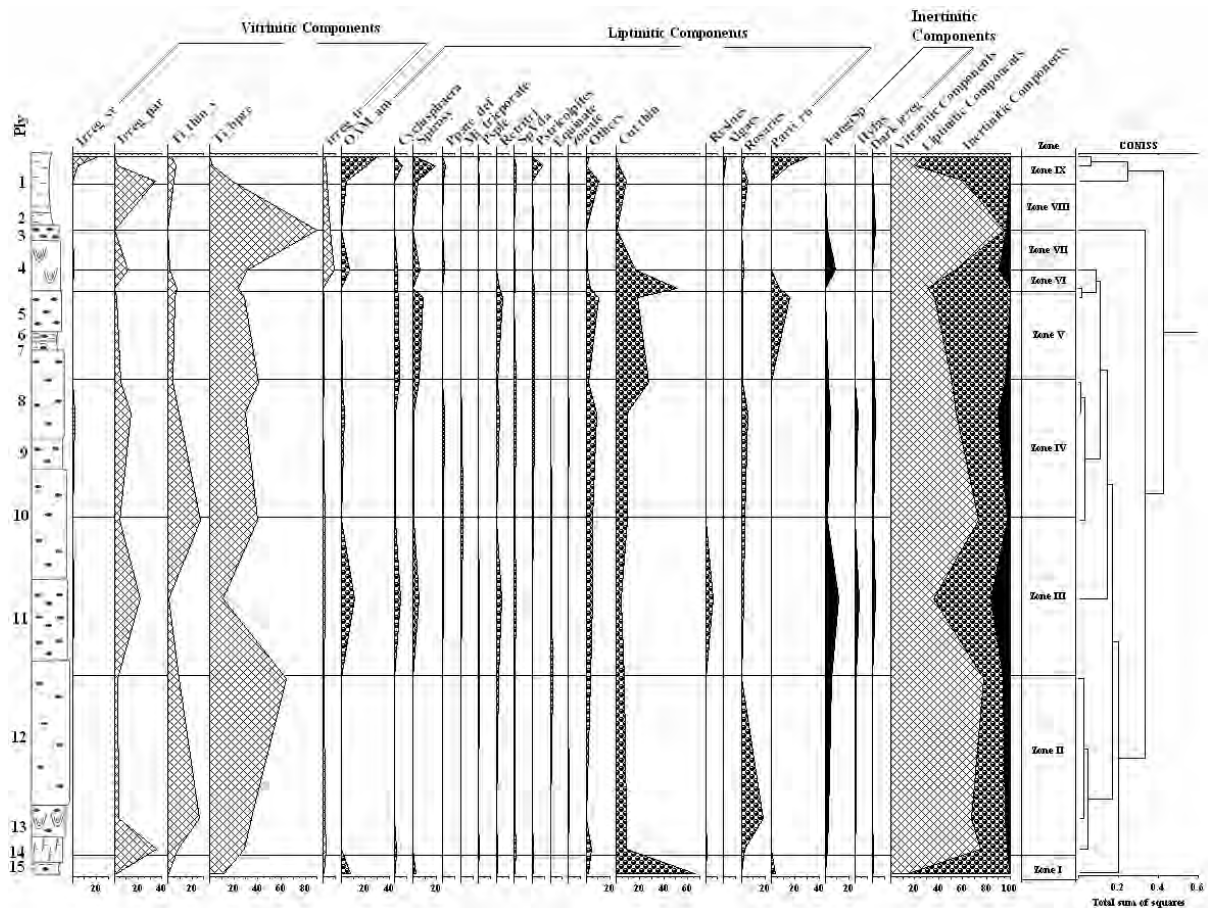


Fig. 4.41. Distribución de las palinofacias de M3 de la mina El Pontón
Palynofacies distribution in seam 3 of El Ponton Mine

4.7. ESPOROMORFOS

4.7.1. Introducción

Aquí se identificaron los granos de polen y esporas mas comunes, los menos frecuentes y que no se encontró afinidad con otros granos previamente clasificados en la literatura se agruparon bajo la similitud de los conocidos, y para facilidad de interpretación se agruparon en angiospermas dicotiledóneas, angiospermas monocotiledóneas (palmas) y helechos (Fig 4.42).

El conteo se hizo sistemáticamente de todos los granos que aparecían en una placa, ya que para la mayoría de las muestras fue suficiente, ya que se pudieron contar más de 200 granos. En algunas lutitas pobres en esporomorfos fue necesario utilizar dos placas.

Para la identificación y descripción se hizo en las imágenes tomadas de cada uno de los granos luego de observar cuidadosamente los distintos granos presentes de tal modo que si era conveniente repetir el conteo se pudiera hacer.

4.7.2. Mina El Bloque (Fig. 4.43 y Anexo A10)

Para M1 de la mina El Bloque predominan las angiospermas con una variación en los plies de carbones de 65.1 – 90.5, seguida por las palmas con una variación de 8 – 28.9% y por último los helechos los cuales varían entre 0.5 – 11.6%. En las tres lutitas (plies 4, 11 y 12) se notan los menores porcentajes de angiospermas (<55%) y el mayor porcentaje de palmas. Los helechos se presentan en proporciones variables.

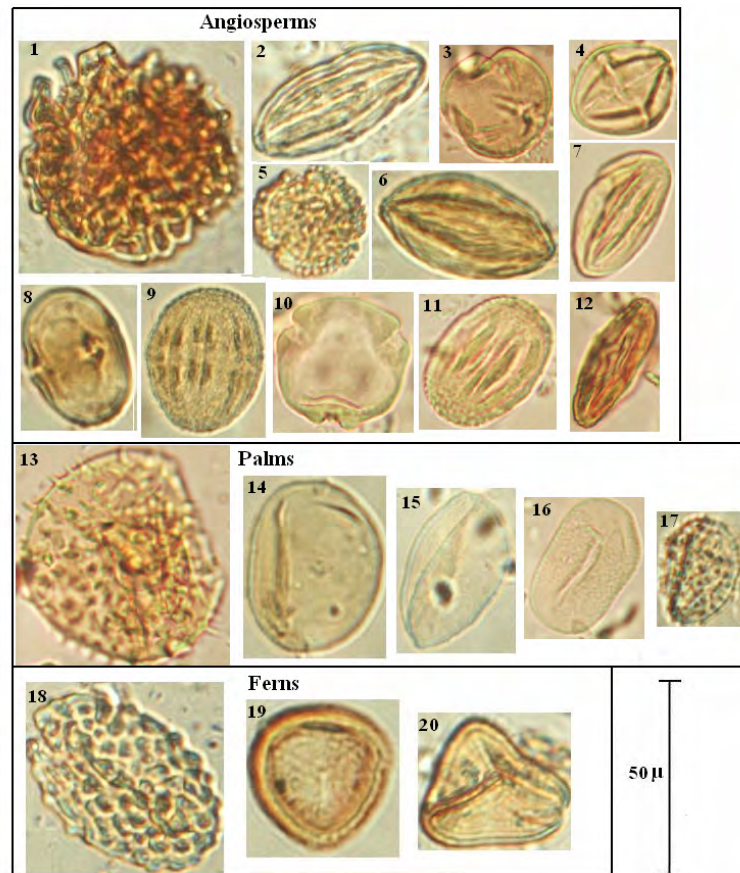


Fig. 4.42. Agrupación en angiospermas, palmas y helechos de los esporomorfos estudiados
Most common angiosperm and palm pollen and fern spores in the seams studied.

En muchas de las muestras de este manto predomina el *Retitricolporites irregularis*, seguido por el psilado tricolporado de diferentes formas y tamaños, luego en importancia se tiene el psilado tricolporado y en algunas muestras se observa el microreticulado tricolporado. La muestra de lutita (ply 4) es muy rica en granos de polen psilados monocolpados y la muestra del ply 11 predominan las esporas vurrugadas y los psilados monocolpados. El ply 1 se diferencia de los demás porque tiene predominio de *ciclusphaera* y *spirosyncolpites*. En la parte superior del manto, (plies 1, 2, 3 y 4) se observa mayor contenido de psilados tricolporados, mientras que en la parte inferior (plies 7, 8, 9, 10 y 11) predominan los microreticulados tricolporados.

En el manto 2 de la mina El Bloque las angiospermas son las predominantes con una variación de 58 a 88% seguido por las palmas 6.7 – 32% y por último los helechos los cuales varían entre 2.9 – 13.7. En varias de las muestras de M2 El Bloque predominan los granos de polen psilados tricolporados, pero también son importantes los psilados monocolpados, luego aparecen los microreticulados tricolporados. En este manto se destacan los plies D y E por los más altos contenidos de granos policolpados deformados.

En el manto 3 de la mina El Bloque existen plies de carbón con porcentajes de angiospermas bajos con respecto a los otros mantos de carbón de esta mina, ya que varían entre 47 y 94%. Las palmas igualmente son mayores a los otros mantos, pues varían entre 1.3 y 50% y los helechos presentan variaciones entre 2.6 y 21.7%.

De los tres mantos, este último es el que presenta la mayor variación, pues se tienen los mayores y los menores porcentajes en las angiospermas, en las palmas y en los helechos. Al comparar los esporomorfos de los tres mantos de la mina el Bloque se puede ver que M3 presenta una mayor variación mientras que M2 es mucho más homogéneo. En general las angiospermas predominan

con respecto a las palmas y los helechos. Lo importante a tener en cuenta en estos mantos es que las muestras 1 y 4 de los mantos 1 y 3 respectivamente, se caracteriza por presentar altos contenidos de granos de polen de angiospermas, bajo de palmas y mínimo de helechos. Dichas muestras son las que presentan el mejor potencial de HC.

En las figuras 4.44 a, b y c, aparecen los resultados del conteo de cada uno de los plies de los tres mantos de la mina El Bloque. En manto 1 El Bloque, los esporomorfos más comunes son el *Retitricolporites Irregularis*, psilado tricolporado, microreticulado tricolporado, psilado policolpado, psilado tricolpado, espora verrugada, equinado y psilado monocolpado. Las zonas se definen así (Fig. 4.45 a):

- Zona I: Abundancia de policolpado deformado y esporas verrugadas
- Zona II: Presencia de *Psilatricolporites zonado*
- Zona III: Disminución de *Retitricolporites irregularis* y aumento de Psilados tricolporados
- Zona IV: Presencia de *spirosyncolpites* y microreticulados policolporados
- Zona V: Abundancia de psilados monocolpados
- Zona VI: Homogénea
- Zona VII: Abundancia de *Ciclusphaera* y *Spirosyncolpites spiralis*

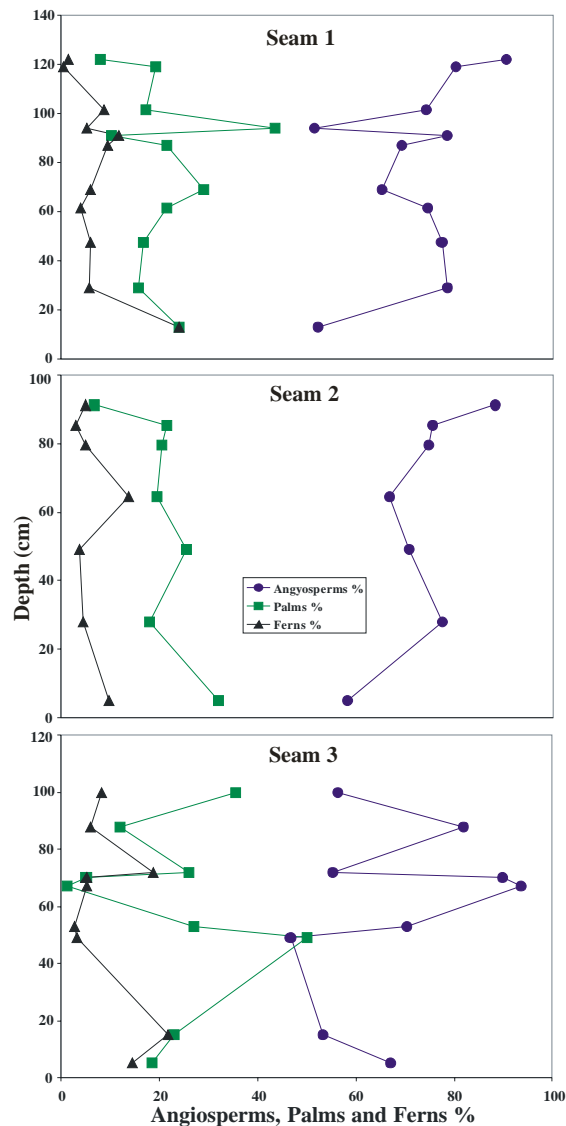


Fig. 4.43. Resumen de los esporomorfos de los tres mantos de la mina El Bloque
Summary of sporomorphs in the three seams of El Bloque Mine

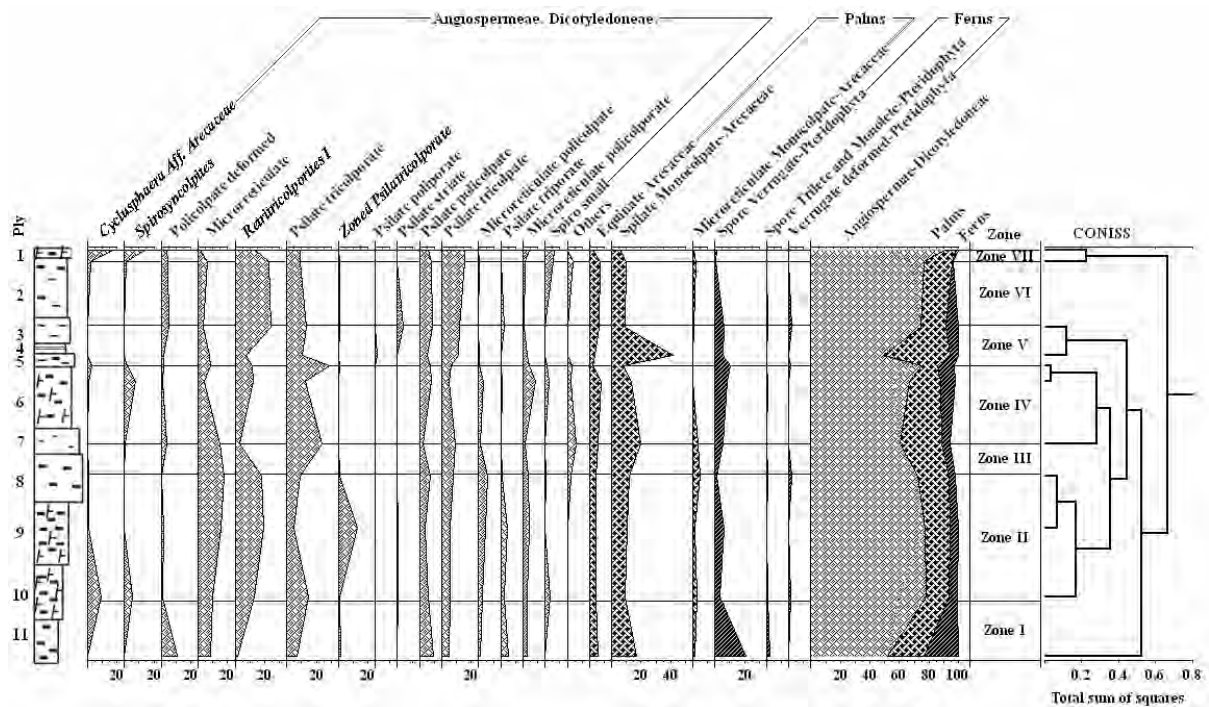


Fig. 4.44a. Distribución de esporomorfos de M1 de la mina El Bloque
Sporomorph distribution in seam 1 of El Bloque Mine

Manto 2 el Bloque, se caracteriza por la abundancia de psilados tricolporados, psilados monocolpados, microreticulados tricolporados, policolpados deformados, retitricolporites irregularis, psilados tricolporados, microreticulados policolpados equinados. Este manto se puede dividir en las siguientes zonas, (Fig. 4.44b).

- Zona I: No aparece el psilado poliporado
- Zona II: Disminuyen los granos psilados policolpados y psilados triporados
- Zona III: Aparece psilatricolporado y verrugado deformado
- Zona IV: Aparecen los granos tricolporados verrugados y desaparecen los microreticulados policolporado y verrugados deformados
- Zona V: Aumento de los microreticulados y los equinados

El manto 3 se caracteriza por la mayor abundancia de policolporados deformados, psilados tricolporados, psilados monocolpados y microreticulados. En este manto es posible dividir las zonas así (Fig. 4.44c):

- Zona I: Abundancia de policolpado deformado
- Zona II: Incremento de psilados monocolpados
- Zona III: Incremento de policolpado deformado y disminución de psilados monocolpados
- Zona IV: Abundancia de *ciclusphaera* y *spirosyncolpites spiralis*
- Zona V: Disminución de *spirosyncolpites* e incremento de psilado tricolporado.
- Zona VI: Abundancia de psilados monocolpados y disminución de psilados tricolporados.

Para M3 El Bloque, a excepción de la muestra 1 y 7 que presentan altos contenidos de granos de polen psilados monocolpados, las demás muestras en general presentan altos contenidos de granos de polen policolpados deformados, los psilados tricolporados, varían desde altos a bajos contenidos y en varias muestras se tienen altos contenidos de *ciclusphaera* y *spirosyncolpites*, pero es especialmente importante en la muestra 4. Las muestras 8 y 9 aparte de tener altos contenidos de policolpados deformados, en segundo lugar aparecen los granos de polen psilados monocolpados y a su vez se tienen en tercer lugar los verrugados deformados (anexo).

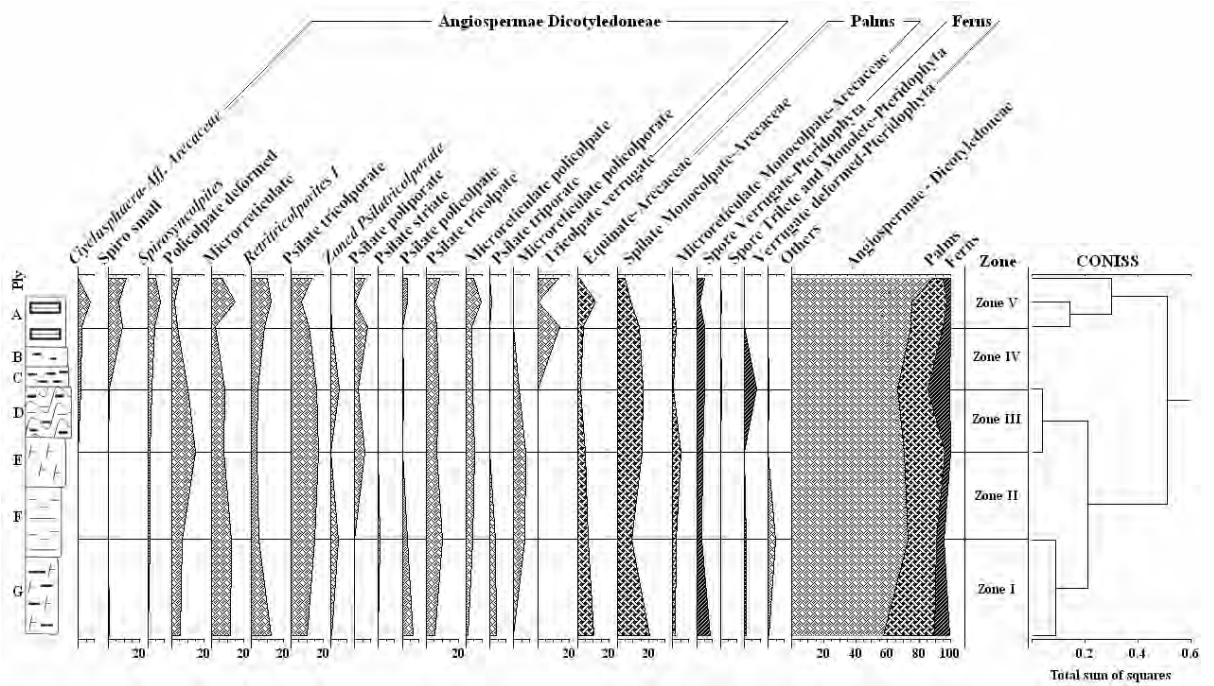


Fig. 4.44b. Distribución de esporomorfos de M2 de la mina El Bloque
Sporomorph distribution in seam 2 of El Bloque Mine

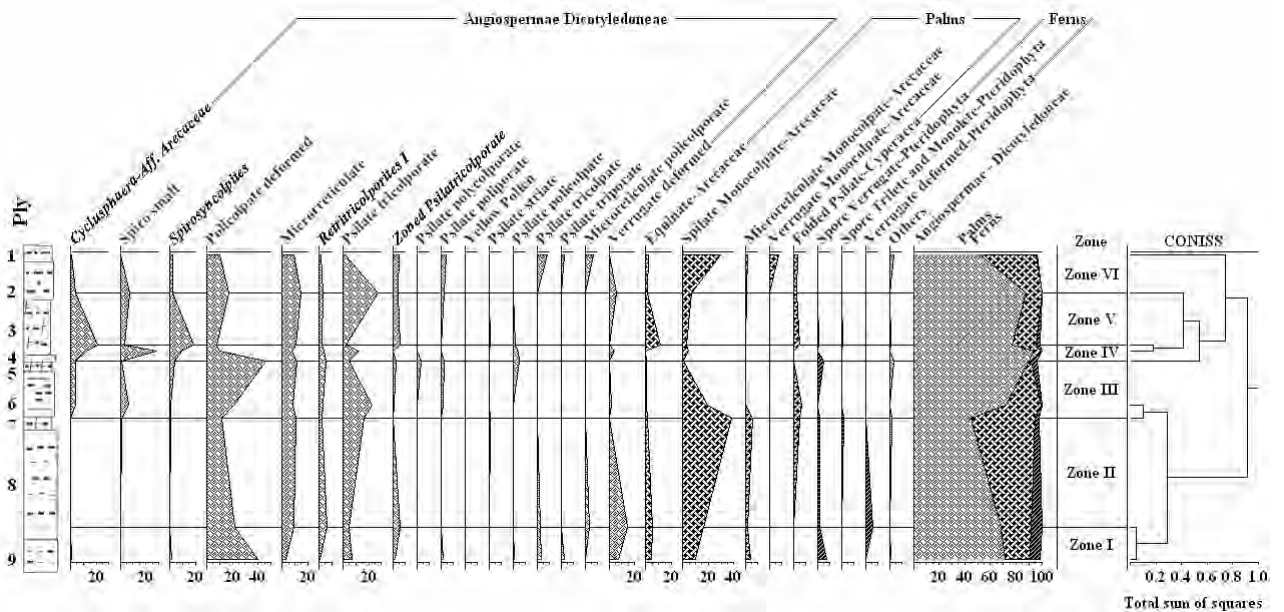


Fig. 4.44c. Distribución de esporomorfos de M3 de la mina El Bloque
Sporomorph distribution in seam 3 of El Bloque Mine

4.7.3. Mina Nechi (Fig. 4.45, 4.46 y Anexo A10)

Para M1 de la mina Nechi predominan las angiospermas con una variación de 71-93% seguido por las palmas con una variación de 5 – 24% y por último los helechos con una variación de 2 a 18%. En este manto, la muestra 10 es la que presenta el menor porcentaje de angiospermas (71%), mientras que la muestra 7 es la que presenta el mayor porcentaje (93%). En cuanto a los helechos, la mayoría de las muestras tienen menos del 8% de helechos y estos se hacen mayores del 12% en las muestras 9 y 10.

El contenido de palmas es variable a lo largo del manto, de tal modo que se tienen dos máximos (en la base y cerca del techo) y dos mínimos cerca de la base y en techo del manto y por lo general la mayoría de las muestras tienen menos del 20% de palmas.

En la mayoría de las muestras de M1 Nechi, predominan los granos de polen psilados tricolporados y en segundo lugar se tienen los granos de polen microreticulados tricolporados y en tercer lugar está el *retitricolporites irregularis*. En los plies 3, 4, 5 y 10 se tiene en segundo lugar de importancia los psilados monocolpados. En este manto la *Ciclusphaera* y el *Spirosyncolpites* son escasos. En ninguna de las muestras predominan los granos de polen de palmas ni de esporas de helechos.

En el manto 2 de la mina Nechí la variación en las angiospermas para los plies de carbón es de 65 – 90.4, las palmas varían entre, 1.1 y 10.5, mientras que los helechos aparecen entre 7.2 y 31.4.

Por el contrario las lutitas de este manto presentan contenidos de angiospermas que varían entre 20 y 52%, las palmas varían entre 29.8 y 66.3 y los helechos varían entre 1.8 -15.8.

M2 Nechi exceptuando la muestra 1, las lutitas tienen porcentajes de angiospermas menor que los carbones, de igual manera los contenidos de palmas y helechos son mayores; se destaca la muestra 5 con el menor porcentaje de angiospermas y el mayor de palmas, los helechos siguen siendo variables.

En la mayoría de las muestras de lutita de M2 Nechi predominan los granos de polen de palmas y en los carbones predominan los granos psilados tricolporados. En los plies 10 y 11 son abundantes los microreticulados tricolporados, pero a su vez las muestras 11 y 13 son abundantes los granos de polen equinados. En las muestras 7, 8, 9 y 10 predominan el *retitricolporites irregularis* con respecto a las demás muestras. En los plies 3, 4, 5, 6 y 7 también son importantes los psilados tricolporados. Se destaca la lutita de la base (ply 13) por la abundancia de esporas verrugadas.

En el M3 de la mina Nechí por lo general se observa un porcentaje importante en las angiospermas (42-77) y en las palmas (18-49%) y un porcentaje bajo de helechos (<10%).

En las tres primeras muestras de M3 Nechi predominan los granos de polen psilados monocolpados, luego se tiene la muestra 4 en donde predominan la *ciclusphaera* y los granos policolpados deformados, pero también hay psilados monocolpados y en las muestras de la parte inferior del manto predominan los psilados tricolporados y los microreticulados tricolporados y en las lutitas de la base del manto predominan los psilados monocolpados y los psilados tricolporados.

Las muestras de carbón de M3 Nechí se caracterizan porque en general presentan menores porcentajes de angiospermas y mayores de palmas que los dos mantos anteriores; además no se observan diferencias tan marcadas en los plies.

En resumen, en la mina Nechí, M3 es el más homogéneo, mientras que el M2 es el más heterogéneo, de igual manera el M2 se destaca por la abundancia de helechos con respecto a las palmas y el M3 presenta mayor porcentaje de palmas que de helechos.

En el manto 1, los esporomorfos predominantes son el psilado tricolporado, el microreticulado policolporado, el *Retritricolporites irregularis*, el psilado monocolpado y los equinados. En este manto se observan menos variedad de especies que en el manto 1 de la mina el Bloque. Las zonas en las cuales se puede dividir el manto son (Fig. 4.46 a):

- Zona I: Abundancia de psilados monocolpados, esporas verrugadas y psilatricolporites zonado, y la disminución drástica de *Retritricolporites irregularis*
- Zona II: Presencia de psilados estriados y *ciclusphaera*
- Zona III: Homogénea
- Zona IV: Desaparición de algunos componentes, incremento de psilados tricolporados y presencia de *Spirosyncolpites spiralis*.

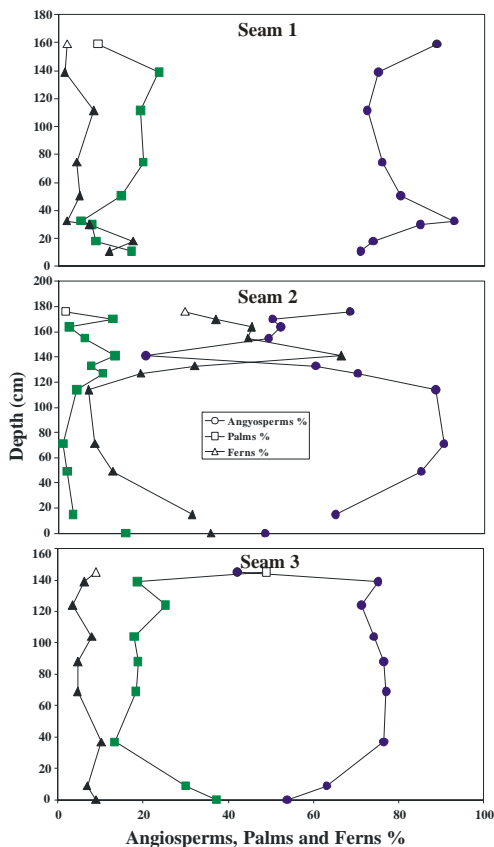


Fig. 4.45. Resumen de los esporomorfos en cada manto de la mina Nechi
Summary of sporomorphs in the three seams of Nechi Mine

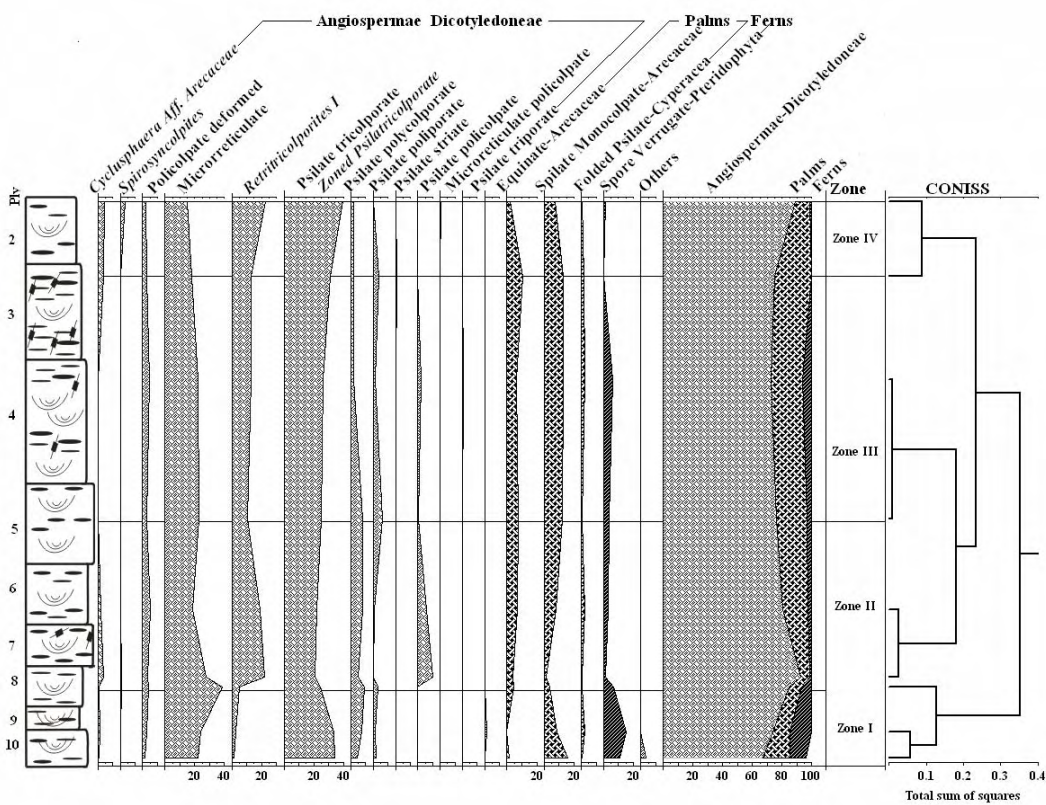


Fig. 4.46a. Distribución de esporomorfos de M1 de la mina Nechi
Sporomorph distribution in seam 1 of Nechi Mine

Para el manto 2 de la mina Nechi se observa la diferencia en la composición entre los plies de lutitas y de carbones. En los carbones predominan el psilado tricolporado, *retitricolporites* *irregulares* y microreticulados tricolporados. etc.; mientras que en las lutitas predominan el psilado tricolporado, psilado tricolporado, y el psilado monocolpado. Las zonas que se diferenciaron son las siguientes (Fig. 4.46 b):

- Zona I: Abundancia de equinados y psilados policolpados
- Zona II: Comportamiento homogéneo de todos los componentes
- Zona III: Disminución de microreticulados tricolporados y *retitricolporites* *irregularis*
- Zona IV: Aumento hacia el tope de la zona de psilado monocolpado
- Zona V: Disminución drástica de *retitricolporites* *irregularis* y bajo contenido de la mayoría de los esporomorfos.

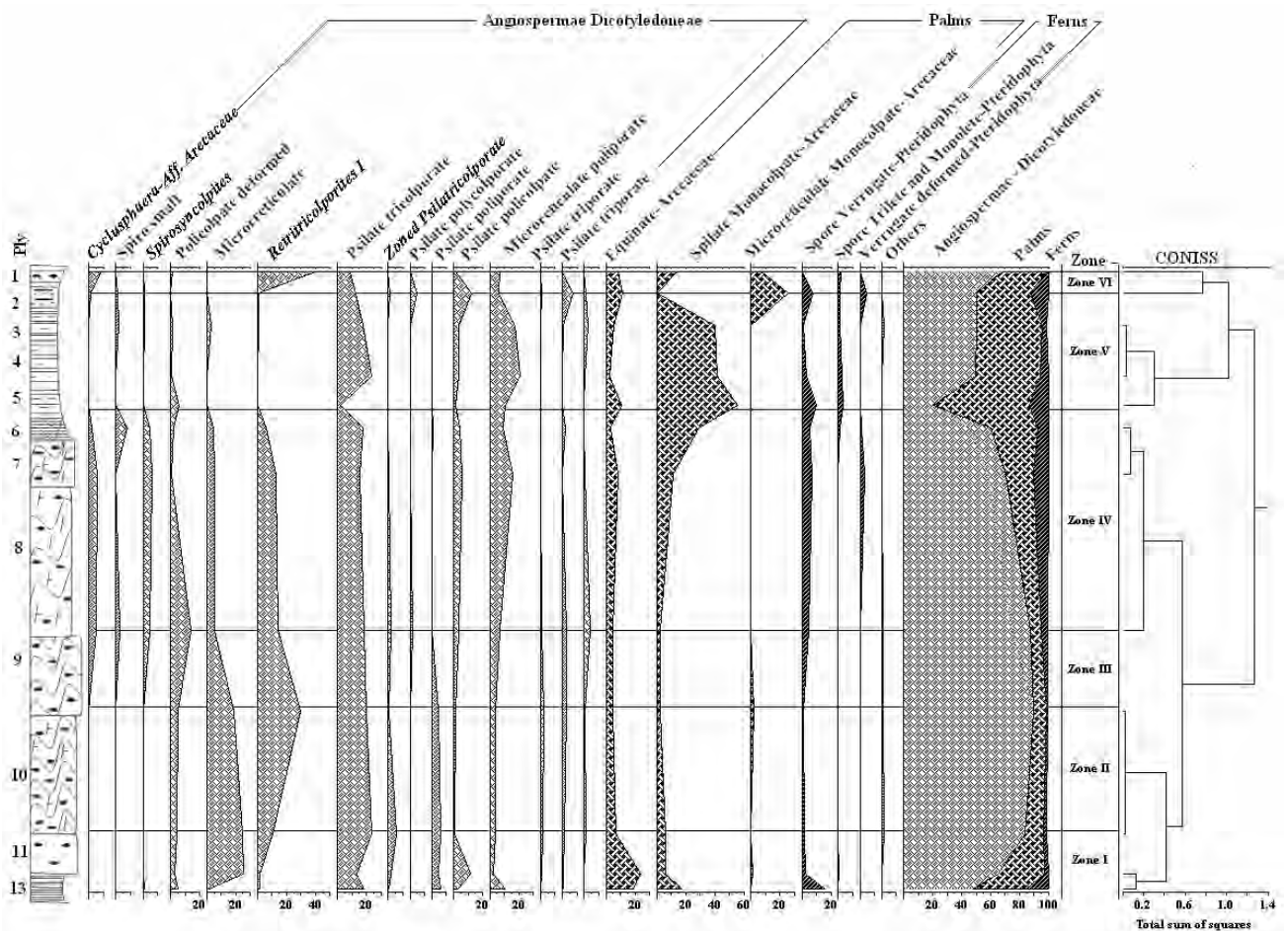


Fig. 4.46b. Distribución de esporomorfos de m2 de la mina Nechi
Sporomorph distribution in seam 2 of Nechi Mine

En el manto 3 de la mina Nechi aunque hay una gran variedad de esporomorfos, los que predominan son los psilados tricolporados, psilados monocolpados y microreticulados tricolporados. Este manto se divide en (Fig. 4.46 c):

- Zona I: Aumento de psilados monocolpados, ausencia de *ciclusphaera*, *spirosyncolpites* pequeños y policolpado deformado.
- Zona II: Homogénea, en varios esporomorfos tal como policolpados deformados, psilatricolporados zonados y otros granos no identificados
- Zona III: Homogénea
- Zona IV: Inicio del verrugado deformado

- Zona V: Extensión de psilatricolporites zonado y microreticulado policolporado
- Zona VI: Abundancia de psilados monocolpados

4.7.4. Mina el Pontón (Fig. 4.47, 4.48 y Anexo A10)

En la mayoría de las muestras de M3 El Pontón predominan los psilados tricolporados seguidos por los psilados monocolpados, a excepción de la muestra 4 en donde los contenidos de *ciclusphaera* y *spirosyncolpites* son altos y la muestra 7 aunque también presenta contenidos altos de *ciclusphaera* y *spirosyncolpites*, tiene altos de *retitricolporites irregularis* y psilados monocolpados y corresponde a una lutita. En este manto se destaca la muestra 9 por la abundancia de psilatricolporites zonado y la muestra 12 por la abundancia de esporas verrugadas y esporas triletes.

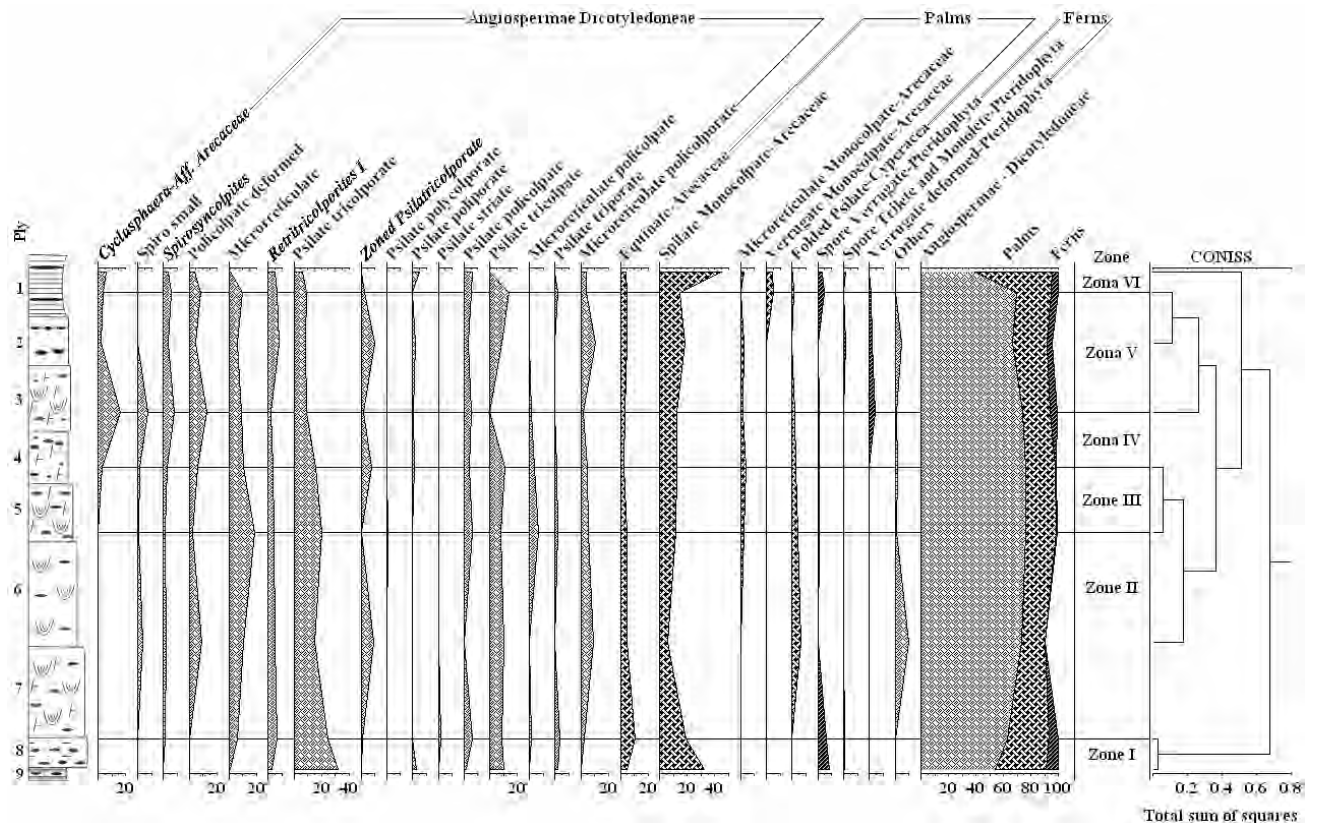


Fig. 4.46c. Distribución de esporomorfos de m3 de la mina Nechi
Sporomorph distribution in seam 3 of Nechi Mine

La lutita 1 presenta predominio de granos que se denominaron verrugados deformados grandes y pequeños, pero que en realidad no se tiene claro a que tipo de grano de polen pertenecen o si son algas, ya que esta muestra es la que tiene mayor índice de hidrógeno.

Las lutitas 6 y 7, a diferencia de las demás muestras presentan altos contenidos de *Retitricolporites irregularis*.

En el conteo de esporomorfos aparece mayor número de *Ciclusphaera* que *Spirosyncolpites*, muy posiblemente porque muchas de las *ciclusphaeras* corresponden a fragmentos y en algunas muestras como en la 4 y 14 se encuentran en esporomorfos y no en palinofacies, ni se observan en los pulidos, lo cual podría indicar que se encuentran íntimamente ligados a los tejidos vitríficos o que aparecen en muy poca cantidad para ser contados durante el análisis petrográfico y de palinofacies.

En general para todas las muestras el número de morfogéneros varía entre 12 y 22, siendo este último valor el correspondiente a la muestra 6 que es una lutita.

A diferencia de los demás análisis, no hay una clara correlación entre la mayoría de los morfogéneros y la separación dada anteriormente, sin embargo, en las muestras 3, 4 y 5 aparecen los granos de polen psilados plegados los cuales no se observan en las muestras 8 a 14. De otro lado, hay predominio de los psilados policolpados en los plies 3, 4 y 5 con respecto a los plies 8 a 14. Igualmente en los plies 8 a 12 se observan granos de polen psilados estriados monocolpados, los cuales no se ven en los plies 3, 4 y 5.

Por otra parte, los plies 12 y 13 se caracterizan por la presencia y abundancia de esporas verrugadas, triletes y monoletes.

Las muestras que presentan diferencias marcadas son la 3 por sus mayores porcentajes de psilados policolpados y triporados y por la escasez de esporas verrugadas. La muestra 8 por su mayor porcentaje de psilados monocolpados y estriados monocolpados y la muestra 12 por el mayor porcentaje de esporas verrugadas, triletes y equinados y de la ausencia de psilados policolpados; lo anterior hace que la muestra 3 sea la más pobre en helechos, la muestra 8 la más rica en palmas, la muestra 10, la más alta en angiospermas y la 12 la más alta en helechos. En la limonita del techo (muestra 2) no hay predominio o disminución drástica de ningún morfogeno, solo se observan algunas apariciones de otros granos de polen que normalmente son pequeños, y la muestra 6 de la intercalación se caracteriza por la presencia de algunos morfogéneros pequeños y en poca cantidad que no aparecen en los carbones como el estriado tricolporado y psilado amarillo oscuro; y la muestra 7 se caracteriza por la abundancia de *retitricolporites irregularis*. A su vez las muestras 6 y 7 presentan los más bajos porcentajes de microreticulados tricolporados.

A partir de la muestra 3 se presenta una disminución gradual del contenido de angiospermas hasta la muestra 6, en la muestra 7 se da un pico y luego baja en el nivel 8 para subir más o menos rápido hasta el nivel 10. Ahí baja drásticamente hasta su menor porcentaje en el nivel 12, a partir del cual vuelve a subir drásticamente hasta el ply 14. El total de palmas indica continuos incrementos y disminuciones.

El comportamiento de los helechos presenta una curva mucho más irregular ya que hay cambios drásticos de la muestra 2 a la 3, existe una disminución gradual de la muestra 4 a 8 y un cambio drástico de la muestra 11 a 12.

Se observa una relación inversa entre helechos y angiospermas, ya que a mayor contenido de helechos menor de angiospermas.

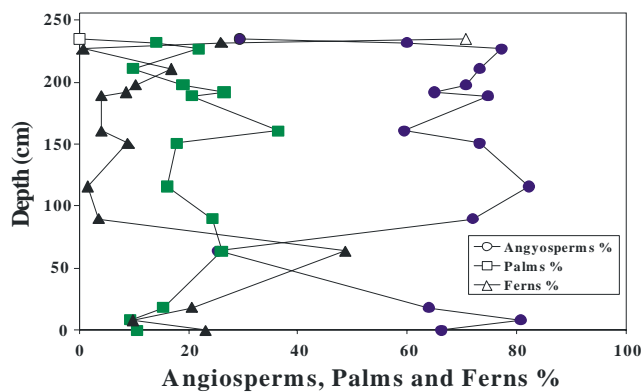


Fig. 4.47. Resumen de los esporomorfos de cada uno de los plies de la mina El Pontón
Summary of sporomorphs in seam 3 of El Pontón Mine

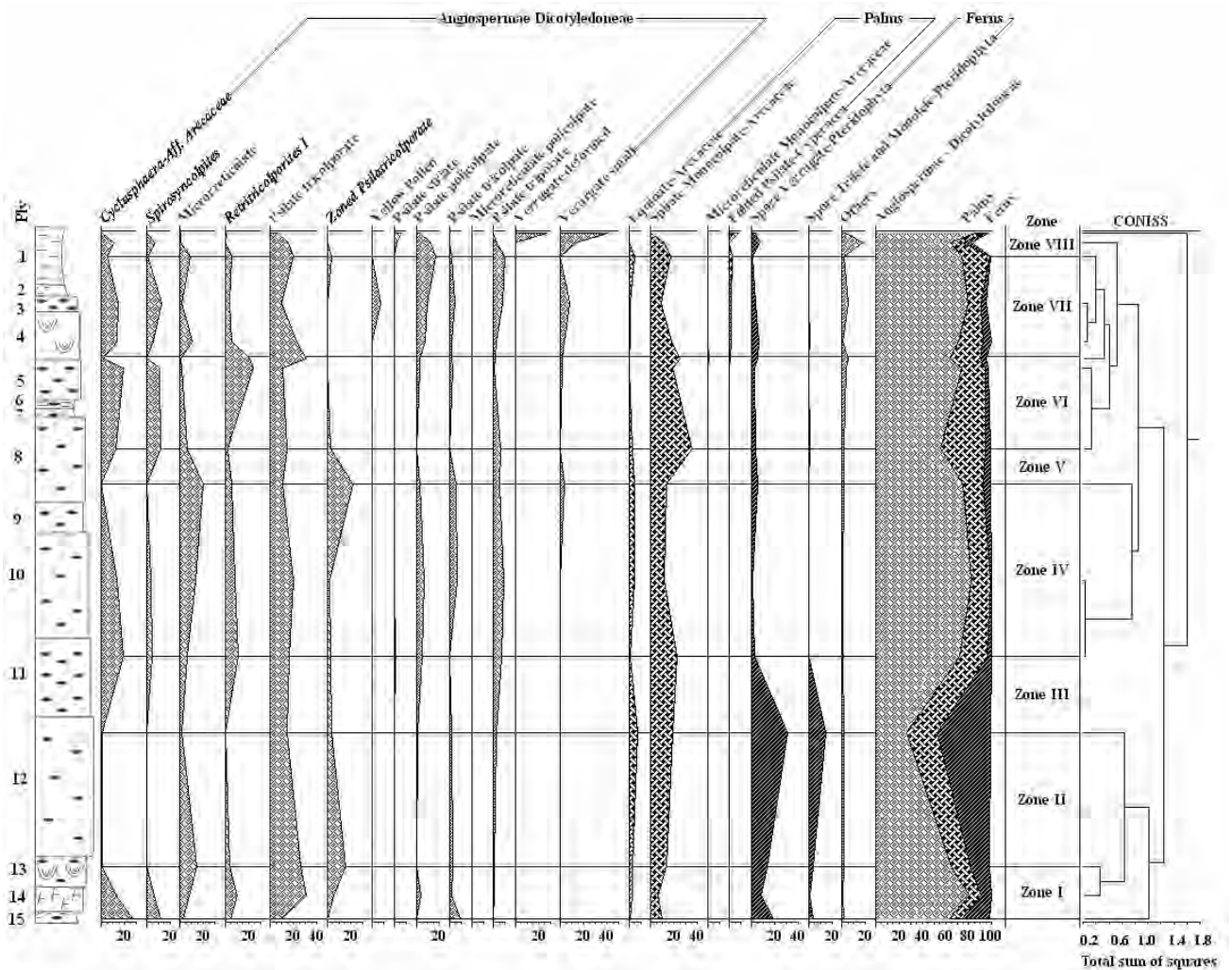


Fig. 4.48. Distribución de esporomorfos de M3 de la mina El Pontón
Sporomorph distribution in seam 3 of El Pontón Mine

Los esporomorfos más representativos de manto 3 El Pontón son el psilado monocolpado y el psilado tricolporado, pero también aparecen en cantidades importantes la *Cyclusphaera*, el microreticulado y el *retitricolporites irregularis* y *psilatricolporites zonado*. Las zonas que se pueden diferenciar son (Fig. 4.48):

- Zona I: Abundancia de *Cyclusphaera* y *Spirosyncolpites spiralis*
- Zona II: Ausencia de *Cyclusphaera* y *Spirosyncolpites* y abundancia de esporas verrugadas y esporas triletes y equinados
- Zona III: Incremento de *Cyclusphaera*, *Spirosyncolpites* y microreticulados tricolporados
- Zona IV: Homogénea en la mayoría de los esporomorfos
- Zona V: Incremento del psilado monocolpado y disminución drástica de psilatricolporado zonado y microreticulado tricolporado.
- Zona VI: Incremento de *Retitricolporites*
- Zona VII: Comportamiento similar en la mayoría de los esporomorfos
- Zona VIII: Abundancia de verrugados y otros granos no identificados

4.7.5. Mina El Arenal (Fig. 4.49, 4.50 y Anexo A10)

En la mayoría de las muestras el porcentaje de granos de polen de angiospermas está por encima del 80%, sólo 3 muestras están por debajo de este valor, pero es necesario destacar el ply 9 que tiene el menor valor (37%), a su vez esta muestra también es la que tiene el mayor porcentaje de helechos y de palmas.

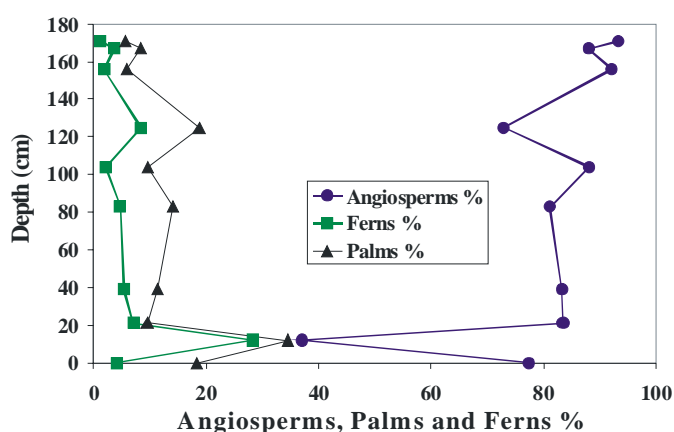


Fig. 4.49. Resumen de los esporomorfos del manto 3 de la mina El Arenal
Summary of sporomorphs of seam 3 in El Arenal Mine

En este manto se nota un incremento hacia el techo de *Ciclusphaera* y *Spirosyncolpites*, mientras que hacia la base estos granos de polen no aparecen. Igualmente en las muestras del techo hay abundancia de granos de polen psilados tricolporados, mientras que hacia la base disminuyen. También se nota que los plies del techo son pobres en helechos y en palmas, en cambio los plies de la base tienen más palmas y helechos, destacándose el ply 9 por la abundancia de esporas verrugadas, esporas triletes y monoletes, granos de polen equinados y psilados monocolpados. Esta asociación se observa en el ply 12 del M3 el Pontón, indicando que posiblemente estos dos mantos sean correlacionables.

En el manto 3 el arenal, los esporomorfos predominantes son los psilados tricolporados, microreticulados tricolporados, pero también hay algunos que aparecen en cantidades importantes pero no a lo largo de todo el manto como la *Ciclusphaera* y el *Spirosyncolpites* que aparecen en la parte superior del manto, mientras que el psilatricolporites zonado no aparece en el techo del manto. Las zonas definidas fueron (Fig. 4.50):

- Zona I: Abundancia de esporas verrugadas, psilados monocolpados, microreticulados monocolpados y presencia de psilados plegados, esporas triletes y monoletes y psilados estriados.
- Zona II: Disminución de *Psilatricolporites zonado* y otros
- Zona III: Comportamiento homogéneo y aparición de *Ciclusphaera* y *Spirosyncolpites spiralis*
- Zona IV: Presencia de microreticulado policolporado
- Zona V: Aumento de *Ciclusphaera* y *Spirosyncolpites* y disminución de microreticulado tricolporado
- Zona VI: Incremento de psilados

4.8. EXTRACTO DE BITUMEN Y CROMATOGRAFÍA LÍQUIDA

4.8.1. Mina El Bloque

De la mina el Bloque se tomaron 4 muestras, tres de los mantos totales y una del ply 5 del manto 1. El extracto de bitumen en éstas muestras varía entre 42370 y 79880 ppm, siendo el valor más bajo el correspondiente al manto 2 y el más alto al manto 3.

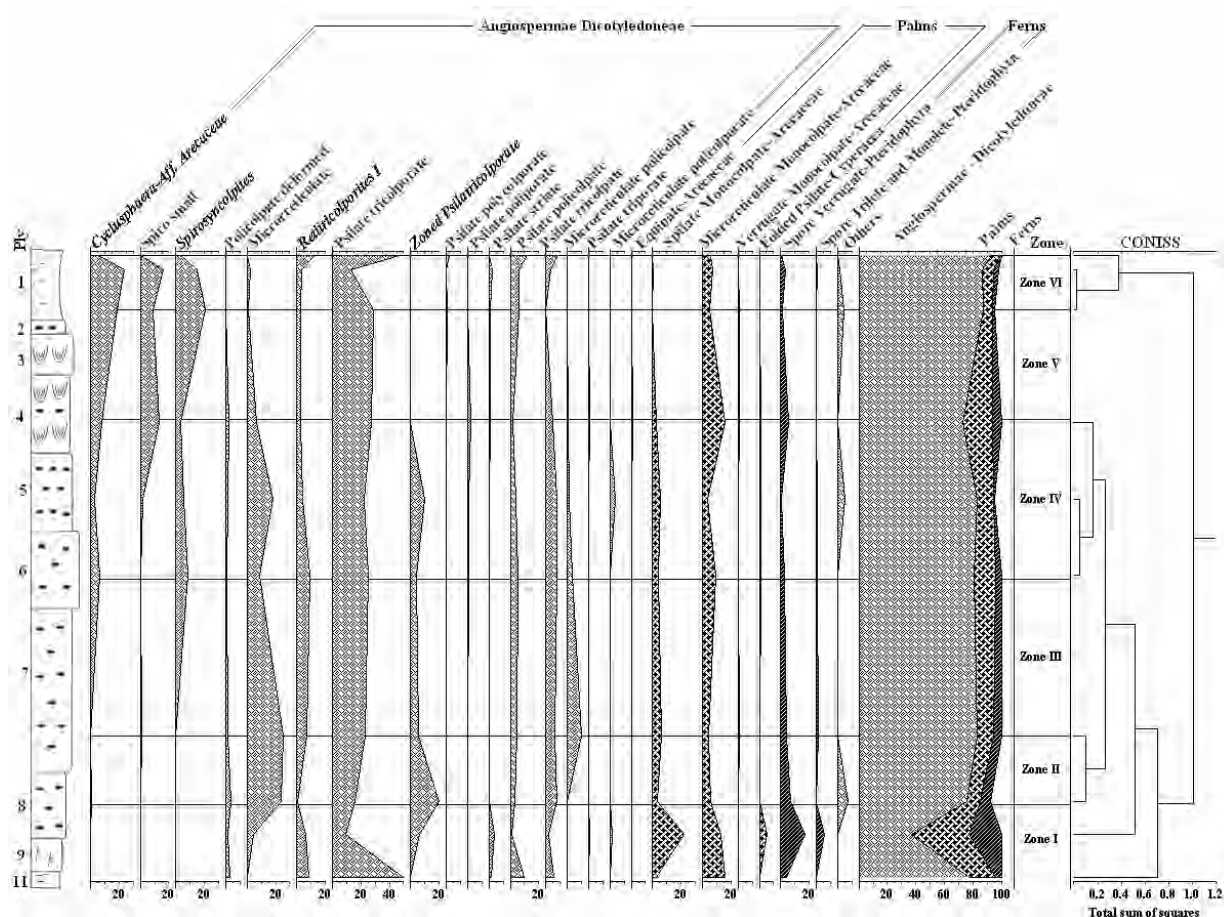


Fig. 4.50. Distribución de esporomorfos de M3 de la mina El Arenal
Sporomorph distribution in seam 3 of El Arenal Mine

El porcentaje de hidrocarburos saturados y aromáticos no superan el 2 y el 6% respectivamente, verificando de esta manera el bajo rango de la secuencia carbonosa estudiada, (sub-bituminosos), sin embargo, estos porcentajes aunque sean bajos demuestran la generación temprana de hidrocarburos líquidos. Aquí se destaca la muestra del M1 El Bloque porque presenta el mayor porcentaje de resinas (44.3) y el menor de asfaltenos (47.9), y dentro de esta mina es la que tiene mayor contenido de hidrocarburos (7.8%) (ver Anexo A11).

4.8.2. Mina Nechí

En la mina Nechí se tomaron 4 muestras correspondientes a un manto total (manto 2) y a tres plies de los mantos 1 (plies 10 y 11) y del manto 2 (ply 6).

Aquí los extractos varían entre 25268 y 85172, verificando la gran variación que existe en los diferentes plies dentro de un manto de carbón.

Las muestras que presentan los extractos más bajos (25268 y 32728 correspondientes a los plies 11 y 6 respectivamente) pertenecen a lutitas carbonosas, lo cual confirma, que los carbones tienen mayores posibilidades de generar hidrocarburos.

En las muestras de esta mina, los porcentajes de hidrocarburos saturados y aromáticos están por debajo del 2.8% y del 6.1% respectivamente, y al igual que para la mina El Bloque, se verifica la inmadurez de las muestras estudiadas y la generación temprana.

En esta mina, la muestra que presenta mayor contenido de resinas es el ply 11 del manto 1, que a su vez es la que tiene el mayor porcentaje de hidrocarburos (8.8%) (ver Anexo A11).

4.8.3. Minas El Pontón y el Arenal

En las minas el Arenal y el Pontón se tomaron las dos muestras correspondientes a los mantos totales, aquí el contenido de bitumen es de 46274 y 60846 ppm respectivamente.

Para las muestras de las minas El Arenal y el Pontón, los porcentajes de hidrocarburos saturados y aromáticos son menores de 1.5 y 5.1%, aquí se destaca que la muestra que tiene menor porcentaje de hidrocarburos es la de la mina El Pontón.

Las resinas varían entre 24.9 y 30% y los porcentaje de hidrocarburos están entre 5.6 y 6.6%, Ver Anexo A11.

4.9. MINERALOGÍA DE LAS ARCILLAS (Anexo A12)

En el manto 1 de la mina el Bloque se tienen tres muestras de lutitas de las cuales una pertenece al techo, otra a la base y la restante corresponde a una intercalación. Estas muestras se caracterizan porque no tienen ni esmectita ni interestratificaciones y el componente mas importante es la caolinita con más del 90% para la intercalación (ply 4) y para la base (ply 12), la muestra del techo presenta mucho menos caolinita (58%), pero tiene más micas y clorita, 19,7 y 22% respectivamente.

El techo del manto 3 de la mina el Bloque tiene porcentaje alto de caolinita, (70.5), pero no tan alto como el de M1 EB, además aparece esmectita con el 10.7% en interestratificaciones 4.10% y no tiene clorita.

En las muestras analizadas de este manto se observa incremento del contenido de clorita hacia el techo de la secuencia ya que va de 0% en el techo del manto 3 a 22% en el techo del manto 1.

El techo de manto 1 Nechi se caracteriza porque sólo tiene caolinita y micas (80 y 20% respectivamente).

El ply 1 de la mina Nechi corresponde a un carbón y se caracteriza por tener el porcentaje más alto de esmectita de todas las muestras (21.5%) y el menor porcentaje de caolinita (45.6%), además tiene micas en relativamente alta cantidad, (21%) y clorita (12.9%).

El techo de m2 Nechi se diferencia porque tiene valores intermedios de caolinita y clorita y micas (62.8, 15% y 12 respectivamente), además presenta 9.6% de arcillas interestratificadas.

El techo de M3 Nechi tiene un porcentaje mayor de caolinita y de clorita (76.2 y 16.6% respectivamente y menor de micas y no tiene arcillas interestratificadas.

Tomando los resultados de las arcillas de los techos de los tres mantos de la mina Nechi, se observa disminución de la base al techo de la secuencia en los contenidos de caolinita de 71 a 59% y de clorita de 16.6 a 11.3%.

Para la mina el Pontón, se tienen dos lutitas de la parte superior y una lutita en la base. Los contenidos de minerales arcillosos cambian drásticamente en el techo del manto de 49 a 76% para la caolinita, de 23 a 16 % para las micas y de 28 a 0% para la clorita, y la presencia de interestratificaciones en la muestra varía de 0 a 7% en la muestra 1 y 2 respectivamente. Esto evidencia las grandes variaciones verticales en la composición de los minerales arcillosos que se presentan en un mismo manto.

En la lutita de la base se tiene el mayor porcentaje de micas de todas las muestras analizadas (36.1%),

En las muestras de este manto se nota una disminución en el contenido de micas de la base al techo desde 36.1 hasta 16.6%.

En el manto 3 de la mina El Arenal se tienen las muestras del techo y de la base, estas se caracterizan por la disminución desde la base al techo de la caolinita 75.1 a 71.5%; de micas (25 a 18 %) y la aparición en el techo de clorita 4.6% y de interestratificaciones 5.9%.

4.10. ANÁLISIS DE IMAGEN

4.10.1. Petrografía

Con base en el conteo manual de los macerales, en general el contenido de liptinitas en la mayoría de los plies del Manto 1 de la mina El Bloque es superior al 25%, entendiéndose como ply la asociación de litotipos diferenciables a simple vista, (Thomas 2002), destacándose la muestra del ply 1 que presenta un porcentaje del 55%. Las liptinitas principales corresponden a liptodetrinitas, más del 5% en la mayoría de las muestras; esporinitas más del 5% en todas las muestras y cutinitas más del 3% en todas las muestras y dentro de las secundarias predomina la resinita (oil), la cual aparece en casi todas las muestras; la bituminita, que caracteriza las muestras 1, 4, 5 y 9 y los rosarios que aparecen principalmente en las muestras 6, 7, 8 y 10.

En el M1 de la mina Nechi el contenido de liptinitas en todas las muestras está por encima del 25%, destacándose la muestra 10 que tiene un porcentaje del 52%. Los macerales principales son los rosarios, las liptodetrinitas y esporinitas y dentro de los secundarios, se tiene la cutinita, resinita (oil) y bituminita, destacándose la muestra 2 y 10 con los más altos porcentajes. Al comparar los dos mantos El Bloque y Nechi se encuentra que presentan contenidos de liptinitas totales muy similares, pero las muestras que presentan los más altos contenidos de liptinitas están en la parte superior del manto 1 el Bloque (ply 1) y en la parte inferior de M1 Nechi (ply 10). De otro lado los plies aunque aparentemente son los mismos no están en la misma posición, además al parecer el M1 El Bloque presenta mayor deformación que M1 Nechi.

Por lo anterior, es importante verificar estructuralmente que pasa con el M1 de las minas Nechi y el Bloque, que pueda explicar la inversión en el comportamiento de las muestras.

4.10.2. Comparación del color de fluorescencia y su fracción volumétrica por mantos.

Los resultados del conteo a partir de las imágenes, se puede observar en la (Fig. 4.51); aquí, cada caja representa un ply, el largo es la fracción volumétrica promedio encontrada al analizar entre 20 imágenes en palinofacies y 50 imágenes en las secciones pulidas.

El color representa el promedio de la fluorescencia de las imágenes.

Para las palinofacies el porcentaje de componentes lo que indica es que tan aglomeradas o no están las partículas en las muestras analizadas y por lo tanto no corresponde a una fracción volumétrica.

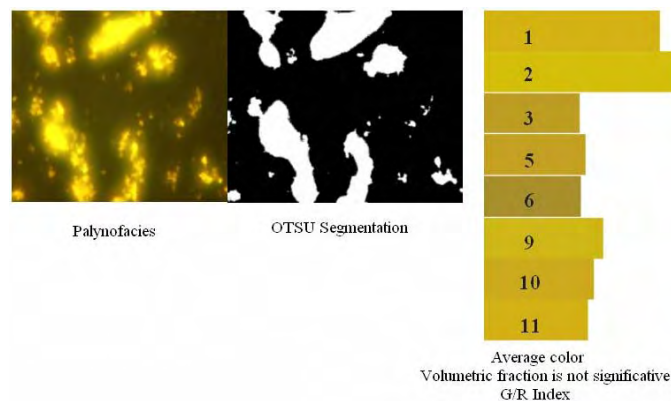


Fig. 4.51. Etapa 3 del tratamiento digital de imágenes
Step 3 of digital image processing

En la figura 4.52 se puede observar los promedios de todos los macerales liptiníticos de cada nivel.

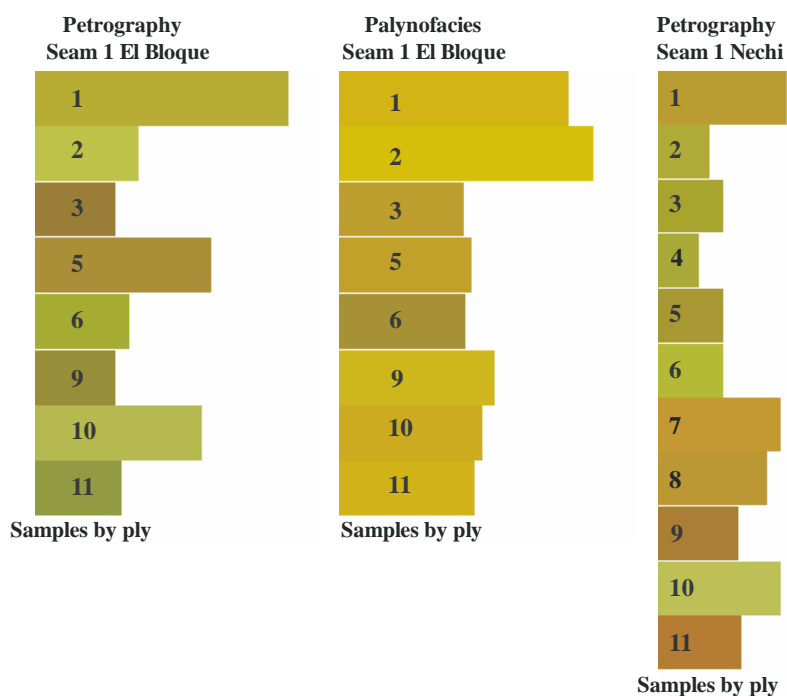


Fig. 4.52. Manto 1 de las minas El Bloque y Nechi. Colores de fluorescencia, y fracción volumétrica de los macerales liptiníticos, tanto de pulidos como de palinofacies de M1 el Bloque y pulidos de M1 Nechi.

El Bloque and Nechi mines, seams 1. Fluorescence colour and volumetric fraction of liptinitic macerals in polish section and palynofacies.

4.10.3. *Fluorescencia producida por los macerales del grupo de las liptinitas*

En la figura 4.53, cada grupo de cajas horizontales representa el ply. Cada columna corresponde a los resultados medidos para cada clase analizada así por ejemplo: Liptodetrinitas, esporinitas, cutinitas, exsudatinitas, resinitas (oil), y bituminitas, y el largo de la caja representa el porcentaje.

De la figura anterior se puede deducir que las liptinitas principales son liptodetrinitas, bituminitas y (resinitas oil) y dependiendo del nivel, cutinitas (niveles 3, 5 y 6) y/o esporinitas (niveles 1, 6 y 9).

Las más fluorescentes son las (resinitas oil) y esporinitas, mientras que los niveles verdosos y pardos corresponden a las liptodetrinitas. Las cutinitas normalmente son de color pardo rojizo y las bituminitas de color pardo oscuro. Todo lo anterior es coherente con la petrografía manual.

De todo el manto, el ply con características diferentes es el 5, ya que tiene una distribución homogénea o sea que los diferentes macerales liptiníticos aparecen en porcentajes más o menos similares.

4.10.4. *Resultados del índice V/R de pulidos vs. palinofacies*

En la figura 4.54 no hay similitud, esto se comprueba en las tendencias de los resultados del conteo de macerales liptiníticos en las secciones pulidas en los plies más profundos del Manto 1 de la mina el Bloque (plies 10 y 11), en los cuales la fluorescencia tiende al color verde, mientras que en las palinofacies no se observan cambios importantes ya que fluorescen más homogéneamente, pero aquí hay que resaltar que en el proceso de preparación de las muestras para palinofacies, se extraen los ácidos húmicos y el bitumen que tiene la muestra, por lo cual no se podría comparar la fluorescencia obtenida de las secciones pulidas y la de las palinofacies. Por lo anterior, se nota una diferencia más marcada en los resultados de la fluorescencia que presentan las imágenes tomadas en las secciones pulidas, ya que estas representan la muestra original.

Las imágenes de los pulidos son menos fluorescentes y presentan colores más verdosos que las imágenes de las palinofacies, lo cual sugiere que se podría deber a que los ácidos húmicos no permiten tener en cuenta la fluorescencia de la vitrinita en los pulidos; sin embargo, como en las palinofacies desaparecen los ácidos húmicos, y el bitumen, las vitrinitas se pueden ver limpias con una fluorescencia más real y por lo tanto influyen la cantidad y el color de las imágenes tomadas.

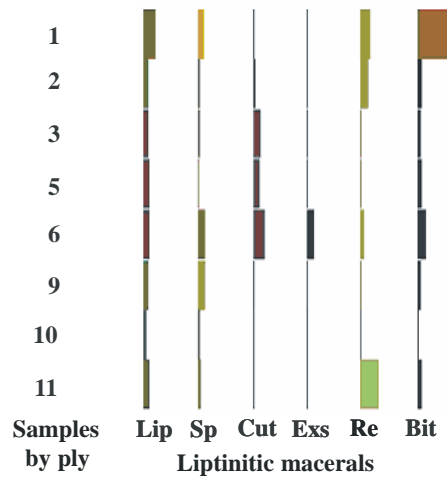


Fig. 4.53. Macerales liptiníticos para cada ply del Manto 1 de la Mina El Bloque
Liptinitic macerals in each ply of seam 1 in El Bloque Mine.

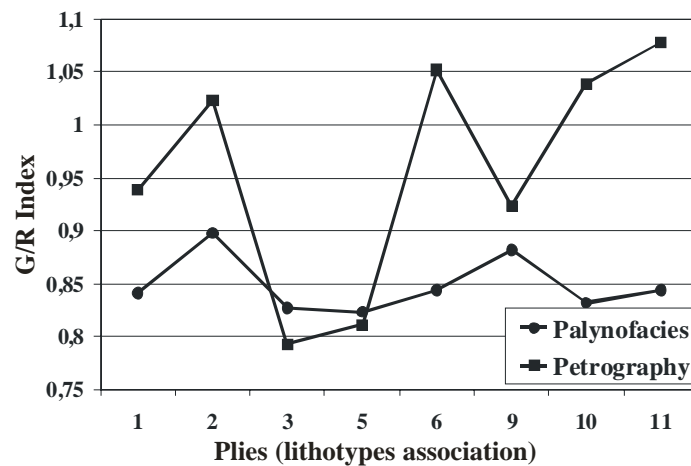


Fig. 4.54. Índice V/R para pulidos y palinofacies de las muestras de los diferentes plies de M1 El Bloque.
G/R index for polished sections and palynofacies in plies of El Bloque seam 1.

4.11. ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS DE LOS DIFERENTES ANÁLISIS

4.11.1. Introducción

Debido a que se cuenta con resultados de análisis que están representando distinto grado de precisión y a que se pasa de los análisis de selección de muestras (volumétricos, tales como los análisis próximos, elementales y de pirolisis rock-eval) a análisis mucho más detallados tal como los análisis petrográficos que serían semivolumétricos y los análisis específicos, donde ya se involucra un procesamiento de la muestra para resaltar algunas características, tal como los análisis de palinofacies y de esporomorfos. El procesamiento de los resultados tampoco se puede mezclar, ya que se estarían combinando características de las muestras muy distintas. Por esta razón en la siguiente discusión se agruparán los resultados de análisis volumétricos y se separarán de los análisis petrográficos, de palinofacies y de esporomorfos.

Con el objeto de verificar las observaciones hechas en cuanto a las variables más importantes de cada uno de los métodos de análisis utilizados, y de establecer la correlación o no de los mantos, se hizo el estudio de los componentes principales y se graficaron los resultados en diagramas biplot y en dendrogramas.

Con los datos de los diferentes análisis se crearon las matrices de tal modo que las muestras cuyos resultados no estuvieran completas se eliminaron, así por ejemplo algunas lutitas que tenían análisis de pirolisis, pero no tenían análisis petrográfico se sacaron de la matriz final.

4.11.2. Análisis próximos y de pirolisis rock-eval de carbones y lutitas

En la figura 4.55, correspondiente al gráfico de los análisis próximos y de pirolisis Rock–Eval de todas las muestras (carbones y lutitas), se puede ver que se separan perfectamente los carbones de las lutitas, hacia el lado izquierdo y derecho respectivamente, además muestra cuales son las variables más importantes a la hora de hacer las correlaciones entre los análisis. Así en pirolisis, son: S2 y CP; CR, Mineral Carbon y TOC.

También se observa que las muestras que presentan mejor potencial de hidrocarburos se encuentran hacia el extremo izquierdo superior (CB1-1, CB3-4, CB1-5, CN1-10) y las de menor potencial, se encuentran hacia el lado derecho cercanas a las lutitas (CA3-2, CA3-3, CA3-10, CP3-4, CP3-5 Y CB2-H). Esto demuestra el menor potencial de las lutitas comparados con los carbones, debido a la menor cantidad de materia orgánica disponible de las primeras.

La variable más importante en las lutitas es T_{máx} y las cenizas; el azufre es la variable menos importante dentro de las muestras ya que no hay ninguna relación entre dicho análisis y los demás resultados. Las variables opuestas son TOC-Cz y S1–OI. Como las lutitas presentan un comportamiento distinto a los carbones, se trabajarán separadamente en las siguientes discusiones.

4.11.3. Análisis próximos, elementales, y de pirolisis Rock-Eval de carbones

En la figura 4.56, se puede ver una amplia dispersión y las variables que presentan mayor correlación son: S1, S2, H(lac), CP; MV e HI

Muchas muestras se encuentran concentradas hacia el lado derecho, mientras que hacia el lado izquierdo, se tiene mayor dispersión y corresponden principalmente a las muestras de los manto 3 de las minas el Arenal y el Pontón, pero también hay algunas de las minas Nechi y el Bloque, pero la gran mayoría de las muestras de estas dos últimas minas se encuentran en el lado derecho y con una mayor concentración. Se observan variables con comportamientos opuestos como TOC con Cz y S y O (lac) con C (lac).

Las muestras que tienen mayor potencial de hidrocarburos, se encuentran hacia la parte superior del lado derecho e izquierdo.

Los valores para los ejes son los siguientes: eje 1 (34.23), eje 2 (25.29) y eje 3 (11.23).

4.11.4. Análisis próximos y de pirolisis Rock-Eval de lutitas

En la figura 4.57, se puede ver que las variables que presentan mayor correlación son: S2 y CP; S1 e HI

Igualmente las variables TOC, RC y MinC son importantes, mientras que el azufre tiene muy poco significado. RC es totalmente opuesto a Cz y S1 a OI.

Las lutitas con mejor potencial de hidrocarburos se encuentran en el lado izquierdo superior de la gráfica. Al igual que en los casos anteriores el azufre es una variable que no tiene mucha importancia.

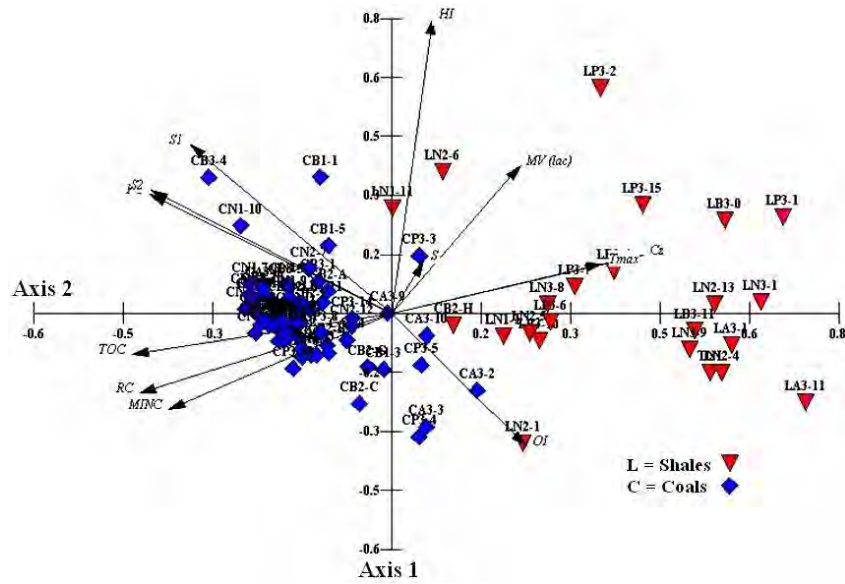


Fig. 4.55. Análisis en componentes principales de los resultados de los análisis próximos y Rock-Eval pirólisis en carbones y lutitas.

Principal component analysis of proximate and Rock-Eval pyrolysis results in coals and shales

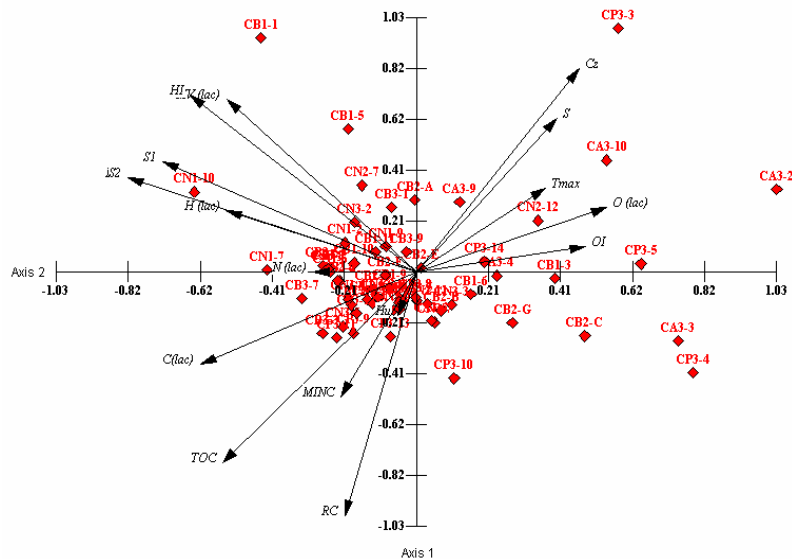


Fig. 4.56. Análisis en componentes principales de los resultados de los análisis próximos y Rock-Eval pirólisis en carbones

Principal component analysis of proximate and Rock-Eval pyrolysis results in coals

4.11.5. Análisis petrográfico de carbones

En la figura 4.58, en donde se muestran solo los plies de carbones se ve más claramente las variables que mas influencia tienen en los resultados y a cuales muestras afectan, así por ejemplo la colotelinita, la telinita y la colodetrinita tienen que ver con un gran número de muestras, mientras que otras variables están relacionadas a un menor número de ellas, como es el caso de la bituminita que afecta a varias muestras del manto 1 el Bloque y la inertodetrinita y la esporinita que son sobresalientes en el ply 4 del manto 3 de la mina el Bloque. También se notan variables que se encuentran cercanas tales como suberinita, resinita e inertodetrinita y vitrodetrinita, colodetrinita y cutinitas, corpogelinitas y semifusinitas y otras que son más importantes que las anteriores pero se presentan un poco más separadas y en menos muestras, dichas variables son la bituminita,

inertodetrinita, esporinita y liptodetrinita. Las cuales aparecen en las muestras que tienen mayor potencial como el ply 1 de la mina El Bloque y el ply 4 del manto 3 de la misma mina.

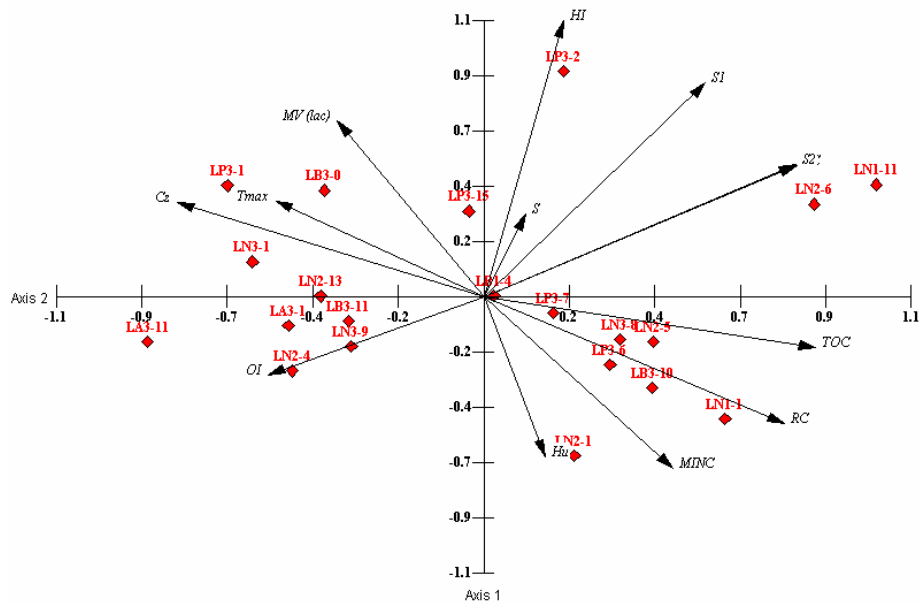


Fig. 4.57. Análisis en componentes principales de los resultados de los análisis próximos y Rock-Eval pirólisis en lutitas
Principal component analysis of proximate and Rock-Eval pyrolysis results in shales

Las variables que tienen menor influencia son las correspondientes a las inertinitas tales como fusinita, micrinita y semifusinita.

Aquí no se logran diferenciar claramente las muestras de los distintos mantos, ya que se encuentran totalmente mezcladas, pero si se separan las muestras que tienen buen potencial como CB1-1 y la CB3-4 en la parte izquierda inferior de las de bajo potencial como la CP3-4 en el extremo izquierdo superior. Los valores para los ejes son los siguientes: eje 1 (19.09), eje 2 (17.03) y eje 3 (9.92).

La figura 4.59 presenta los datos del conteo de palinofacies en los ply de carbones, en esta gráfica se obtiene una mayor distribución de las muestras y se observan algunas variables importantes tales como *Psilatricolpites* y partículas irregulares oscuras. Las que no parecen tener ninguna relación son las hifas, las partículas rugosas y las algas, pues normalmente aparecen en muy pocas muestras. Se observa relación entre las esporas verrugadas y el *Psilatricolporites zonado* y entre el microreticulado tricolorado y la *cyclusphaera*.

Los valores para los ejes son los siguientes: eje 1 (13.33), eje 2 (12.72) y eje 3 (8.61).

En las lutitas, Fig. 4.60, al igual que en los carbones se observa una amplia dispersión, así las muestras de la mina Nechi se encuentran principalmente concentradas en el lado derecho del gráfico, mientras que hacia el lado izquierdo se tienen principalmente las muestras de la Mina el Pontón. De esta misma manera las variables que los afectan son distintas, así por ejemplo en la mina Nechi predominan los tejidos irregulares transparentes, los granos de polen equinados y los granos de polen psilados plegados; mientras que para los del Pontón predominan la materia orgánica amorfa, las partículas rugosas el *Spirosyncolpites* y la *ciclusphaera*, esta asociación caracteriza las lutitas que presentan el mayor índice de hidrógeno.

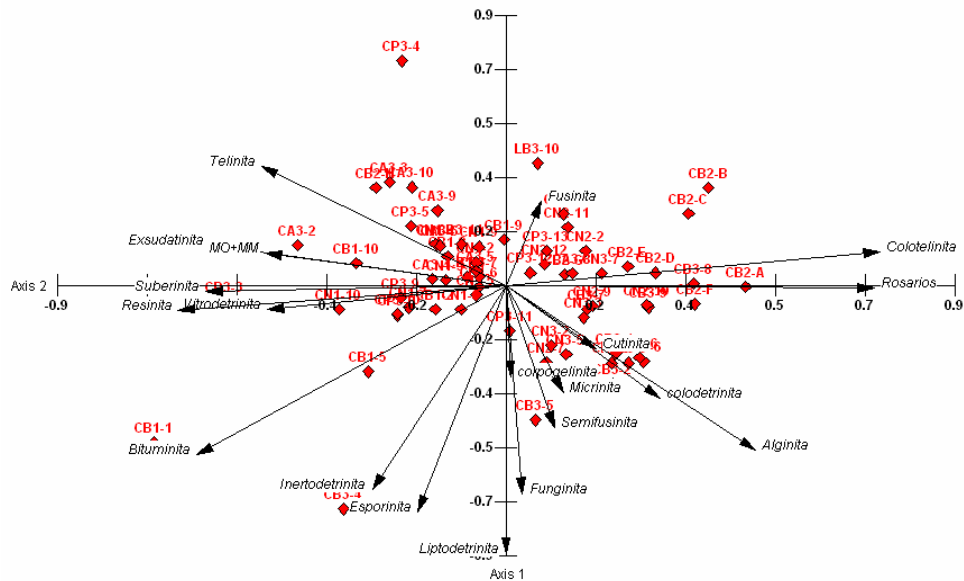


Fig. 4.58. Análisis en componentes principales de los resultados petrográficos en carbones
Principal component analysis of petrographical results in coals

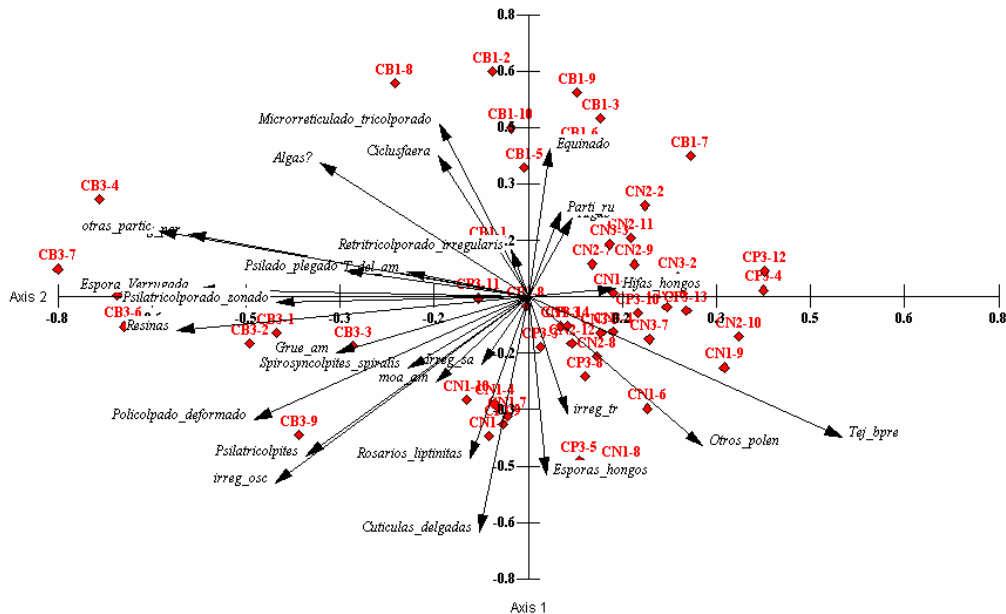


Fig. 4.59. Análisis en componentes principales de los resultados de palinofacies en carbones
Principal component analysis of palynofacies results in coals

Las lutitas del lado derecho se pueden separar en dos grupos (4, 5 y 13 del manto 2 de la mina Nechi) y las muestras 8 y 9 del manto 3 de Nechi y 4 del m1 El Bloque y la 3 de M2 Nechi, la muestra 11 del m1 Nechi se encuentra muy separada.

Las lutitas del lado izquierdo se agrupan así: muestras 1, 2, 6 y 7 del manto 3 de la mina el Pontón y la muestra 11 del manto de la mina El Bloque y totalmente separada de todas las agrupaciones anteriores, se tiene la muestra 6 del manto 2 de la mina Nechi.

Se tiene buena correlación entre los irregulares transparentes y el *Psilatricolporites zonado* y entre el equinado y las partículas irregulares oscuras.

Los valores para los ejes son los siguientes: eje 1 (24.66), eje 2 (14.77) y eje 3 (11.38).

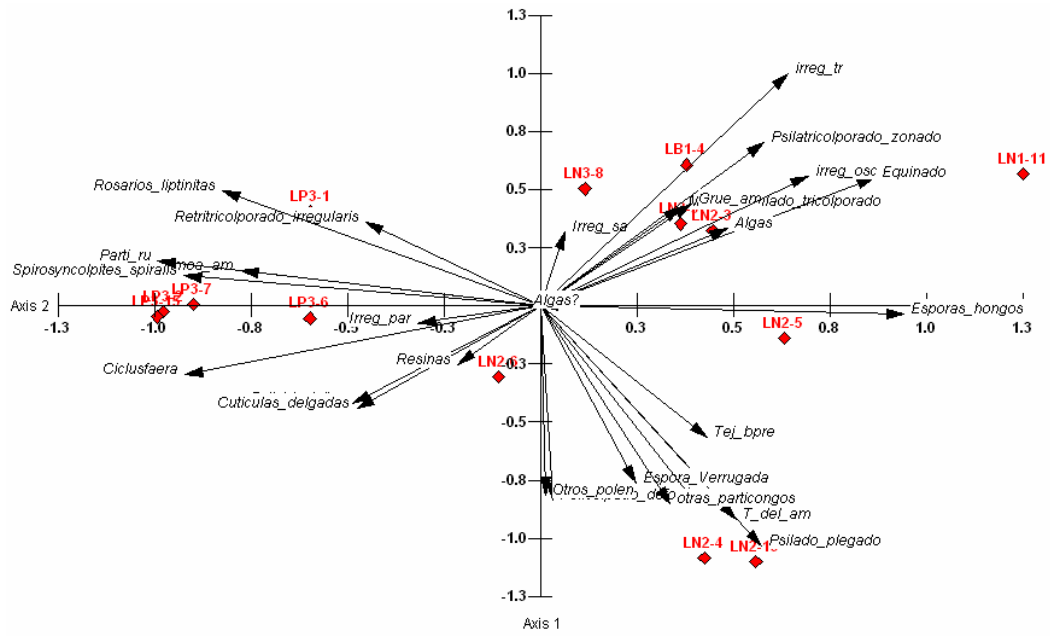


Fig. 4.60. Análisis en componentes principales de los resultados de palinofacies en lutitas
Principal component analysis of palynofacies results in shales

5. DISCUSIÓN

5.1. APLICACIÓN DE LAS PALINOFACIES A LOS CARBONES Y SU CONTRIBUCIÓN A LA PETROGRAFÍA Y AL PALEOAMBIENTE

5.1.1. Características petrográficas, de palinofacies y de esporomorfos

Los datos petrográficos indican que la mayoría de las muestras son ricas en vitrinita (> 70%) y liptinitas (> 15%) y pobres en inertinitas (< 5%). Dentro de los macerales vitriníticos predominan la colotelinita y la colodetrinita; en los macerales liptiníticos se tienen liptodetrinitas, esporinitas y cutinitas y en los macerales inertiníticos se observa principalmente funginitas, (Fig. 5.1).

Se implementó el método modificado de Shulze para los carbones, el cual permite quitar los ácidos húmicos al carbón disgregando los componentes orgánicos de tal modo que es posible identificar cada uno de ellos y hacer la correlación casi directa con los macerales observados en petrografía, permitiendo de esta manera refinar la identificación de los macerales vistos en petrografía y de verificar la solubilidad o no de algunos de los componentes de la materia orgánica, lo cual es fundamental para entender el carbón como roca fuente de hidrocarburos.

Los datos de palinofacies normalmente presentan menores porcentajes de componentes vitriníticos y mayores de componentes liptiníticos que los obtenidos con petrografía. Pero las proporciones se mantienen, o sea que los componentes vitriníticos aparecen con más del 60%, los componentes liptiníticos están por encima del 20% y los componentes inertiníticos presentan porcentajes variables. No se tiene una correlación directa entre los macerales inertiníticos vistos en petrografía y los componentes inertiníticos vistos en palinofacies, ya que en algunas muestras lo que normalmente se clasifica como inertinitas en petrografía, estas no aparecen en las preparaciones de palinofacies. Al contrario, muestras que aparentemente no tienen inertinitas en petrografía, en palinofacies aparecen en gran cantidad, indicando que posiblemente muchas de las inertinitas corresponden a bitumen que se disuelve en el proceso de preparación de las palinofacies. Las verdaderas funginitas en petrografía no se alcanzan a diferenciar porque normalmente están íntimamente mezcladas en los tejidos y en muchos casos son muy pequeñas.

En palinofacies los equivalentes a los macerales vitriníticos más comunes son los que se denominaron tejidos delgados amarillos, tejidos bien preservados y tejidos formados por otras partículas. Los componentes liptiníticos corresponden a las partículas dispersas de tamaño pequeño, los esporomorfos y las cutículas delgadas. En los componentes inertiníticos, aunque no se logró establecer con certeza la equivalencia de las funginitas, en palinofacies aparecen esporas de hongos y partículas irregulares oscuras, (Fig. 5.1).

Con respecto a los esporomorfos, se encontró gran variedad de granos de polen de angiospermas dicotiledóneas, monocotiledóneas y esporas de helechos, variando en las siguientes proporciones: 47 – 94%, 1.1 – 50% y 0.5 – 48.6% respectivamente, pero en la mayoría de las muestras el porcentaje de angiospermas dicotiledóneas esta por encima del 60%.

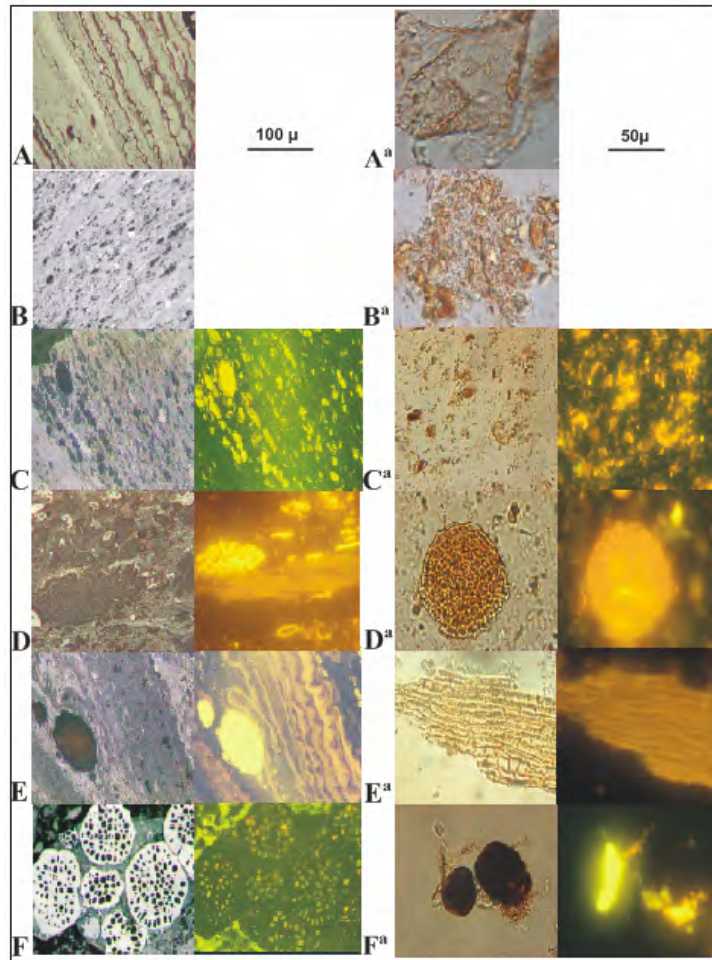


Fig. 5.1. Macerales y palinofacies más comunes en los carbones de la Formación Amagá.
 A – A^a. Colotelinita y tejidos bien preservados; B - B^a. Colodetrinita y partículas irregulares formadas por otras partículas; C – C^a. Liptodetrinita y pequeñas partículas; D - D^a. Esporinita y granos de polen; E– E^a. Cutinita y cutículas; F - F^a. Funginita, esporas de hongos.

Most common macerals and palynofacies in coals from the Amagá Formation.

A – A^a. Colotelinite and well-preserved tissues; B - B^a. Colodetrinite and irregular particles formed by other particles; C – C^a. Liptodetrinite and small particles; D - D^a. Sporinite and pollen grains; E– E^a. Cutinite and cuticles; F - F^a. Funginite and fungi spores.

Los granos de polen de angiospermas dicotiledóneas más importantes son (Fig. 5.2):

Retitricolporites irregularis, psilado tricolporado, microreticulado tricolporado, psilado policolpado, psilado tricolpado, psilatricolporites zonado, policolpado deformado, microreticulado policolporado y psilado tricolporado.

Las angiospermas monocotiledóneas (palmas), están representadas principalmente por psilados monocolpados, equinados y microreticulados monocolpados. Las criptogamas pteridofitas (helechos) corresponden básicamente a las esporas verrugadas. Aparte de los morfógenos más comunes descritos anteriormente, existen algunas muestras en donde los porcentajes de la *Ciclusphaera* y el *Spirosyncolpites* son significativos dentro de las angiospermas dicotiledóneas.

Las lutitas aunque aparentemente presentan los mismos tipos de granos de polen y esporas los porcentajes son muy diferentes ya que aquí predominan los psilados monocolpados y las esporas verrugadas. Además no se observaron granos poliporados ni los psilados plegados. De otro lado las lutitas pobres en materia orgánica son escasas en granos de polen, mientras que las lutitas muy ricas en materia orgánica (> 30%) son igualmente ricas en variedad de granos de polen y esporas. Pero es necesario resaltar que algunos plies de carbones son excepcionalmente ricos en granos de polen y

esporas, razón por la cual se recomienda tener en cuenta este tipo de litologías a la hora de efectuar los estudios tendientes a determinar el paleoambiente y definir la edad relativa de las rocas.

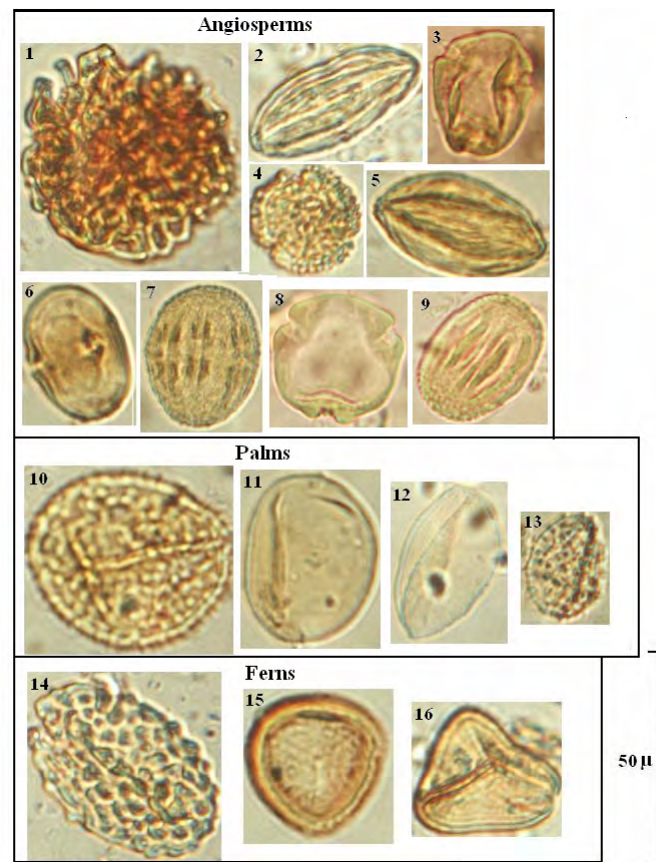


Fig. 5.2. Principales granos de polen y esporas presentes en los carbones y en las lutitas carbonosas estudiadas
 1. *Spirosyncolpites spiralis*; 2. Psilapolicolpado; 3 y 8. *Psilatricolporites* sp.; 4. *Retitricolporites irregularis*; 5. *Striaticolpites* sp.; 6. Tricolporado liso; 7. Microreticulado policolporado; 8. *Psilatricolporites*; 9. Microreticulado tricolporado; 10. Equinado; 11. *Psilamonocolpites* sp. 1; 12. *Psilamonocolpites* sp. 2; 13. cf. *Mauritiidites*; 14. *Verrucatosporites usmensis*; 15 y 16. Esporas triletes no identificadas.

Main pollen grains and spores present in coals and coaly shales studied.

1. *Spirosyncolpites spiralis*; 2. Psilapolycolpate; 3 and 8. *Psilatricolporites* sp.; 4. *Retitricolporites irregularis*; 5. *Striaticolpites* sp.; 6. Smooth tricolporate; 7. Microreticulate polycolporate; 8. *Psilatricolporites*; 9. Microreticulate tricolporate; 10. Spiny monocolpate; 11. *Psilamonocolpites* sp. 1; 12. *Psilamonocolpites* sp. 2; 13. cf. *Mauritiidites*; 14. *Verrucatosporites usmensis*; 15 and 16. Non identified trilete spores.

5.1.2. Correlación entre análisis petrográfico y de palinofacies

Se toma como ejemplo dos mantos para hacer la correlación detallada.

Las Figuras 5.3 y 5.4, permiten ver que existe buena correlación entre la vitrinita y los tejidos vitriníticos y entre la liptinita y los componentes liptiníticos, pero no existe correlación entre la inertinita y los componentes inertiníticos. Así, las muestras que en petrografía presentan altos contenidos de inertinita, muestras 1 y 4 de los mantos 1 y 3 respectivamente en palinofacies son los más bajos y por el contrario, las muestras que tienen el menor porcentaje de inertinita en petrografía, muestras 7 y 2 de los mantos 1 y 3 respectivamente, en palinofacies presentan el mayor porcentaje de esporas de hongos. Además es posible observar que los componentes vitriníticos son mayores comparados con los componentes liptiníticos e inertiníticos, (Fig. 5.3 y 5.4). Los componentes inertiníticos no tienen correlación, posiblemente porque todas las inertinitas vistas en petrografía no son las mismas en palinofacies y todas las pequeñas esporas de hongos en palinofacies no se pueden observar en petrografía.

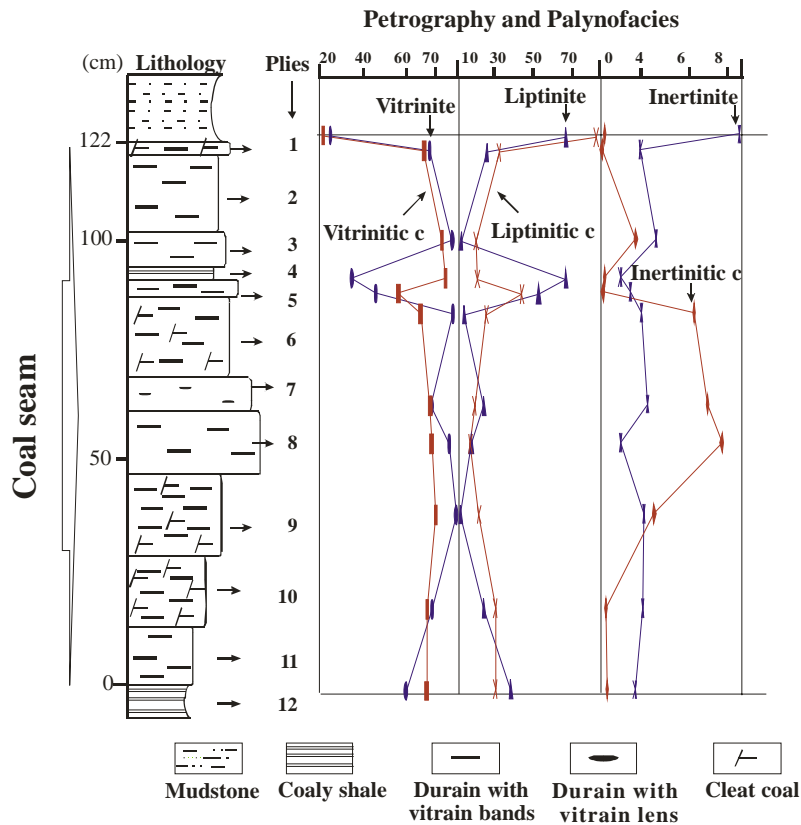


Fig. 5.3. Mina el Bloque, manto 1. Correlación entre los resultados de petrografía y palinofacies.
Mine El Bloque, seam 1. Correlation between petrography and palynofacies results

En la mayoría de las muestras de los dos mantos, el contenido de esporinitas es menor que el contenido de esporomorfos, posiblemente porque muchos granos de polen y esporas están íntimamente mezclados con otros macerales. Por esta razón es difícil identificar estos en las condiciones normales de iluminación (Fig. 5.5). El porcentaje de cutinitas de las muestras del manto 1 aparecen en mayor proporción que las cutículas (excepto para las muestras 3 y 10). Por el contrario las muestras del manto 3 tienen más cutículas que cutinita (Figs. 5.5 y 5.6). De la misma manera que las esporinitas, las resinitas son contadas en menores proporciones que los esporomorfos y resinas. Cuando existe resinita oil, es contrario porque en el proceso de preparación de las muestras, éstos componentes son disueltos y por esta razón no aparecen en el conteo de resinas (Figs. 5.5 y 5.6).

La bituminita es mayor en el análisis de palinofacies que en el de petrografía, ayudando a separar muestras con el mejor potencial para generación de hidrocarburos tal como las muestras 1 y 4 de los mantos 1 y 3 respectivamente de las muestras con el peor potencial de generación (muestras 3 y 3 de los mantos 1 y 3 respectivamente, Figs. 5.5 y 5.6).

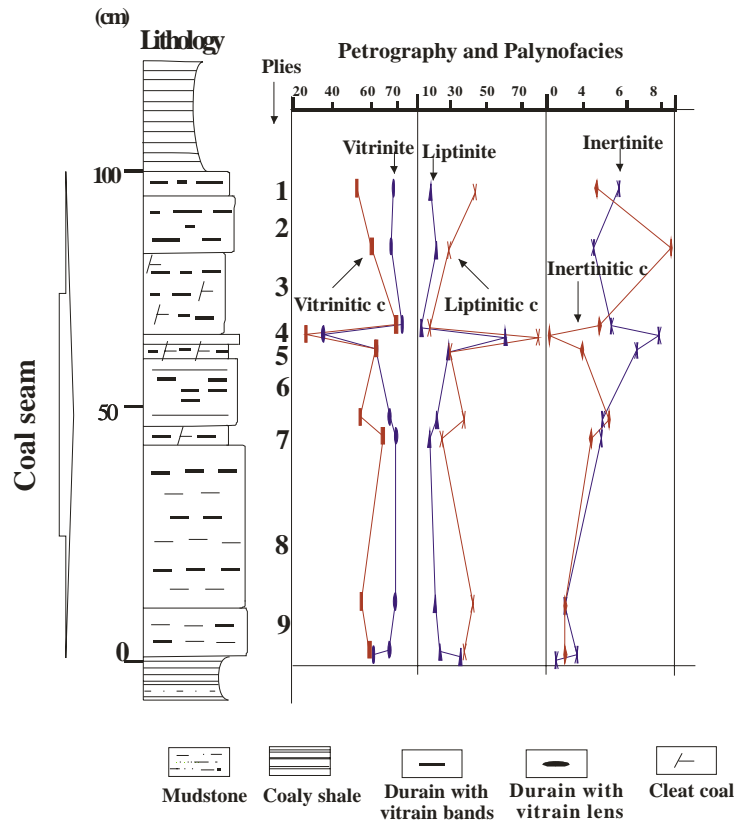


Fig. 5.4. Mina el Bloque, manto 3. Correlación entre los resultados de petrografía y palinofacies.
Mine El Bloque, seam 3. Correlation between petrography and palynofacies results.

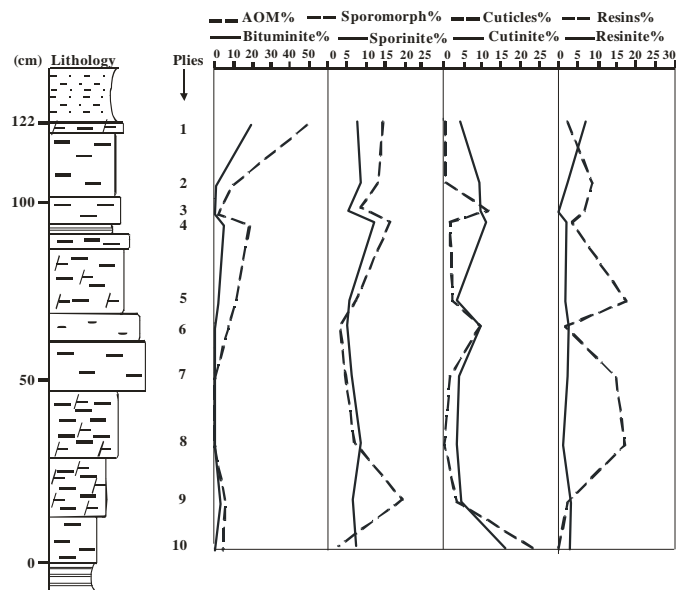


Fig. 5.5. Mina El Bloque, manto 1. Relación entre los resultados de los componentes liptínicos obtenidos en petrografía y en palinofacies.
Mine El Bloque, seam 1. Relationship between liptinitic components obtained in petrography and palynofacies.

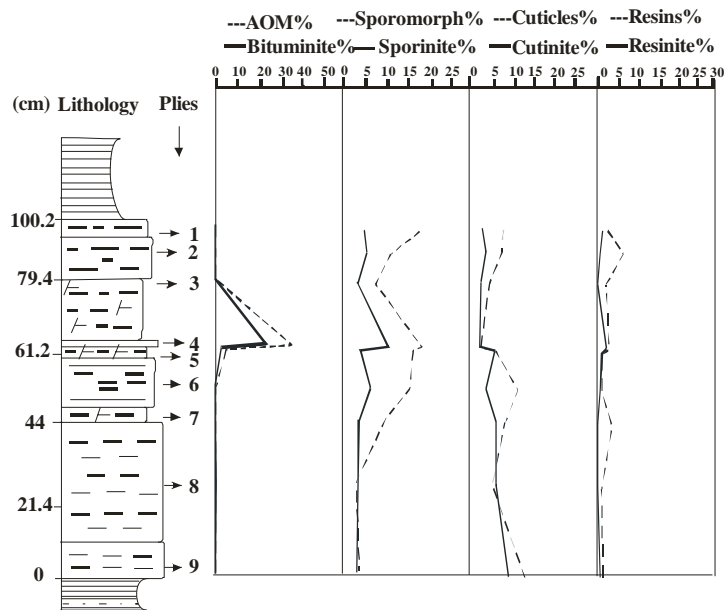


Fig. 5.6. Mina El Bloque, manto 3. Relación entre los resultados de los componentes liptiniticos obtenidos en petrografía y en palinofacies.

Mine El Bloque, seam 3. Relationship between liptinitic components obtained in petrography and palynofacies.

Normalmente dependiendo del tipo de resinita, el porcentaje se incrementa o disminuye en palinofacies, Así por ejemplo, la muestra 1 la cual tiene resinitas oil (Teichmuller, 1989), desaparecen en palinofacies porque ellas son solubles, así el porcentaje de estas en palinofacies disminuye. Por el contrario, algunas resinitas que aparecen en agregados en petrografía (rosarios), se separan en palinofacies y son fácilmente identificadas y contadas, por esta razón el porcentaje en palinofacies se incrementa.

Para carbones ricos en hidrógeno, como esos de la Formación Amagá, el análisis comparativo entre petrografía y palinofacies permite que algunos componentes tales como resinita oil, vitrinita perhidros y esporas de hongos sean identificados, los cuales con análisis petrográfico solamente son difíciles de identificar claramente. Además, se pueden diferenciar algunas asociaciones de componentes típicos de rocas fuentes tal como materia orgánica amorfa de color rojizo con esporomorfos (*Ciclusphaera* y *Spirosyncolpites spiralis* con pocas esporas de hongos; ver anexo).

5.1.3. Interpretación ambiental

Estudios de interpretación ambiental en carbones

De acuerdo a Galloway & Hobday, 1983, muchos carbones formados detrás de la barrera son delgados, discontinuos, altos en sulfuro, nitrógeno y cenizas, pero en algunos casos son comercialmente importantes porque a veces el azufre pirítico se encuentra en la parte superior del manto. Las arcillas que se encuentran debajo de las turbas detrás de la barrera están desprovistas de laminación y tienen un alto contenido de caolinita debido a lixiviación de montmorillonita por aguas ácidas que drenan las turbas suprayacentes (Staub & Cohen, 1978 tomado de Galloway & Hobday, 1983).

Aunque muchos trabajos se han hecho tratando de interpretar los ambientes de depositación del carbón con base en el estudio de los macerales y de los microlitotipos (Teichmuller, 1962, 1982; Donaldson 1969; Smyth 1979, 1980a, 1984, Styan & Bustin, 1983 a, b; Harvey & Dillon, 1985; Diessel 1986, 1992; Cohen et al., 1987, Calder 1991; Kalkreuth et al., 1991, Kolcon 1999, Singh et al., 2000 y Gmur, et al., 2002, etc.), los resultados son controvertidos. La petrografía no permite discernir completamente los diferentes tipos de materia orgánica que conforman el carbón y en especial cuando estos tienen porcentajes altos de materia mineral y cuando se trabaja con carbones que ya han sufrido transformación de la materia orgánica durante el proceso de carbonificación (mayores de 0.5% de

reflectancia de la vitrinita). Muchos de los componentes que se denominan inertinitas y que se interpretan como resultado de la oxidación en condiciones de turba oxidantes, en petrografía podrían corresponder a bitumen resultante de la transformación de dicha materia orgánica.

Varios autores han demostrado la efectividad de combinar la petrografía y la palinología para la reconstrucción del paleoambiente de la turba formadora del carbón (Eble & Grady, 1993; Calder, 1993; Mastalerz *et al.*, 2000; Eble *et al.*, 2003; y otros). La clasificación de las turbas se basa generalmente sobre la hidrología, específicamente sobre la fuente (agua subterránea y/o agua de lluvia), composición y concentración iónica del agua. Los pantanos formadores de turbas se clasifican en retrótróficos (forma planar), ombrotótróficos (forma convexa) y mesotótróficos que es un intermedio entre los dos anteriores. En general los pantanos retrótróficos reciben recarga tanto del agua subterránea como del agua de lluvia, y los pantanos ombrotótróficos reciben recarga solamente del agua de lluvia.

Calder *et al.*, 1991 (en Calder, 1993), definen un índice de agua subterránea (sus siglas en inglés Ground Water Indice, G.W.I) como una relación de gelovitrinitas + detrovitrinitas (tejidos degradados física y bioquímicamente) + materia mineral contra telinita + colotelinita (tejidos estructurados y parcialmente estructurados). Aunque se discute la exclusión de corpogelinita por su origen incierto y el de la detrovitrinita por su posible afinidad con celulosa. Altos índices de influencia del agua subterránea correlacionan con altos contenidos de ceniza.

Según varios autores (Robert & Chamley, 1991; Robert & Kenett, 1992; Adatte *et al.*, 2002; Van V. St. *et al.*, 1997; Keller *et al.*, 2002; Kuhn *et al.*, 2001; Hallam, 1975; Hallam *et al.*, 1991; Deconinck *et al.*, 1982, 1985 y 2003; Eignal & Ruffel 1990; Fursich *et al.*, 2005), la mineralogía de las arcillas se puede utilizar en la interpretación paleoclimática de rocas de diferentes edades. Así, la composición de los minerales arcillosos de las lutitas de los techos, algunas bases e intercalaciones de los mantos de carbón estudiados, indican clima húmedo cálido con fluctuaciones en las condiciones del nivel freático.

El estudio palinológico detallado de mantos de carbón pueden contribuir al conocimiento de los cambios en la composición florística de los bosques en medios inundables durante periodos bastante cortos. En la mina Palomos de la Formación Amagá, cerca de las minas estudiadas, 1.5 metros de carbón corresponde a la depositación de turbas durante un intervalo de tiempo de aproximadamente 15.000 años (Muñoz, *et al.* 2004). Estos autores trabajaron la palinología detallada del manto 1 de la mina Palomos, en el cual se hace una primera aproximación al estudio palinológico de los carbones, a partir de la descripción de la paleoflora y se define la afinidad botánica de los granos de polen y esporas más comunes en estos mantos. Sin embargo todavía hace falta mucho trabajo de detalle para lograr entender el comportamiento de la materia orgánica durante la depositación en la turbera.

La siguiente tabla presenta un resumen de los morfogéneros más importantes de la formación Amagá con su respectiva afinidad botánica y ambiente en el cual se encuentran. Y en la figura 4.48 se tiene un ejemplo de la variación vertical de los esporomorfos en el manto 3 de la mina el Pontón.

Un referente actual el cual cumple con muchas de las posibles características de la depositación de los carbones de la Formación Amagá, es el trabajo de Del Valle (2000) sobre los bosques de guandal del delta del Río Patía. En este delta, la llanura deltáica superior es el área no afectada por la marea y por lo tanto, esta sometida a la dinámica fluvial normal con la formación de los cordones areno limosos adyacentes a los cauces de los ríos, diques y detrás de ellos, las planicies de inundación con sustrato turboso donde se asientan los bosques de guandal. La transición entre la planicie deltáica mareal y la planicie deltáica superior esta ocupada por sustratos de limos orgánicos con o sin turbas; es este el hábitat de los natales.

Morfogéneros	Afinidad	Ambiente en el cual se encuentran
Angiospermas		
Psilatricolpites		
Retitricolpites	Posiblemente de la familia Bombacácea y Rubiácea (árboles y arbustos)	Bosques pantanosos, bosques tropicales húmedos y bosques secundarios
Striaticolpites	Familia caesul pinaceae, género crudia	Están asociados a sistemas ribereños y de baja altitud
Psilatricolporites	Familia Euphorbiaceae tales como alchornea hura y sapium (genero de aprox. 120 especies de árboles y arbustos)	Crecen en tierras húmedas bajas. Distribuidos en las regiones tropicales y sub-tropicales del Neotrópico
Psilatricolporites Transversalis	Chrysophyllum es un género muy grande de árboles tropicales (150 especies), especialmente bien preservados en el neotrópico	Crecen en bosques húmedos tropicales inundables de tierras bajas
Psilabrevitricolporites	Familia Bombacaceae	Esta relacionado con tipos de Momipites y Kurtzipites
Palmas		
Psilamonocolpites	Familia arecacea	
Echimonocolpites	Familia arecacea, genero Mauritia.	Se establece en zonas planas con inundación permanente a un nivel freático muy alto.
Retimonocolpites		
Longapertites	Probablemente derivado de una especie de palma	
Helechos		
Verrucatosporites Usmensis	Familia Polydodiaceae. Genero Striamonocolpites Afinidad familia camombaceae, genero cabomba, es un genero de 6 especies de hierbas acuáticas	Se presentan en áreas tropicales calientes del nuevo mundo.

Tabla. 5.1. Morfogeneros más comunes en los carbones de la Formación Amagá con sus respectivas afinidades botánicas y ambientes de depositación (modificado de Muñoz, 2004).

Most common morphogenuses in coals from the Amagá Formation, with respective botanical affinities and depositional environment (modified from Muñoz, 2004).

Los bosques de guandal no corresponden a un tipo único de vegetación; realmente representan un complejo de asociaciones. Entre los más característicos, se encuentran sajalas, cuangariales, naidizales, guandales mixtos y otras asociaciones (Del Valle & Urrego, 2002). Cuando las aguas salobres entran a los guandales, la mayoría de sus especies vegetales mueren, ya que el ingreso de agua salada a las depresiones turbosas de los guandales provoca el reemplazamiento de las especies del guandal por las del natal y del manglar. Mas que inundables, éstos bosque son inundados porque durante todo el año el nivel freático flutúa pocos decímetros en torno de la superficie del suelo, de acuerdo con el ritmo de las lluvias.

Algunos de los mantos estudiados cumplen con la descripción de Galloway & Hobday (1983). Así por ejemplo, el manto 3 de la Mina el Pontón tiene contenidos de azufre que llegan hasta el 6.8% en la parte superior del manto. Además presenta intercalaciones de lutitas carbonosas. De igual manera en el manto 2 y 3 de la mina el Bloque y manto 2 de la mina Nechi el contenido de azufre tiende a incrementarse hacia el techo de los mantos, e igualmente este último manto tiene intercalaciones arcillosas. Mientras que el manto 1 de la mina Nechí y el manto 3 de la mina el Arenal presentan incrementos menores hacia el techo del contenido de azufre, lo cual sugiere variaciones importantes no sólo verticales sino también laterales en las condiciones de depositación de los mantos de carbón de la Formación Amagá.

Una de las razones por las cuales no se ha aceptado totalmente que la Formación Amagá tiene influencia marina es por la ausencia de organismos de origen marino, sin embargo es claro que en algunas ocasiones es posible no tener estas evidencias debido a que en muchos casos, las caparzones de foraminíferos están ausentes en muchos sedimentos deltáicos y en la mayor parte de los sedimentos prodeltáicos (Ercegovac and Kostie, 2006).

Si se tomaran estos datos totales, en donde se observa que el porcentaje de macerales vitriníticos en la mayoría de las muestras supera el 70%, el de liptinitas es inferior al 30% y las inertinitas no superan el 5%, lo que estarían sugiriendo es que las condiciones de depositación de los mantos de carbón serían muy homogéneos, cuando la realidad, es que se presentan fluctuaciones importantes en algunos mantos como se ve en la zonación de los mantos 1 y 3 de la mina el Bloque, manto 2 de la mina Nechi y el manto 3 de la mina el Pontón, los demás mantos son más homogéneos.

Debido a que el manto 3 de la mina El Pontón es el más espeso, el que mayor número de muestras tiene y el que presenta la mayor variabilidad vertical, se describirá con el fin de definir las condiciones en las cuales se pudo haber depositado, basado en la bibliografía antes expuesta.

Características petrográficas, y químicas del manto 3 de la Mina el Pontón

Las asociaciones de litotipos dominantes son durenos con pequeñas bandas y lentes de vitreno; no se encuentra fuseno (Fig. 5.7). Las asociaciones de litotipos (plies) varían entre 3 y 46 cm y el manto de carbón posee un espesor de 240 cm.

Los litotipos están compuestos predominantemente de vitrinitas 69% y seguido del grupo de la liptinita con porcentajes mayores del 15%. Las asociaciones de litotipos con mayor porcentaje de vitrinita están en los niveles 4 y 5 con contenidos de 99.0 y 83.5% respectivamente. Los niveles con mayor contenido de liptinitas son 2 y 6 con 89.7% y 60.2% respectivamente y están compuestas principalmente de bituminita y MO+MM. Los contenidos de materia mineral en los carbones varían entre 1.8 y 21.5%, pero la mayoría de los plies tienen porcentajes menores del 5%. Las mayores concentraciones corresponden a los niveles 3 y 6 con el 21.5 y el 9.8% respectivamente. El contenido de inertinitas es muy bajo < 5%, y está representado esencialmente por el maceral funginita.

Teniendo en cuenta las características petrográficas generales de los mantos de carbón, se observa que los macerales vitriníticos comunes y que aparecen en mayor cantidad son la colotelinita y colodetrinita, esos dos macerales en palinofacies corresponderían a los tejidos bien preservados y a los tejidos delgados, los cuales estarían indicando alto grado de preservación de la materia orgánica en la turbera. Dentro de los macerales liptiníticos comunes y que aparecen en gran cantidad en la mayoría de las muestras son la liptodetrinita, esporinita y cutinita, que en palinofacies corresponden a partículas pequeñas dispersas, granos de polen, esporas y cutículas delgadas.

En los macerales inertiníticos comunes y que aparecen en la mayoría de las muestras son la funginita y la inertodetrinita, en palinofacies, estas corresponderían a esporas de hongos y partículas irregulares oscuras. Aunque la realidad es que no existe la relación entre lo visto en petrografía y lo observado en palinofacies. Como los porcentajes de estos componentes normalmente son muy bajos, de igual manera, indican alto grado de preservación de tejidos.

Las arcillas son predominantemente caoliníticas 45- 93%, seguidas por las micas 0-36% y la clorita 0 – 28%, la esmectita es escasa y solo aparece en dos muestras y las intercalaciones, solo aparecen en 5 muestras con porcentajes menores al 13%.

El método de preparación de las palinofacies de carbones y lutitas carbonosas implementado permite desagregar los componentes orgánicos que se encontraban íntimamente ligados, de tal modo que es posible identificar cada una de las partículas orgánicas tanto en los carbones como en las lutitas. De igual forma se logran ver perfectamente las variaciones verticales a lo largo de un manto de carbón y sus lutitas asociadas. Así el aporte más importante de las palinofacies al estudio ambiental es que se

puede ver la composición de la materia orgánica y el grado de preservación que esta presenta. Dichas características están directamente relacionadas con el ambiente de depositación.

Para la interpretación ambiental se tomaron los resultados de los análisis de palinofacies. Estos presentan una zonación más clara que la de la petrografía y la de esporomorfos: en el primer caso, muchas partículas se encuentran íntimamente ligadas en la matriz vitrinitica, bituminitica o de materia mineral; en el segundo caso, se da igual valor a una muestra pobre en granos de polen que a otra en donde sean muy abundantes como es el caso de muchos plies de los mantos estudiados. Sin embargo, también dan mucha información que ayuda a entender el tipo de vegetación que prevaleció durante la formación de la turba.

En el manto 3 de la mina el Pontón se ve variación en el contenido de componentes vitriníticos, liptiníticos e inertiníticos, de tal modo que de la base al techo del manto, se pueden definir 9 zonas, las cuales estarían representando variaciones en las condiciones de depositación y en especial del nivel freático y del tipo de materia orgánica presente, (Fig 5.7):

- La zona I incluye el ply 15, el cual es una lutita, en donde se observa predominio de cutículas delgadas;
- La zona II corresponde a los plies 12, 13 y 14, y se caracteriza por ser homogénea en cuanto a los totales de componentes vitriníticos, liptiníticos e inertiníticos, pero se ve un aumento en el contenido de tejidos bien preservados; presencia de rosarios; ausencia de tejidos irregulares y muy pocos esporomorfos;
- La zona III que incluye los plies 10 y 11, se caracteriza por la disminución de componentes vitriníticos y el incremento de los componentes liptiníticos e inertiníticos, a su vez se incrementan las partículas irregulares de color pardo formadas por otras partículas y la disminución de tejidos bien preservados; aquí se observa mayor número de esporomorfos;
- La zona IV, abarca los plies 8 y 9, los cuales presentan condiciones más o menos homogéneas;
- La zona V consiste de las lutitas (plies 6 y 7), se observa un incremento en el contenido de componentes liptiníticos, el cual esta influenciado por la abundancia de partículas delgadas y de partículas de superficie rugosa;
- La zona VI corresponde al ply 5, la cual equivale a una disminución de los componentes vitriníticos y aumento de los liptiníticos, pero en especial de la cutinitas delgadas;
- La zona VII representa al ply 4 que corresponde al mayor porcentaje de componentes vitriníticos;
- La zona VIII, se caracteriza por la disminución de componentes vitriníticos y aumento de los liptiníticos;
- La zona IX corresponde a las lutitas 1 y 2, que se caracterizan por la abundancia de materia orgánica amorfa, *spiroyncolpites* y partículas de superficie rugosa.

Aquí se podría asimilar el contenido de tejidos bien preservados y de tejidos delgados a mayor preservación de la materia orgánica dentro de la turbera; mientras que la presencia de partículas irregulares estarían asociados a condiciones más reductoras donde actuaron libremente las bacterias, pero no los hongos, haciendo que en estos lugares se tenga enriquecimiento en componentes lípidos que incrementan el índice de hidrógeno; mientras que en donde aparecen los hongos en relativamente mayores cantidades, también hay deterioro de la materia orgánica, pero en unas condiciones más oxidantes.

El cambio de condiciones un poco más oxidantes a más reductoras podría estar influenciado por la entrada esporádica de aguas saladas que disminuirían el pH de la turbera, favoreciendo la proliferación de las bacterias.

En las lutitas se ve predominio de cutículas, posiblemente porque corresponderían al resultado de la alteración de los tejidos vitriníticos. De otro lado se observa relación entre los tejidos bien preservados y la mayor cantidad de granos de polen psilados, lo cual es lógico, ya que estos son más delicados. La materia orgánica amorfa normalmente esta asociada a granos grandes y ornamentados en mucha

mayor cantidad como es el caso de los plios 1 y 4 del manto 1 y 3 de la mina El Bloque respectivamente, y de los plios 2 y 3 del manto 3 de la mina el Pontón.

Se nota que el contenido de azufre no afecta el grado de preservación de la materia orgánica, ya que la muestra 3 y 14 del manto 3 de la mina el Pontón que presentan porcentajes de partículas irregulares parecidos tienen contenidos de azufre totalmente diferentes (6.8 y 0.7) respectivamente.

Dentro de los morfogéneros aquí presentados (Fig. 5.8), son particularmente comunes en algunas muestras la *Ciclusphaera* y el *Spirosyncolpites spiralis* (este último es característico de las turbas de guandal y el primero al parecer corresponde a una palma (comunicación oral de Parra N, 2006). También aparece el *Zonocostites ramonae*, el cual se ha asignado a árboles de manglar (West, 1957 en Lorente 1986).

El predominio de esporas se considera un indicativo de la entrada de agua fresca (Parry et al., 1981). En este caso solamente en la parte inferior del manto 3 de la mina el Pontón y de la mina el Arenal se tendría evidencia de entrada de agua fresca a la turbera. Debido a que la influencia de los hongos es relativamente baja y en la mayoría de los casos es insignificante, es posible afirmar que durante la formación de la turba las condiciones fueron esencialmente reductoras, ya que la fuerte degradación de hongos es típica de ambientes óxicos (Hart, 1986). Las angiospermas crecen en diversos hábitats, incluyendo bosques pantanosos, bosques tropicales húmedos y secos de baja altitud.

Las observaciones de campo y la examinación petrográfica y palinológica sugieren que la paleoturba que originó los carbones del manto 3 de la mina el Pontón estaba asociada principalmente a condiciones reotróficas (pantano planar) con altos niveles freáticos. Los valores más altos del nivel freático en los carbones se presentan justamente debajo de la influencia clástica (niveles 3 y 8), coincidiendo también con más altos índices de hidrógeno (pirólisis Rock-Eval), materia mineral (vista al microscopio), cenizas y azufre (obtenidos mediante los análisis próximos). El agua subterránea contiene niveles más altos de concentración de iones y nutrientes que el agua de lluvia (Eble et al., 2003), el cual podría contribuir a la formación de minerales autigénicos en el carbón.

Petrográficamente, el principal tipo de pirita que se observó en el manto 3 de la mina el Pontón fue pirita de forma framboidal y en cristales euhedrales. Estos son tipos de pirita singenética que se forma tempranamente con la acumulación de la turba (Eble et al., 2003). Esto indica que el agua que cubría la turba del manto 3 el Pontón fue ligeramente básica, ya que la bacteria que forma la pirita framboidal es incapaz de estar bajo condiciones muy ácidas (Tylor et al., 1998). Además la pirita se forma únicamente bajo condiciones reductoras, ya que en presencia de oxígeno, el hierro siempre formaría óxidos en vez de sulfuros. Las condiciones reductoras son también sugeridas por el bajo contenido de inertinitas, lo cual en general indica una falta de oxidación dentro de la turba. El contenido de cenizas, azufre y petrología son consistentes con las características de un pantano planar (“planar mire”; Eble & Grady, 1993).

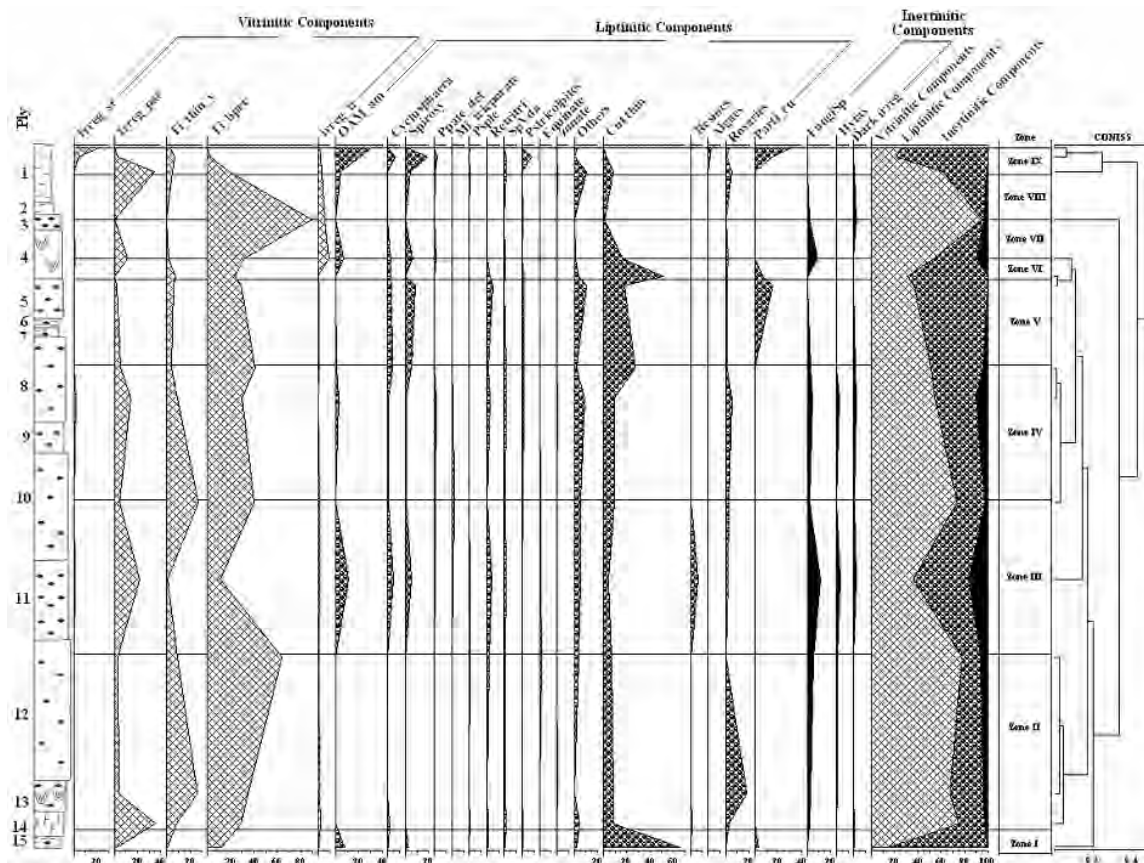


Fig. 5.7. Distribución de palinofacies en el manto 3 de la mina El Pontón.
Palynofacies distribution in seam 3 of El Pontón Mine.

De acuerdo a su afinidad taxonómica los morfogéneros de granos de polen y esporas fueron agrupados en tres categorías principales (Fig. 5.8), tal como angiospermas dicotiledóneas, angiospermas monocotiledóneas (palmas), criptógamas (pteridofitas – helechos). Palinológicamente el manto 3 el Pontón presenta mayor cantidad de granos de polen de angiospermas, seguido por granos de polen de palma y por último de esporas que corresponderían a helechos. Las lutitas de este manto se caracterizan por presentar partículas de superficie rugosa transparente (niveles 1-2, 6-7 y 15).

La paleovegetación que hizo parte de los pantanos que generaron la turba son de condiciones principalmente fluviocontinentales como lo evidencian la gran cantidad de granos de polen psilados tricolporados y psilados monocolporados. Los granos de polen de palma tales como *Mauritiidites fransiscoi* se desarrollan en zona bajas con medios pantanosos y cenagosos en climas húmedos y cálidos permanentemente inundados (Lorente, 1986). La presencia de *Zonocostites ramonae* junto con escasos dinoflagelados indican que los carbones estuvieron abiertos a incursiones marinas. Los *Zonocostites* actualmente son originados por diferentes especies de *Rhizophora*, que es uno de los más importantes géneros de la vegetación de manglar (West, 1957 en Lorente, 1986).

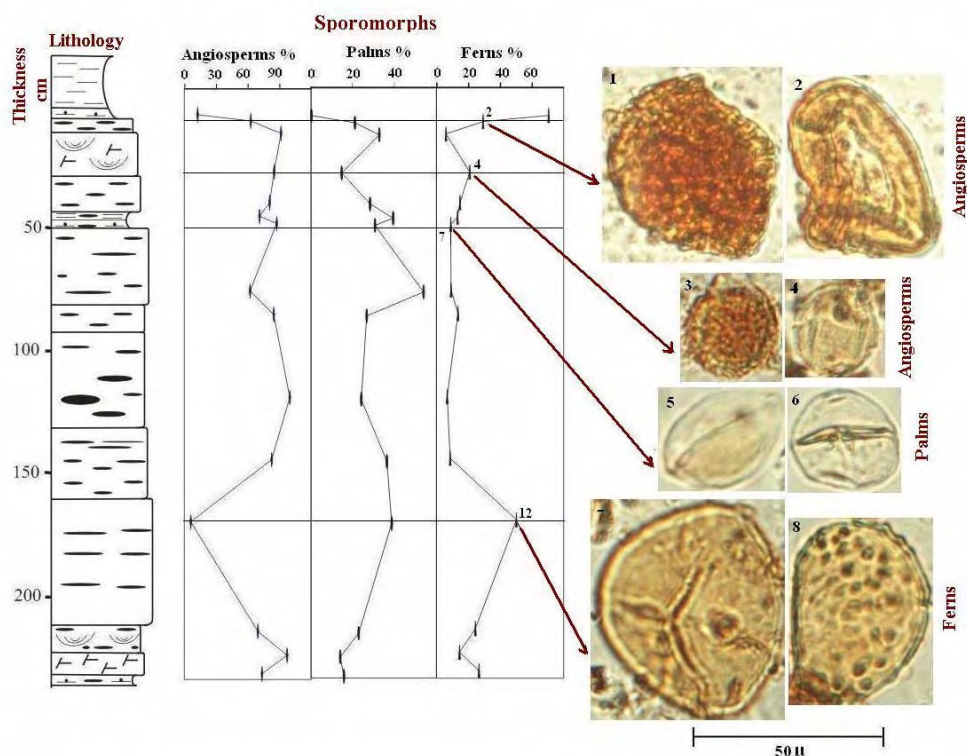


Fig. 5.8. Variación vertical de los esporomorfos en el manto 3 de la mina El Pontón.

1. *Spirosyncolpites spiralis*; 2. *Ciclusphaera euribei*; 3. *Retitricolporites irregularis*; 4. Microreticulado tricolporado; 5. *Psilamonocolpites* sp 1; 6. *Psilamonocolpites* sp 2; 7. Espora trilete; 8. *Verrucatosporites usmensis*.

Vertical variation of sporomorphs in seam 3 of El Pontón Mine.

1. *Spirosyncolpites spiralis*; 2. *Ciclusphaera euribei*; 3. *Retitricolporites irregularis*; 4. Microreticulate tricolporate; 5. *Psilamonocolpites* sp. 1; 6. *Psilamonocolpites* sp. 2; 7. Trilete spore; 8. *Verrucatosporites usmensis*.

Considerando que la caolinita representa condiciones de clima cálido húmedo, es posible afirmar que la mayoría de las muestras analizadas están indicando condiciones húmedas y cálidas para todos los mantos con algunas variaciones en cuanto a estos dos parámetros. Se nota también que la muestra de carbón que tiene el mayor contenido de esmectita, estaría indicando condiciones de baja erosión de horizontes de suelo formados durante largos periodos de tiempo (Hallam, 1975; Hallam et al., 1982, 1985 y 2003; Wignall y Ruffel, 1990 en Fursich et al., 2005).

En algunos plies de los mantos analizados sobresalen características diferentes a los demás debido a la abundancia de componentes liptínicos, los cuales están representados por materia orgánica amorfa y enriquecimiento en *Ciclusphaera* y *Spirosyncolpites*, en dichos plies también son frecuentes las corpogelinitas y un supuesto mayor contenido de inertinitas vistas en petrografía, pero no en palinofacies. Dichos plies se pudieron haber formado bajo condiciones mucho más reductoras que los plies que son enriquecidos en vitrinitas, con la influencia de incursiones de aguas saladas en donde actúan las bacterias con mayor severidad, permitiendo una buena preservación de materiales ricos en lípidos (Ercegovac & Kostic, 2006).

En resumen, los carbones del manto 3 el Pontón se generaron en zonas bajas, con altos niveles freáticos y en condiciones estuarinas o de delta inferior, donde se acumuló gran cantidad de materia

orgánica terrestre y abierto a incursiones marinas como lo respaldan principalmente la presencia de *Zonocostites ramonae* y dinoflagelados. De acuerdo con esto se validan las interpretaciones dadas por Dueñas (1983) Escobar & Rozo (1984), Escobar (1990) y Blandón & Arango, 2005, que proponen que los carbones y rocas asociadas al Miembro Sabaletas de la Formación Amagá estuvieron abiertos a incursiones marinas y se formaron cercanos a la línea de costa.

Con los resultados obtenidos también se confirman las observaciones hechas por Muñoz et al., (2004), en donde en un mismo manto de carbón se encuentran evidencias de formaciones vegetales inundadas muy distintas. Y que en los trópicos la migración de la vegetación puede ser rápida al cambiar las condiciones ambientales, las cuales están directamente relacionadas a fluctuaciones en el nivel freático. Se comprueba la conclusión de Muñoz et al., (2004) con respecto a la variación no solo en la vegetación sino en los niveles de inundación de la turbera y se confirma que las lutitas presentan porcentajes de granos de polen de palmas en mayor cantidad que los carbones.

Los niveles arcillosos en general se caracterizan por una mayor abundancia de granos de polen de palmas, lo cual confirma la sospecha acerca de esta situación en las muestras del manto 1 de Palomos: como las arcillas indican depositación durante periodos de inundación de la llanura, esta observación confirma el ambiente de inundación permanente relacionado a los morichales (Muñoz et al., 2004).

5.2. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA MATERIA ORGÁNICA DE ROCAS CARBONOSAS Y DEL CARBÓN COMO ROCAS FUENTES DE PETRÓLEO

Aquí se hace una comparación entre los resultados, de los diferentes análisis, con el fin de determinar que tipo de ellos es más útil para evaluar el potencial de generación.

5.2.1. Análisis de mantos totales (Fig. 5.9 y Tabla 5.2)

Cuando se analizan los mantos totales (1, 2 y 3) a lo largo de una columna estratigráfica, como la del miembro medio de la Formación Amagá, la humedad y las materias volátiles están directamente relacionadas al rango y no al tipo de MO, ya que aquí se tiene una mezcla.

Se observa que a medida que se profundiza en la columna estratigráfica de las minas El Bloque y Nechí, se tiene menos IH y mayor S1, indicando esto una homogenización de la materia orgánica y un pequeño aumento en la madurez que se ve reflejado en el mayor S1. En las muestras de los mantos 1, 2 y 3 de la mina El Bloque y en los mantos 1 y 2 de la mina Nechi, existe una relación directa entre la humedad, las materias volátiles y el IH, así a mayor profundidad en la columna se tiene menor humedad y contenido de MV. En cambio el contenido de S1 es más dependiente del tipo de MO.

Al comparar los datos de petrografía con los de pirolisis, para los mantos de las minas antes mencionadas, se observa relación entre los mayores contenidos de inertinitas y los mayores valores de S1, y entre el contenido de liptinitas y el S2. No existe buena correlación entre el IH y la humedad, y mucho menos entre la humedad y las MV (lac). Ya que éstas dependen del tipo de materia orgánica. En la mina Nechí se tiene un comportamiento inverso en el S1 posiblemente debido a que la calidad de la materia orgánica en esta muestra es diferente al de otras minas.

Al comparar los resultados de la mina el Bloque y Nechi se observa que presentan características diferentes como se ha demostrado al hacer la comparación teniendo en cuenta otros parámetros (Restrepo & Blandón, 2006).

Al comparar los extractos de bitumen con los demás parámetros petrográficos y geoquímicas no hay una clara relación en los mantos de la Mina el Bloque (Tabla 5.2). Pero en los demás mantos se observa que a mayor extracto de bitumen, menor contenido de hidrocarburos, y esta relacionado a un menor rango, lo cual podría indicar que a mayor rango ya se habrían transformado una mayor cantidad de hidrocarburos, y posiblemente que la materia orgánica en estos mantos es más homogénea.

Total seams	Vitrinite (Vol. %)	Liptinite (Vol. %)	S2	Inertinite (Vol. %)	S1	IH	Moisture	VM (daf)	Extract ppm	% HC
1 Bloque	69,8	25,5	132	2,1	1,18	204	10,1	47,8	47866	7,8
2 Bloque	75,4	17,7	104	2,7	1,47	200	8,7	47,6	42370	6,2
3 Bloque	72,7	24,4	122	2,8	1,49	192	8,3	46,2	79880	6,4
1 Nechi	63,4	30,8	127	3,9	1,30	196	9,8	48,8	85172	7,5
2 Nechi	75,7	22,6	111	1,7	0,99	182	9,4	47,3	70604	8,8
3 Ponton	77,0	21,1	118	1,9	0,85	183	10,4	47,4	60274	5,6
3 Arenal	70,0	25,8	125	3,7	1,12	196	9,7	46,8	46274	6,6

Tabla 5.2. Comparación de algunos resultados de análisis próximos, petrográficos y de pirolisis Rock-Eval de los mantos totales.

Comparison of proximate, petrographical and Rock-Eval pyrolysis data of total seams.

5.2.2. Análisis de plies

La figura 5.10 resume los resultados de pirolisis más importantes para los plies y las muestras totales de varios mantos de carbón y las lutitas asociadas del miembro medio de la Formación Amagá.

En esta misma figura, se pueden observar las diferencias entre los resultados obtenidos de los mantos totales con respecto al rango de variación que se observan en las muestras de los plies. También se ven claramente las diferencias entre los resultados de los carbones y las lutitas, razón por la cual se propone analizarlos por separado cuando se evalúan rocas fuentes de hidrocarburos.

5.2.3. Variación vertical de los plies del manto 3 de la mina El Bloque

Para ilustrar como es el comportamiento de la materia orgánica a lo largo de un manto de carbón, se tiene el manto 3 de la mina El Bloque, el cual presenta plies con buen y pobre potencial de generación de hidrocarburos. Igualmente se muestra de manera consecutiva los resultados de cada uno de los análisis efectuados y el aporte que cada uno de ellos brinda a la interpretación de las muestras con mejor potencial de generación.

En la figura 5.11, se puede observar la variación vertical de la humedad y las materias volátiles libres de agua y ceniza (MV (lac)) en el manto 3 de la mina el Bloque. Se destaca la muestra 4 la cual presenta el menor contenido de humedad (7,5%) y el mayor porcentaje de MV (55,8). En este caso a diferencia del análisis de los mantos totales el contenido de humedad y MV no dependen del rango sino del tipo de materia orgánica, de tal modo que se convierte en uno de los parámetros más sencillos a tener en cuenta para evaluar el potencial de generación de hidrocarburos, ya que normalmente se observó en todos los mantos analizados que las muestras que tienen menor humedad y mayor contenido de materias volátiles son las que presentan las mejores características como rocas fuentes de hidrocarburos.

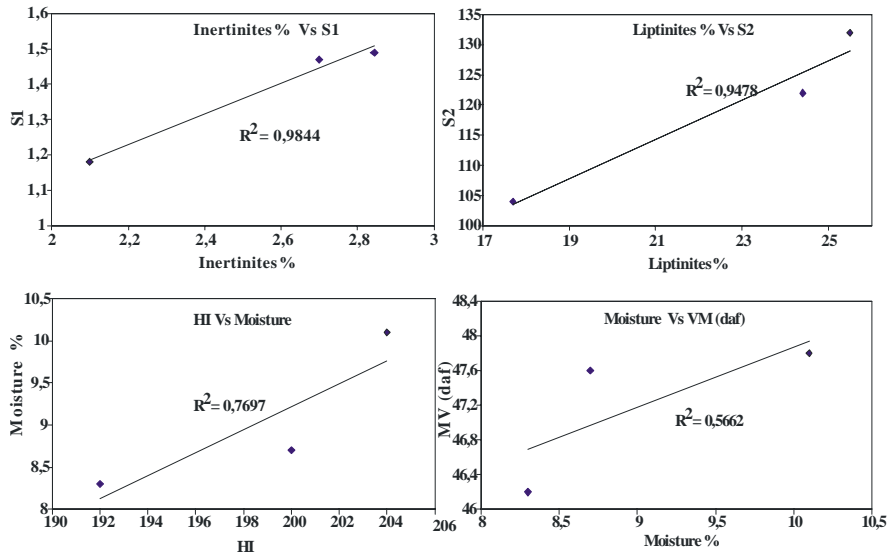


Fig. 5.9. Comparación para los mantos totales (1, 2 y 3) de la Mina El Bloque entre: A: el porcentaje de inertinitas y el valor de S1 de pirolisis Rock –Eval; B: el porcentaje de liptinitas y el valor de S2 de pirolisis Rock –Eval; C: El IH vs. Humedad; D: el porcentaje de humedad y las materias volátiles.

Comparison for total seams (1, 2 y 3) of El Bloque Mine between: A: percentage of inertinites and the S1 value from Rock-Eval pyrolysis; B: percentage of liptinites and the S2 value from Rock-Eval pyrolysis; C: HI vs. moisture; D: percentage of moisture and volatile matter.

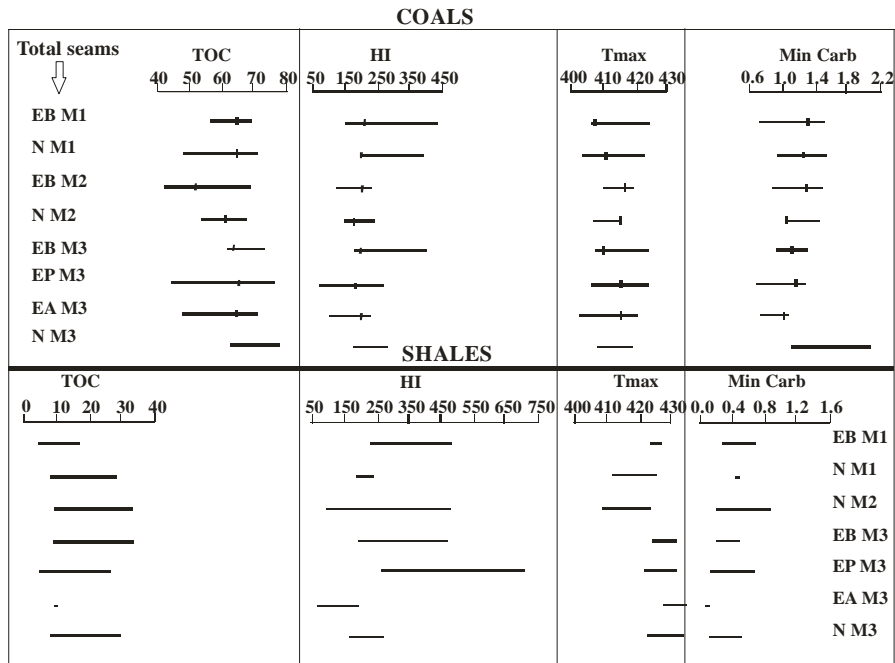


Fig. 5.10. Comparación de los resultados de pirolisis Rock-Eval entre los plies de carbones y las lutitas.
Comparison of Rock-Eval pyrolysis data between coals and shales plies.

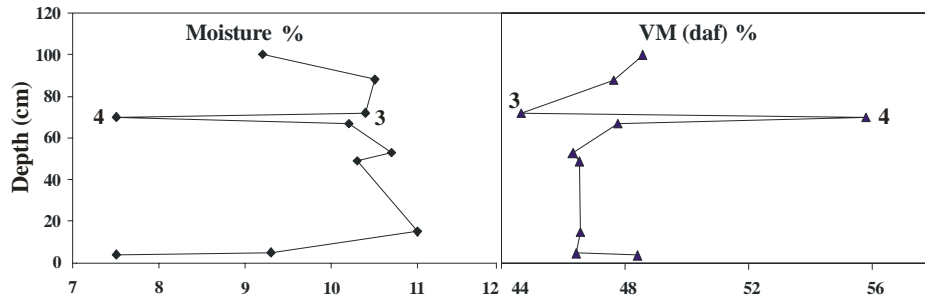


Fig. 5.11. Variación vertical de la humedad y las materias volátiles (lac) para el manto 3 El Bloque.
Vertical variation of moisture and volatile matter (daf) for seam 3 of El Bloque Mine

La figura 5.12 muestra las variaciones en los análisis elementales. Aquí es posible detectar la muestra que presenta el mejor potencial porque tiene los menores contenidos de oxígeno y nitrógeno y los mayores porcentajes de carbono e hidrógeno. Los resultados del contenido de nitrógeno logran separar muy bien la muestra con el menor potencial (3) de la de mejor potencial (4).

En la figura. 5.13, se puede observar la muestra 4 con el menor contenido de vitrinitas (36%) y el mayor porcentaje de liptinitas e inertinitas (57 y 7% respectivamente), la cual corresponde a la de mejor potencial. También se observa que la muestra con el menor potencial tiene un mayor contenido de vitrinitas y el menor porcentaje de liptinitas.

En la figura. 5.14, se muestran los resultados de los análisis de palinofacies; aquí se conservan las mismas proporciones de los análisis petrográficos, pero hay una mayor variación. Esto permite ver muy claramente las diferencias entre la muestra 3 y la 4 ya que la primera presenta los más altos porcentajes de componentes vitriníticos y los más bajos porcentajes de componentes liptiníticos, mientras que la muestra 4 es todo lo contrario o sea que presenta los menores porcentajes de componentes vitriníticos y los mayores porcentajes de componentes liptiníticos, además el porcentaje de componentes inertiníticos es el más bajo.

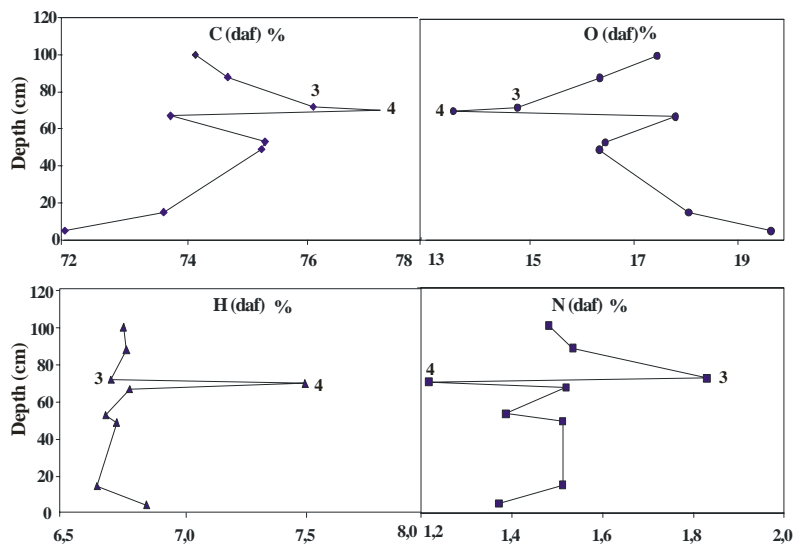


Fig. 5.12. Análisis elemental del manto 3 El Bloque
Ultimate analysis of seam 3 El Bloque.

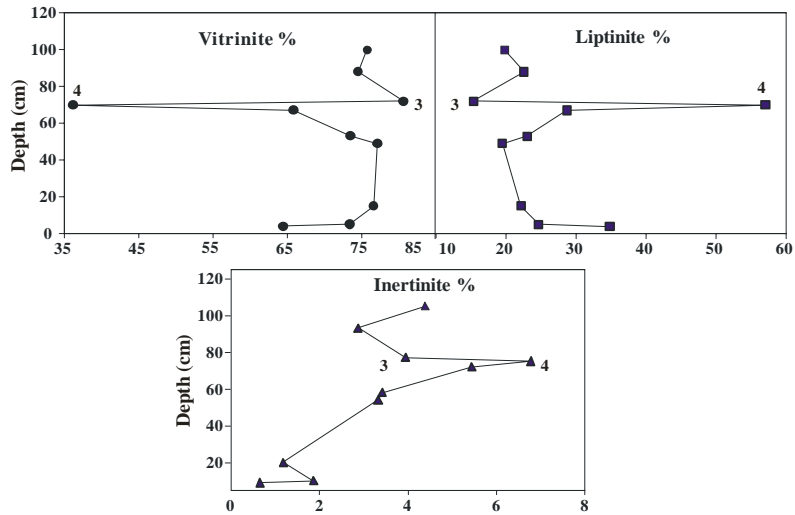


Fig. 5.13. Variación vertical de los componentes petrográficos del manto 3 de la mina El Bloque
Vertical variation of petrographical components in seam 3 of El Bloque Mine.

En la figura 5.15, se puede observar que la muestra con el más alto potencial (4) se caracteriza por presentar uno de los más altos contenidos de granos de polen de angiospermas y por el contrario la muestra que presenta el menor potencial (3) tiene granos de polen en cantidades importantes de helechos y palmas. Estos resultados están de acuerdo con los estudios de Isaken et al. (1998) y Petersen y Nytoft (2006) en donde ellos llegan a la conclusión que los carbones derivados de angiospermas tienen mayor potencial de generación que los carbones derivados de gimnospermas.

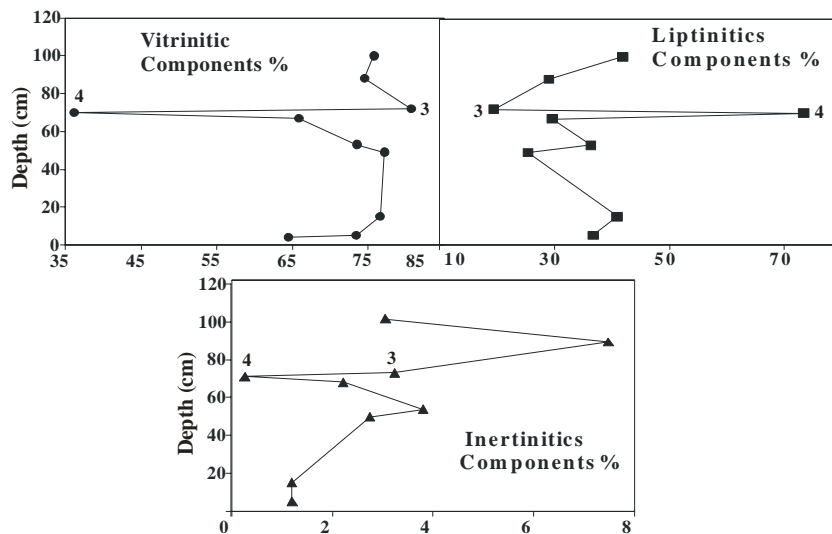


Fig. 5.14. Variación vertical de las palinofacies del manto 3 de la mina El Bloque.
Vertical variation of palynofacies in seam 3 of El Bloque Mine.

Si se comparan las gráficas de petrografía (5.13) con las de palinofacies (5.14) y de esporomorfos (5.15), se nota una relación inversa entre angiospermas y vitrinitas y componentes vitriniticos, ya que a mayor contenido de angiospermas, se observa un porcentaje menor en vitrinitas y a un contenido muy bajo de palmas concuerda con porcentajes altos en liptinitas, esto es especialmente notable para la muestra 4, la cual presenta el mejor potencial de generación.

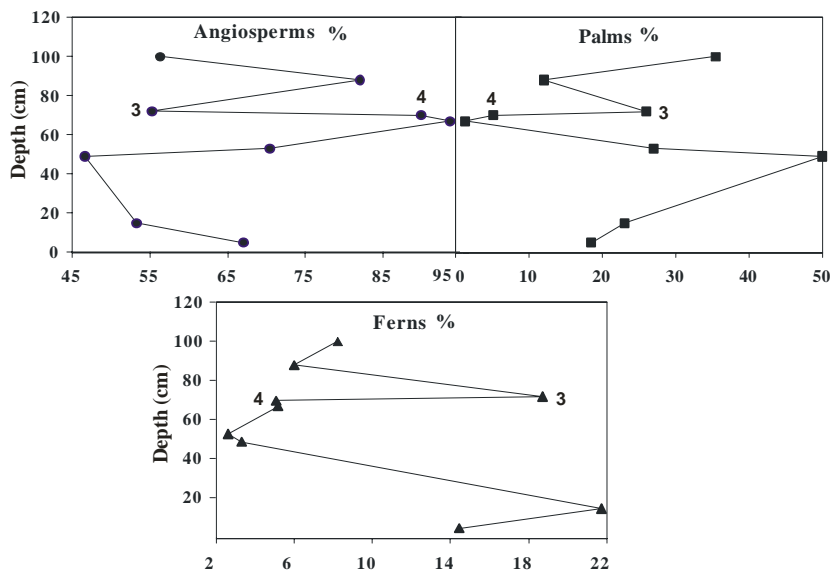


Fig. 5.15. Variación vertical de los esporomorfos en el manto 3 de la mina El Bloque.
Vertical variation of sporomorphs in seam 3 of El Bloque Mine.

La figura 5.16 muestra la comparación de la petrografía y las palinofacies. La diferencia más importante que se observa al comparar los datos de petrografía con los de palinofacies es que en general el contenido de vitrinitas es mayor en petrografía que en palinofacies, el contenido de liptinitas es mayor en palinofacies con respecto a la petrografía, y en las inertinitas existen muestras que presentan comportamientos totalmente contrarios y la diferencia se hace más notable en el ply 4. Esta situación se presenta en otros mantos, lo cual sugiere que es un parámetro a tener en cuenta en las rocas que tienen mayores posibilidades de generación. De otro lado, existen otras muestras que en petrografía tienen pocas inertinitas y en palinofacies, estas aparecen en mayor cantidad.

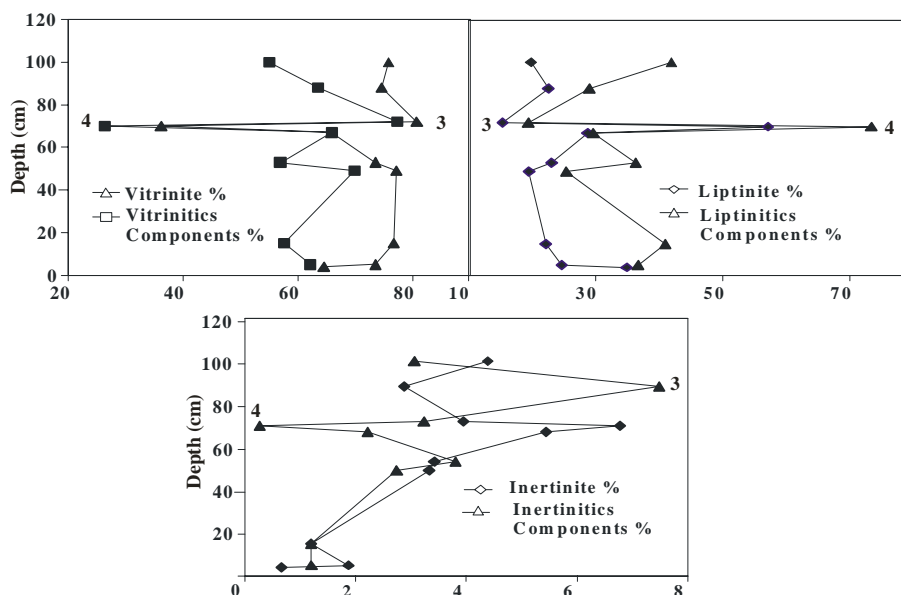


Fig. 5.16. Comparación entre los resultados de los análisis petrográficos y de palinofacies del manto 3 de la mina El Bloque.
Comparison between petrographical and palynofacies data in seam 3 of El Bloque Mine.

La tabla 5.3 presenta un resumen de algunos de los parámetros a tener en cuenta para caracterizar los plies de lutitas y carbones de bajo rango (sub-bituminosos) como rocas fuentes. Es necesario tener en cuenta que dependiendo del tipo y la cantidad de materia orgánica, la temperatura a la cual empiezan a expulsar hidrocarburos es variable; así por ejemplo los carbones que presentan las características antes expuestas empiezan a generar a temperaturas inferiores a 420°C, mientras que las lutitas asociadas

empezarían a generar por encima de dicha temperatura. De acuerdo a lo anterior y debido al efecto catalítico de la mayor cantidad de materia orgánica que poseen los carbones; éstos normalmente empezarían a generar hidrocarburos antes que las lutitas asociadas y debido a la mayor cantidad de M.O susceptible de convertirse en hidrocarburos, el tiempo durante el cual generarían petróleo sería mayor que para las lutitas.

Tipo de análisis	Carbones	Lutitas
Análisis próximos	Humedad residual menor de 10% Materia volátil (libre de agua y ceniza) mayor de 45%	
Pirólisis Rock-Eval	S1 mayor 1 S2 mayor de 100 Índice de hidrógeno mayor de 200 Carbono pirolizado mayor de 10%	S1 mayor de 0.2 S2 mayor de 50 Índice de hidrógeno mayor de 300 Carbón pirolizado mayor del 4% Contenido de materia orgánica mayor del 10%
Petrografía	Contenido de bituminita sobresaliente con respecto a los demás macerales liptiníticos. Presencia de resinitas oil. Mayor cantidad de inertinitas, corpogelinitas y colodetrinitas.	
Palynofacies	Desaparición de resinitas oil. Menor cantidad de inertinitas. Presencia de materia orgánica amorfa. Asociaciones típicas de esporomorfos tal como <i>Spirosyncolpites spiralis</i> y <i>Cyclusphaera euribei</i>	El tipo de resinita normalmente tiene una menor solubilidad que la de los carbones, ya que estas no se disuelven durante el proceso de preparación de las muestras. Los granos de polen en la mayoría de las muestras son poco ornamentados y con predominio de palmas y helechos y en muchos casos se encuentran menos preservados y en menor cantidad en comparación con la mayoría de los carbones.
En petrografía luego de la extracción	Disminución de la intensidad de la fluorescencia de las vitrinitas. Desaparición de las resinitas oil. Aparición de poros de diferentes tamaños dentro de la vitrinita y algunas liptinitas que indican la liberación de hidrocarburos. Es clara la alta solubilidad de las resinitas oil y de las vitrinitas, evidenciando no solamente la generación temprana, sino también la facilidad de expulsión. Se nota que otros macerales tal como cutinitas, esporinitas etc., permanece igual, indicando que requieren de mayor temperatura para ser liberados.	

Tabla 5.3. Parámetros para caracterizar los plies de lutitas y carbones de bajo rango de la Formación Amagá (Nota: El contenido de cenizas y azufre no están relacionados con el potencial de generación).

*Parameters characterizing low rang coal and shale plies from the Amagá Formation.
(Note: the ash and sulphur contents are not related to the generation potential).*

5.2.4. Resultados del índice V/R vs. el índice de hidrógeno

En la figura 5.17, con relación a la forma de la gráfica hay cierto grado de similitud, pero, puntos como los niveles 1, 5 y 6 presentan problemas al relacionar la fluorescencia con el índice de hidrógeno. Esto se podría explicar por las siguientes razones:

El nivel 1 presenta valores altos en bituminita. El nivel 5 tiene un color más anaranjado debido a la presencia de liptodetrinita, cutinitas y bituminita.

En el nivel 6 aunque tiene esporinitas no es clara la diferencia entre los colores de fluorescencia y el índice de hidrógeno.

Las líneas de tendencia muestran que a medida que se profundiza en el manto 1 de la Mina El Bloque, (plies 1- 12), la relación V/R es mayor, lo cual indica que predomina el color de fluorescencia verde; de otro lado, el índice de hidrógeno disminuye a medida que el color de fluorescencia se vuelve verde. En condiciones normales de maduración de la materia orgánica, a medida que se profundiza en la columna estratigráfica (en este caso un manto de carbón), el color de fluorescencia debería cambiar de verde a amarillo y en el caso de manto 1 El Bloque esto es inverso (Fig. 5.17), lo cual implicaría la inversión del manto. Lo anterior necesita verificarse con datos de campo relacionados con el resto de la columna estratigráfica.

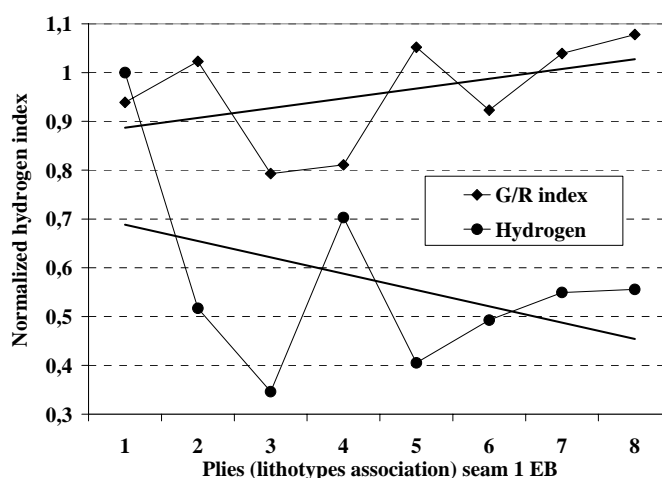


Fig. 5.17. Mina El Bloque, manto 1, índice de hidrógeno normalizado versus el índice V/R para cada ply.
El Bloque Mine, seam 1. Hydrogen index standardized vs. G/R index for each ply.

En la figura. 5.18 los plies 1 al 10 de M1 Nechi tienen comportamientos similares en cuanto a la fluorescencia y el índice de hidrógeno.

El ply 11 es contrario ya que tiene un índice V/R bajo que indica un color de fluorescencia rojizo o sea que es de baja fluorescencia, pero un índice de hidrógeno alto que puede ser por la presencia de bituminita, lo cual sugiere que aunque la fluorescencia sea baja, la aparición de este maceral en estas muestras se relaciona a altos índices de hidrógeno (> 250).

Las tendencias del manto 1 Nechi indican que son contrarias al M1 El Bloque, verificando esto que este último manto está invertido como lo demuestra el predominio del color verdoso de la fluorescencia en los plies más profundos de dicho manto.

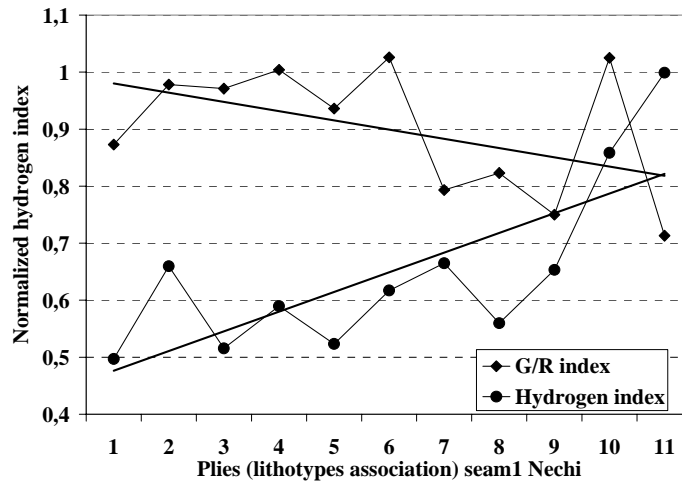


Fig. 5.18. Mina Nechi, manto 1. Índice de hidrógeno normalizado versus el índice V/R para cada ply.
Nechi Mine, seam 1. Hydrogen index standardized vs G/R Index for each ply.

El análisis de imagen del color de fluorescencia comparado al porcentaje de liptinitas y los datos de Rock-Eval (IH, S1/COT) muestran relaciones que pueden explicar el potencial de generación de HC. Por ejemplo, el ply de carbón 3 contiene el menor porcentaje de liptinitas, IH y S1/COT y menor intensidad de fluorescencia. Los plies de carbón 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 tienen características similares a las mencionadas antes, pero los plies 1 y 4 los cuales tienen los mayores IH, porcentajes de liptinitas y S1/COT, tienen una menor intensidad de fluorescencia (Fig. 5.19). Esto se puede deber a los siguientes factores:

1. Los bitúmenes expelidos durante la preparación de la muestra disminuyen la intensidad de fluorescencia, y
2. La captura y adquisición de las imágenes y la segmentación introducen algunos problemas en la representación de las palinofacies. Para las muestras estudiadas es posible concluir que la fluorescencia en las palinofacies se relaciona principalmente al parámetro S1/COT (Fig. 5.19).

En el manto 3 de la mina El Bloque, el ply 4 que tiene mayor contenido de liptinitas, IH y S1+S1/COT, presenta la menor relación V/R. Esta situación confirma la mayor liberación de componentes solubles (bitumen) y por esta razón el mejor potencial de esta muestra. Estos resultados permiten usar la relación V/R como un parámetro adicional para evaluar el potencial de generación de las muestras de carbón; especialmente cuando existen grandes diferencias entre las muestras tal como los plies 3 y 4 (Fig. 5.19).

5.2.5. Comparación entre las muestras con el mejor y el peor potencial de generación de hidrocarburos

Mina El Bloque

Muestra 1. Tiene el mejor potencial para generación de hidrocarburos de acuerdo a los siguientes resultados (Fig. 5.20):

- Análisis Próximos: Contenido de humedad, 5,3 % contenido de materia Volátil, 55 % (Iac).
- Análisis elemental: Contenido de Hidrógeno, 7,2 % (Iac).
- Datos de Pirolisis: IH= 423, S1 = 2.73, S2 = 236.
- Constituyentes Petrográficos: Vitrinita 37%, liptinita 55% e inertinita 8%.
- Componentes en Palinofacies: Tejidos vitriníticos 35%, componentes liptiníticos, 65% y componentes inertiníticos 0%.

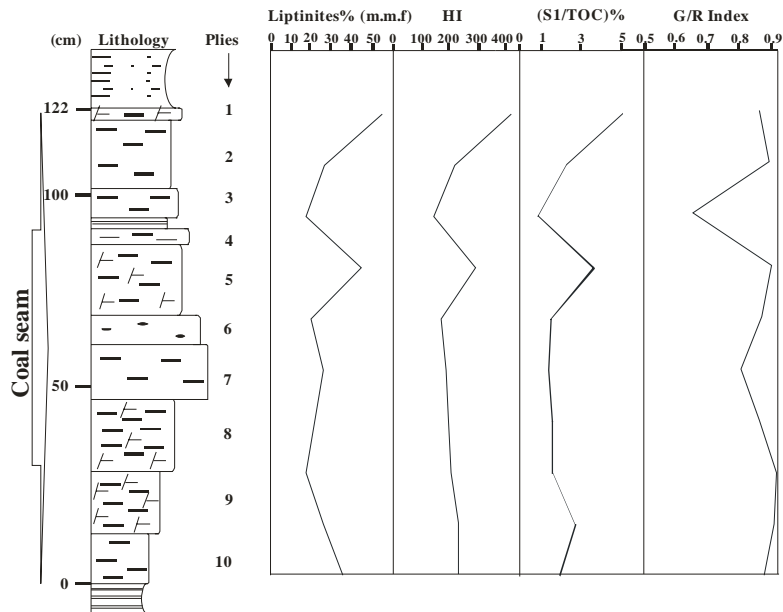


Fig. 5.19. Mina El Bloque, manto 1. Variación con la profundidad de las palinofacies para el índice V/R (medido con análisis de imagen), S1/COT, porcentaje de liptinitas e índice de hidrógeno.

El Bloque Mine, seam 1. Variation with depth of palynofacies with respect to G/R index (measured with image analysis), S1/TOC, percentage of liptinites, and hydrogen index.

La muestra 1, la cual tiene las mejores características como roca fuente, tiene el mayor porcentaje de liptinitas identificadas en el análisis petrográfico. En el análisis de palinofacies este porcentaje es mayor posiblemente debido a que muchas liptinitas quedan camufladas en la matriz vitrinitica y bituminítica siendo difícil identificarlas en petrografía. Con el método de preparación de Shulze modificado, las partículas son aisladas y por lo tanto se pueden identificar fácilmente. El porcentaje de vitrinita e inertinita es mayor usando petrografía que palinofacies, indicando que es posible usar esas diferencias como un parámetro para evaluar el potencial de generación de aceite.

En petrografía, los macerales del grupo de la vitrinita están representados por telinita, colotelinita, vitrodetrinita, colodetrinita, y corpogelinita, pero la colodetrinita es más abundante (ver Anexo A8).

Los macerales del grupo de las liptinitas están representados por bituminita, liptodetrinitas, esporinitas, resinitas oil y cutinitas y los macerales del grupo de la inertinita son principalmente funginita e inertodetrinita (ver anexo).

Cuando se aplica el método ALPS en la muestra 1, las liptinitas principales identificadas con petrografía son bituminita, liptodetrinitas, esporinitas y resinitas oil, y representan el 41%. En palinofacies, las liptinitas principales son materia orgánica amorfa, partículas pequeñas (pero no fueron contadas porque muchas de ellas fueron eliminadas por medio de la filtración) y esporomorfos. En este caso, la materia orgánica amorfa es muy abundante comparada a los otros componentes. Las liptinitas secundarias en petrografía son cutinita, y alginita y en palinofacies ellas son resinas-algas y cutículas.

Muestra 3. Tiene el peor potencial para la generación de hidrocarburos de acuerdo a los siguientes resultados (Fig 5.20):

- Análisis Próximos: Contenido de humedad, 10,6 % y contenido de materia Volátil, 43% (Iac)
- Análisis Elemental: Contenido de Hidrógeno, 6,5 % (Iac)
- Datos de Pirolisis: IH = 146, S1 = 0.53, S2 = 88
- Constituyentes Petrográficas: Vitrinita 78%, liptinita 19% e inertinita 3%
- Componentes en palinofacies: Tejidos vitriniticos 74%, componentes liptiníticos, 24% y componentes inertiníticos 2%.

La muestra 3 que tiene las peores características como roca fuente y contiene el mayor porcentaje de vitrinita de acuerdo a los análisis petrográficos. En el análisis de palinofacies los constituyentes vitriníticos son abundantes. Aunque similar a la muestra 1, el contenido de inertinita de la petrografía es sobreestimada, pero severamente menos que en la muestra 1. Esto indica que los resultados petrográficos son adecuados para evaluar carbones como rocas fuentes. Así mismo, los resultados de palinofacies complementan este estudio. En la muestra 1, el porcentaje de liptinitas es muy alto, pero en la muestra 3 el porcentaje es menor (Fig. 5.21).

En petrografía los macerales del grupo de la vitrinita están representados por telinita, colotelinita, colodetrinita, corpogelinita, pero la colotelinita es la más abundante (ver Anexo A8). Los macerales del grupo de la liptinita están representados por cutinitas, esporinitas, y liptodetrinitas y los macerales del grupo de la inertinita son principalmente inertodetrinitas y funginita (ver Anexo A8).

En la muestra 3 las liptinitas principales identificadas en petrografía y palinofacies son diferentes a las de la muestra 1, además el porcentaje de cada uno de estos es menor (Fig. 5.21). En la muestra 3, las liptinitas secundarias en petrografía no existen y en palinofacies son resinas y rosarios (resina-algas?)

Cuando el método ALPS se aplica, se puede observar una relación directa entre los componentes principales definidos en petrografía y en palinofacies aunque algunos componentes desaparecen durante la preparación de las muestras.

La Tabla 5.4 proporciona una comparación de los datos petrográficos, de palinofacies y de pirólisis para las dos muestras que presentan los valores más extremos en el contenido de liptinitas. Las liptinitas varían entre 19 y 55%. La intensidad de fluorescencia es generalmente alta. Los constituyentes principales de la palinofacies consisten de materia orgánica amorfa de color rojizo, partículas irregulares formadas por otras partículas, tejidos muy bien preservados, tejidos amarillos delgados e irregulares con superficie rugosa, de colonias de cuerpos redondeados pequeños altamente fluorescentes de probable afinidad algal (rosarios) y esporomorfos. Dentro de los últimos, predominan los granos de polen de angiospermas y palmas, pero también se encuentran granos de polen de mangle y algunas especies de dinoflagelados. Esto sugiere que los carbones fueron depositados en áreas cercanas a la línea de costa (Arango, 2004; Blandón et al., 2005).

La Tabla 5.4, también muestra la correlación entre las liptinitas determinadas con petrografía y por palinofacies. Existe una estrecha relación entre la distribución de los principales componentes liptiníticos observados en petrografía y en palinofacies y el potencial de generación de hidrocarburos cuando se aplica el método de las liptinitas principales y secundarias (AMSL, Blandón et al., 2002).

# Sample	Total Liptinites % (mmf)	Main liptinitic components (petrography)	%	Main liptinitic components (palynofacies)	%	Rock-HI	Eval-S1	Pyrol-S2
1	55	Bituminite	19	Reddish amorphous OM	48,7	423	2.73	236
		Liptodetrinites	14	Small particles	?			
		Sporinites	8	Sporomorphs	14,2			
		Total	41		62,9			
# Sample	% Total Liptinites (mmf)	Main liptinitic components (petrography)	%	Main liptinitic components (palynofacies)	%	Rock-HI	Eval-S1	Pyrol-S2
3	19	Cutinites	10	Cuticles	12,1	146	0.53	88
		Sporinites	5	Sporomorphs	8,3			
		Liptodetrinites	3	Small particles	?			
		Total	18		20,4			

Abbreviations: mmf = mineral matter free

Table 5.4. Relación entre petrografía, palinofacies y pirólisis Rock-Eval de dos muestras con comportamiento extremo.

Relationship between petrography, palynofacies and Rock-Eval pyrolysis data for two samples with opposite behavior.

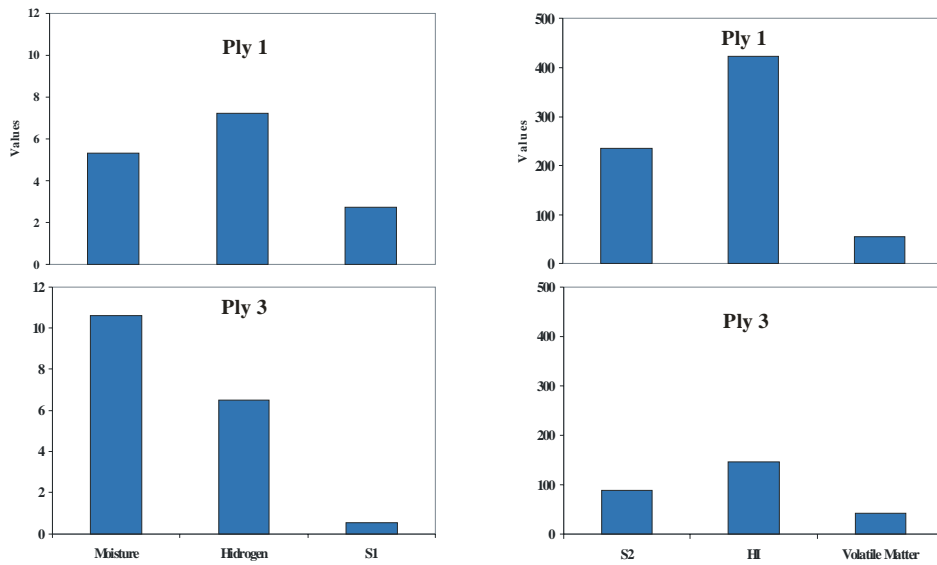


Fig. 5.20. Comparación entre análisis próximos, elementales, de pirolisis Rock-Eval, de los plies 1 y 3 de la mina El Bloque.

Comparison between proximate, ultimate and Rock-Eval pyrolysis data of plies 1 and 3 of El Bloque Mine.

5.3. GENERACIÓN TEMPRANA

El extracto de bitumen para las muestras de carbón, varía entre 42370 y 85172 ppm mientras que en las lutitas varía entre 25268 y 32728, confirmando que los carbones tienen mayores posibilidades de generar hidrocarburos y más rápidamente debido al efecto catalítico de la mayor cantidad de materia orgánica, necesitando menos temperatura para madurarse.

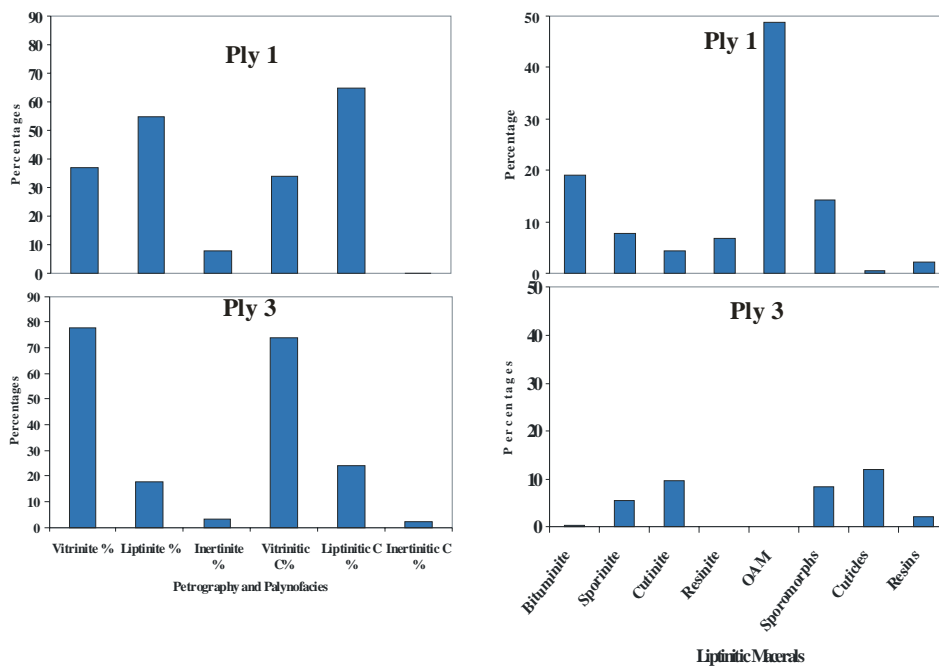


Fig. 5.21. Comparación entre los análisis petrográficos y de palinofacies de 1 plies 1 y 3 de la mina el Bloque.

Comparison between petrographical and palynofacies analysis of plies 1 and 3 of El Bloque mine.

Los porcentajes de hidrocarburos saturados y aromáticos no superan el 10%, verificando el bajo rango de la secuencia carbonosa estudiada (sub-bituminosos). Sin embargo estos porcentajes aunque sean bajos, demuestran la generación temprana de hidrocarburos líquidos a partir del carbón (Laplante, 1974; Snowdon y Powell, 1982; Huang et al., 1984 en Huang, 1999; Macgregor, 1994; Huang, 1999; Petersen, 2004).

Es importante comparar los datos de petrografía en luz reflejada y los de palinofacies en luz transmitida, para verificar la existencia de aceite y de las resinitas oil, los cuales son unos de los principales indicadores de la generación temprana en carbones, (Blandón et al., 2005). Los resultados de pirólisis, petrografía, palinofacies, extracto de bitumen y cromatografía líquida, confirman la generación temprana de hidrocarburos a partir de los carbones estudiados.

El inicio de generación a menores temperaturas de las que normalmente se cree implica que cuando se estudian muestras que están levemente por debajo de la ventana de generación (0.6 – 1.3 Ro), en el caso de los carbones ya habrían generado grandes cantidades de hidrocarburos y las muestras quedarían empobrecidas en HC líquidos, por esta razón, para evaluar verdaderamente el potencial de generación en los carbones y lutitas muy ricas en M.O, es necesario hacerlo en muestras de baja madurez (0.4 - 0.45 Ro).

5.4. VARIACIONES DE LA MATERIA ORGÁNICA Y DE LA MATERIA MINERAL EN LOS CARBONES Y LAS IMPLICACIONES EN LA EXPLOTACIÓN Y BENEFICIO DE LOS CARBONES

Los carbones de la Formación Amagá debido a que normalmente son delgados (< 3 m), se explotan en muchos de los casos de una manera artesanal, tratando de eliminar al máximo la contaminación proveniente del piso y del techo de los mantos. Dichos carbones se usan principalmente como combustible para generar energía en las distintas empresas de textiles, bebidas, papel etc. de la ciudad de Medellín y del departamento del Valle, donde ellos son llevados.

El estudio en muestras de mantos totales permite concluir acerca de rasgos generales dentro de una misma columna estratigráfica, ya que los resultados están más influenciados por el rango del carbón que por la composición de la materia orgánica, mientras que las muestras de plies indican las variaciones en las condiciones de depositación.

La metodología empleada en este trabajo para estudiar detalladamente los mantos de carbón permitió establecer que en la mayoría de los mantos el contenido de azufre se incrementa hacia el techo de los mantos, mientras que hacia la base los porcentajes son normalmente bajos (<0.5%). Esta información sería de gran ayuda para los pequeños mineros, ya que podrían extraer el carbón sin incluir la parte del techo que es la que tiene mayor porcentaje de azufre, además sería muy beneficioso para las empresas consumidoras de este carbón, porque aparte de no contaminar el ambiente con óxidos de azufre, disminuirían los problemas de corrosión en las calderas.

Conocer detalladamente el comportamiento de la materia orgánica, y de la materia mineral, permite buscar nuevas perspectivas en el uso de los carbones, ya que se podrían tener carbones con características especiales que no es fácil de obtener cuando se trabajan muestras de mantos totales.

Es normal encontrar en todos los mantos plies con características totalmente opuestas y localizados contiguamente o muy cercanos. Esto permite afirmar que existe gran variabilidad tanto horizontal como vertical en los mantos estudiados a escalas pequeñas. Por lo tanto se hace necesario tener mucho mayor cuidado durante las labores de explotación y beneficio del carbón.

Para el lavado del carbón, conocer en que zonas del manto se encuentran concentrados los minerales ahorraría mucho dinero, puesto que durante la explotación es posible separar dichas zonas para darles un tratamiento diferente. Mientras que en gran parte del manto no se necesitaría ningún proceso de

beneficio, ya que en la mayoría de los casos se trata de carbones con bajos contenidos de azufre (<0.5%) y de cenizas (< 5%).

5.5. CORRELACION LOCAL DE LOS MANTOS DE CARBÓN

Una de las inquietudes a resolver es la correlación o no de los mantos de carbón, y determinar cuales de los análisis y que parámetros serían más útiles a la hora de hacer las correlaciones, pero como algunos mantos presentan intercalaciones de lutitas carbonosas y otros no y teniendo en cuenta que dichas intercalaciones estarían representando variaciones laterales de facies, se analizaron por separado los mantos con el mismo nombre y sólo se tuvieron en cuenta para el análisis los plies de carbón.

Aunque se hicieron las correlaciones para todos los mantos, sólo se presentará la metodología para el manto 1 de las minas El Bloque y Nechi.

Considerando que los análisis petrográficos, de palinofacies y de esporomorfos dan información mucho más detallada, aparte del gráfico biplot, también se tiene el dendrograma para corroborar o no lo observado en el primer gráfico y se tendrán en cuenta para la siguiente discusión

5.5.1. Correlación del manto 1 de las Minas El Bloque y Nechi

Análisis petrográfico

Los resultados de petrografía de los mantos 1 de las minas El Bloque y Nechi, permiten separar algunas muestras y en especial las que tienen mayor potencial de hidrocarburos (CB-1, CB-5, CN1-10), mientras que el resto de las muestras se encuentran agrupadas. Las variables que tienen más significado son la cutinita y la colodetrinita y las menos importantes son la micrinita, telinita y exsudatinita (Fig. 5.22).

El cluster (Fig. 5.23) igualmente presenta grupos de muestras de un mismo manto que comparten las mismas características, mientras que otras de dos mantos distintos se encuentran agrupadas. Se puede dividir en dos grupos, uno en donde las muestras de los dos mantos comparten las mismas características y otro grupo en donde se individualiza cada manto.

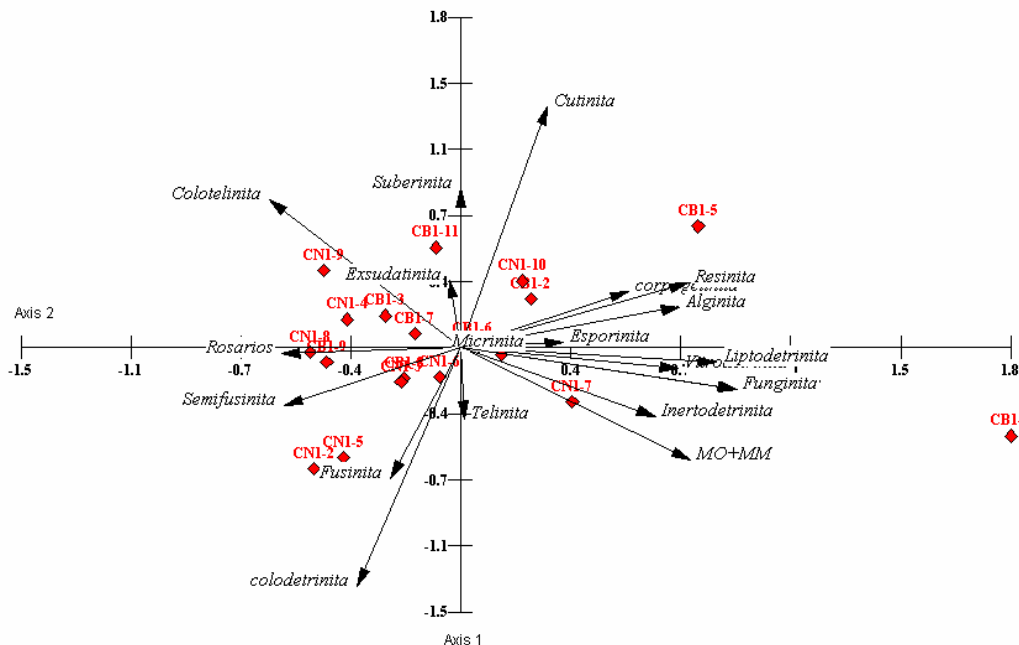


Fig. 5.22. Análisis en componentes principales de los resultados petrográficos del manto 1 de las minas El Bloque (CB) y Nechi (CN).

Principal component analysis of petrographical results of seam 1 in El Bloque (CB) and Nechi (CN) Mines.

Análisis de palinofacies

Los resultados de palinofacies (Fig. 5.24) separan completamente en el lado derecho las muestras del M1 de la Mina El Bloque, en donde una de las variables importantes es la espora verrugada y en el lado izquierdo las de la mina Nechi, en donde las partículas irregulares de superficie rugosa son las más importantes, confirmando que estos dos mantos son diferentes. De la misma manera el cluster (Fig. 5.25) demuestra el agrupamiento de las muestras de las dos minas, ya que existen varios grupos, pero en cada uno de ellos se encuentran muestras de un mismo manto, separadas de las del otro.

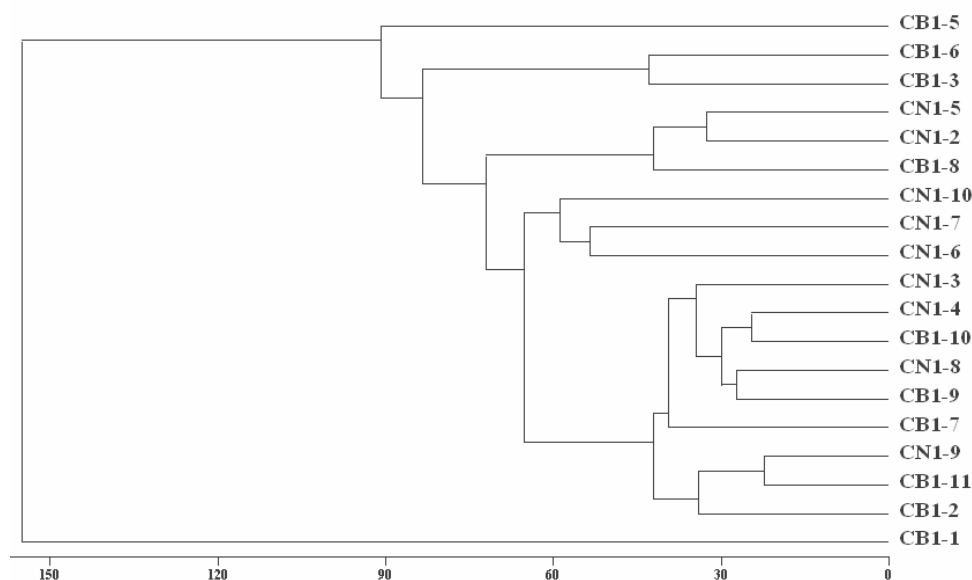


Fig. 5.23. Dendrograma de las muestras del manto 1 de las minas El Bloque (CB) y Nechi (CN) utilizando resultados petrográficos
Cluster analysis of samples in seam 1 of El Bloque (CB) and Nechi (CN) Mines based on petrographical data.

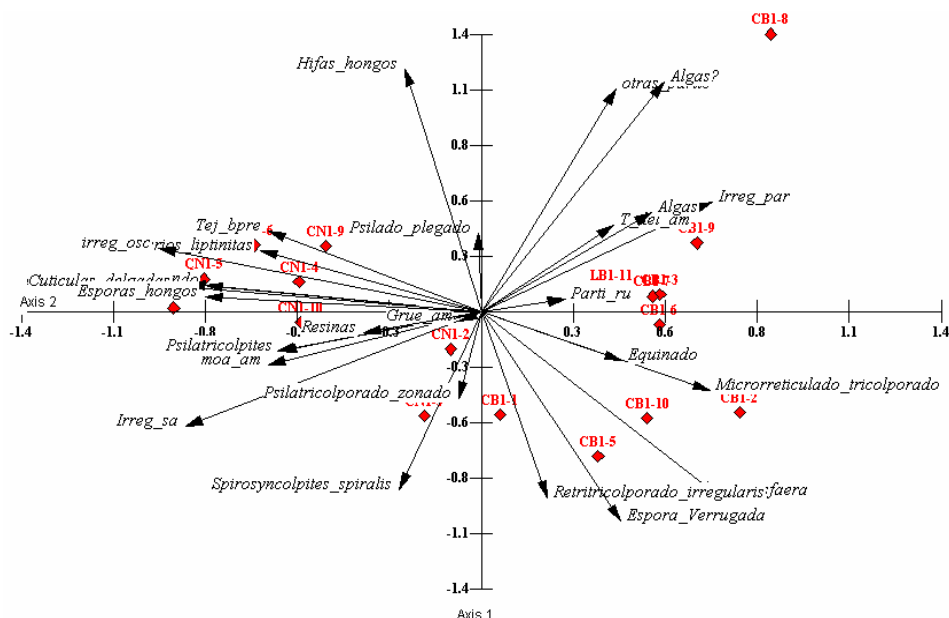


Fig. 5.24. Análisis en componentes principales de los resultados de palinofacies del manto 1 de las minas El Bloque (CB) y Nechi (CN).

Principal component analysis of palynofacies results of seam 1 in El Bloque (CB) and Nechi (CN) Mines.

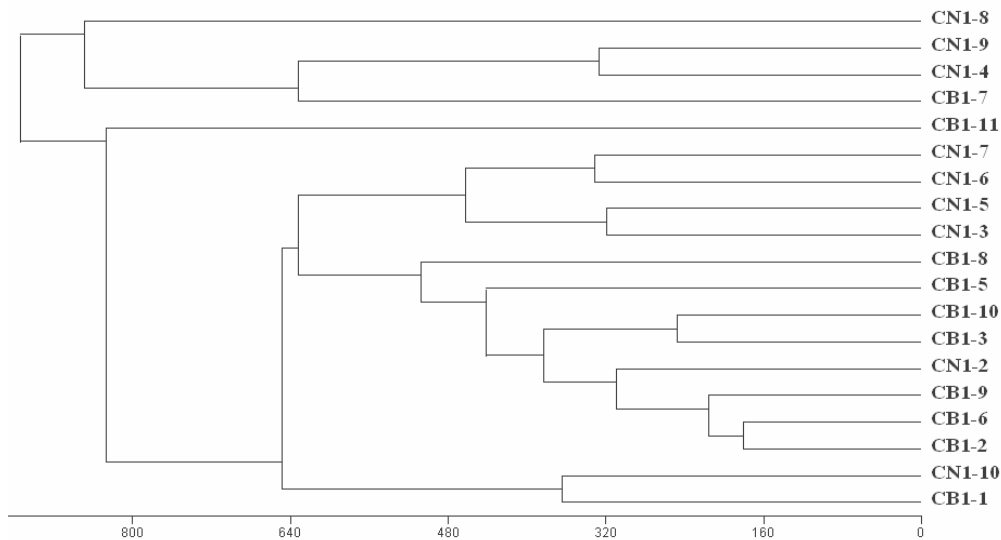


Fig. 5.25. Dendrograma de las muestras del manto 1 de las minas El Bloque (CB) y Nechi (CN) utilizando resultados de palinofacies

Cluster analysis of samples in seam 1 of El Bloque (CB) and Nechi (CN) Mines based on palynofacies data.

Análisis de esporomorfos

Los resultados de los esporomorfos de los mantos 1 de las minas El Bloque y Nechi, permiten diferenciarlas en dos sectores muy distintos de la gráfica, así, las muestras de la mina El Bloque, se ubican en el lado derecho y las de la mina Nechi en el lado izquierdo, confirmando de nuevo que estos dos mantos presentan características distintas y por lo tanto no son los mismos (Fig 5.26). La figura 5.27 igualmente muestra el agrupamiento hecho, solo hay dos muestras que comparten características similares. De igual manera, se ve que el M1 EB presenta más esporomorfos que M1 N, lo cual es claro de los conteos efectuados.

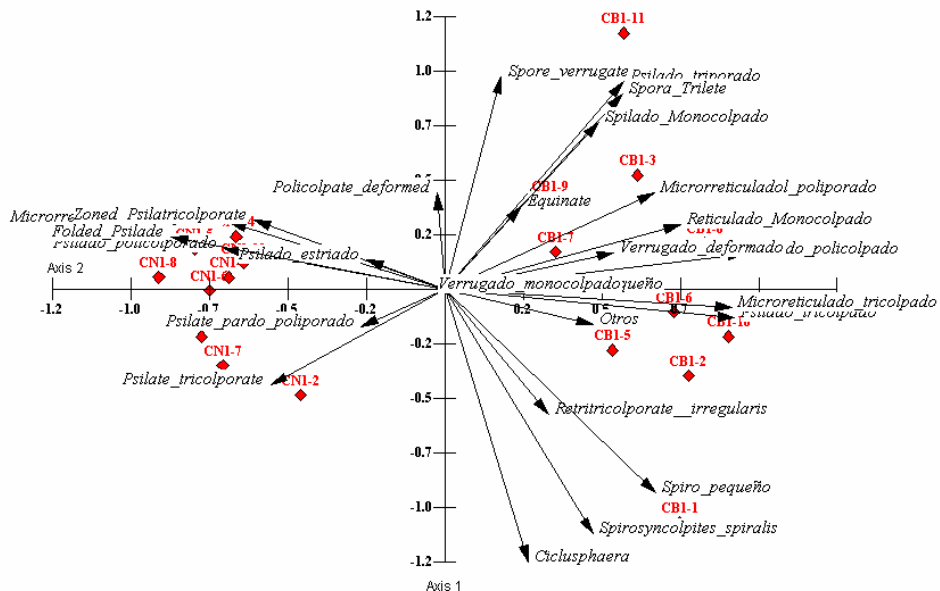


Fig. 5.26. Análisis en componentes principales de los resultados de esporomorfos del manto 1 de las minas El Bloque (CB) y Nechi (CN).

Principal component analysis of sporomorph results of seam 1 in El Bloque (CB) and Nechi (CN) Mines.

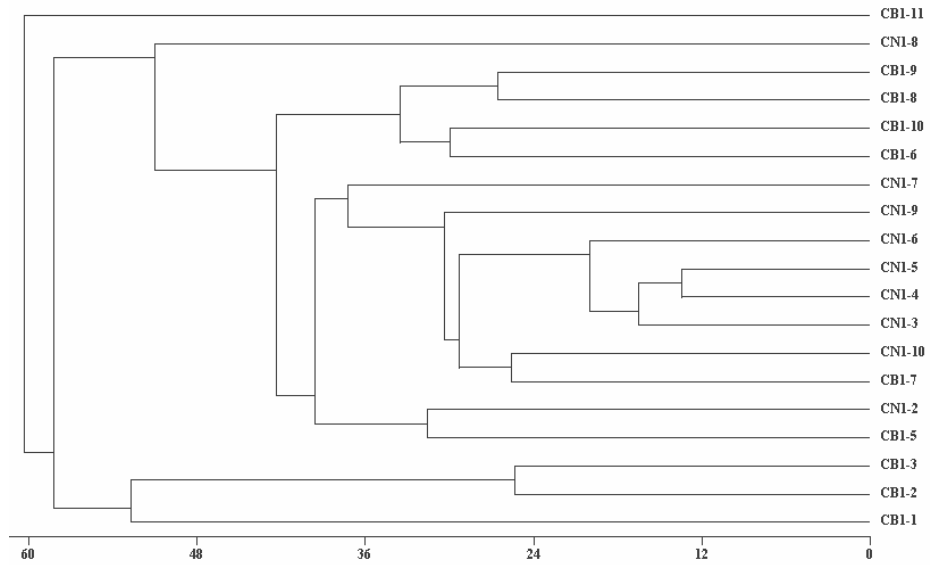


Fig. 5.27. Dendrograma de las muestras del manto 1 de las minas El Bloque (CB) y Nechi (CN) utilizando resultados de esporomorfos

Cluster analysis of samples in seam 1 of El Bloque (CB) and Nechi (CN) Mines based on sporomorph data.

De otro lado, mientras que en la mina el Bloque se observa incremento del contenido de clorita hacia el techo de la secuencia, en la mina Nechi este incremento es hacia la base, confirmando de esta manera la hipótesis de que manto 1 Nechi y el Bloque se encuentran invertidos. Además se observa alta variabilidad tanto vertical como lateral.

6. CONCLUSIONES

6.1. PALINOFACIES, PETROGRAFÍA Y PALEOAMBIENTE

Se implementó el método modificado de Shulze para los carbones, y lutitas carbonosas el cual permite quitar los ácidos húmicos de la materia orgánica disgregando los componentes orgánicos de tal modo que es posible identificar cada uno de ellos y hacer la correlación casi directa con los macerales observados en petrografía, permitiendo de esta manera refinar la identificación de los macerales vistos en petrografía y de verificar la solubilidad o no de algunos de los componentes de la materia orgánica, lo cual es fundamental para entender el carbón como roca fuente de hidrocarburos.

Existe buena correlación entre la vitrinita y los tejidos vitriníticos y entre la liptinita y los componentes liptiníticos, pero no existe correlación entre la inertinita y los componentes inertiníticos. Así, las muestras que en petrografía presentan altos contenidos de inertinita, en palinofacies son los más bajos y por el contrario, las muestras que tienen el menor porcentaje de inertinita en petrografía, en palinofacies presentan el mayor porcentaje de esporas de hongos. Eso indica que posiblemente muchas de las inertinitas corresponden a bitumen que se disuelve en el proceso de preparación de las palinofacies, y las verdaderas funginitas en petrografía no se alcanzan a diferenciar porque normalmente están íntimamente mezcladas en los tejidos.

Hay una relación inversa entre angiospermas y vitrinitas y componentes vitriníticos, ya que a mayor contenido de angiospermas, se observa un porcentaje menor en vitrinitas y a un contenido muy bajo de palmas concuerda con porcentajes altos en liptinitas.

Para los estudios palinológicos y paleoecológicos no es conveniente tomar las lutitas únicamente, ya que los carbones también presentan una gran variedad de especies muy bien preservadas y normalmente de mayor tamaño. Ellas están indicando vegetación autóctona y además la interpretación ambiental podría ser más real.

Con el conteo de las palinofacies se obtiene una idea más precisa de la variedad y abundancia de los componentes orgánicos y se puede determinar la solubilidad o no de algunos de ellos.

La materia orgánica que formó los carbones estudiados se depositó posiblemente en zonas bajas, con altos niveles freáticos y en condiciones estuarinas o de delta inferior, donde se acumuló gran cantidad de materia orgánica terrestre y abierto a incursiones marinas como lo respaldan principalmente la presencia de *Zonocostites ramonae* y algunos dinoflagelados. De acuerdo con esto se validan las interpretaciones dadas por Dueñas (1983), Escobar & Roza (1984), Escobar (1990) y Blandón & Arango, 2005, que proponen que los carbones y rocas asociadas al Miembro Sabaletas de la Formación Amagá estuvieron abiertos a incursiones marinas y se formaron cercanos a la línea de costa.

Se confirman las observaciones hechas por Muñoz et al., (2004), en donde en un mismo manto de carbón se hallan evidencias de formaciones vegetales inundadas muy distintas. Y que en los trópicos la migración de la vegetación puede ser rápida al cambiar las condiciones ambientales, las cuales están directamente relacionadas a fluctuaciones en el nivel freático. Igualmente se verifica que las lutitas presentan porcentajes de granos de polen de palmas en mayor cantidad que los carbones.

6.2. CARBÓN COMO ROCA FUENTE DE PETRÓLEO

El estudio en muestras de mantos totales permite concluir acerca de rasgos generales dentro de una misma columna estratigráfica, ya que los resultados están más influenciados por el rango del carbón que por la composición de la materia orgánica, mientras que las muestras de plies indican las

variaciones en las condiciones de depositación y por lo tanto de las posibilidades o no de generación de HC, pues dichas variaciones dependen del tipo de materia orgánica y no del rango.

Se recomienda utilizar los análisis próximos de los carbones (humedad y materia volátil) como una herramienta de selección y los análisis de palinofacies para comparar con la petrografía y poder conocer el tipo de la materia orgánica que conforma el carbón y las lutitas asociadas para discernir acerca de la mayores o menores posibilidades de generación de hidrocarburos.

Para definir el posible potencial de generación de hidrocarburos de un carbón o lutita, se recomienda un estudio detallado de los plies para verificar el tipo de materia orgánica. Cuando se analizan detalladamente los mantos de carbón y las lutitas asociadas, se pueden detectar fácilmente intervalos con alto y bajo potencial.

Los análisis próximos y en especial el contenido de humedad y materias volátiles de cada uno de los plies permite discernir acerca del comportamiento de la materia orgánica como roca fuente de petróleo, ya que se encontró que las muestras de carbón que presentan menor humedad y mayor contenido de materias volátiles presentan las mejores características como rocas fuentes, igualmente las lutitas que presentan menores porcentajes de humedad y mayores contenidos de materias volátiles, tienen buenos potenciales de generación. Pero es necesario aclarar que debido a la gran diferencia en los valores entre las lutitas y los carbones, los resultados se deben analizar por separado y compararlos en la misma base o sea libres de humedad y cenizas en el caso de las materias volátiles.

Para carbones ricos en hidrógeno, como esos de la Formación Amagá, el análisis comparativo entre petrografía y palinofacies permite identificar componentes tales como resinita oil, vitrinita perhidros y esporas de hongos, los cuales son difíciles de identificar claramente con análisis petrográfico. Además, se pueden diferenciar algunas asociaciones de componentes típicos de rocas fuentes tal como materia orgánica amorfa de color rojizo con esporomorfos (*Ciclusphaera* y *Spirosyncolpites spiralis* con pocas esporas de hongos).

En general los carbones aunque tienen índices de hidrógeno normalmente menores que algunas de las lutitas, presentan un mayor potencial de generación de hidrocarburos, debido a su notablemente mayor contenido de materia orgánica. También se encontró que para que una lutita pueda tener potencial similar a los carbones, debe tener muy alto índice de hidrógeno y un contenido de materia orgánica mayor del 10%.

Los análisis próximos son fáciles y baratos de hacer y producen resultados adecuados para evaluar el potencial de generación de hidrocarburos de los carbones y las lutitas carbonosas asociadas.

En el análisis de imagen, la relación del color Verde / Rojo se puede usar como un parámetro adicional para evaluar el potencial de generación de las muestras de carbón; especialmente cuando existen grandes diferencias entre ellas.

Al comparar los resultados de pyrolysis y análisis próximo, se nota que las muestras que presentan los más altos valores de S1, S2 e índice de hidrógeno tienen porcentajes de MV (lac) más alto y menor humedad residual, y en los análisis elementales dichas muestras concuerdan con las que presentan mayores contenidos de carbono e hidrógeno.

El estudio detallado de los plies utilizando palinofacies es de gran ayuda en la identificación de los componentes orgánicos y por lo tanto para entender cual es la asociación adecuada para evaluar las rocas fuentes de hidrocarburos. El estudio de palinofacies también permite discernir entre componentes fácilmente solubles en los reactivos utilizados en la preparación (resinitas oil y algunas pre-inertinitas) de los que no son solubles (resto de la materia orgánica).

Las muestras que presentan los mas bajos valores de S1, S2 e índice de hidrógeno, muestran los más altos contenidos de humedad y menores de MV (lac) y las asociaciones de palynofacies se caracterizan

por los más altos porcentajes de tejidos cuticulares, menores cantidades de esporomorfos y normalmente presentan esporas e hifas de hongos en variadas cantidades.

Es importante anotar que en general no existe una relación directa entre el contenido de azufre y el índice de hidrógeno.

El conteo manual de puntos utilizado en la clasificación de las liptínitas combinado con el de análisis de imagen permite hacer medidas de la fluorescencia por maceral y el manejo planteado de la información da posibilidades para contrastar la fluorescencia con el índice de hidrógeno que se relaciona con el potencial de generación.

Mediante el análisis estadístico es posible determinar los parámetros de los diferentes análisis que presentan una mejor correlación: también permite separar perfectamente las lutitas de los carbones, ya que se comportan de manera diferente.

6.3. GENERACIÓN TEMPRANA

Es importante comparar los datos de petrografía en luz reflejada y los de palinofacies en luz transmitida, para verificar la existencia de aceite y de las resinitas oil, los cuales son unos de los principales indicadores de la generación temprana en carbones (Blandón et al., 2005).

Se puede observar que las muestras con el más alto potencial se caracterizan por presentar uno de los más altos contenidos de granos de polen de angiospermas y por el contrario las muestras que presentan el menor potencial tienen granos de polen en cantidades importantes de helechos y palmas. Estos resultados están de acuerdo con los estudios de Isaken et al., (1998) y Petersen & Nytoft (2006) en donde ellos llegan a la conclusión que los carbones derivados de angiospermas tienen mayor potencial de generación que los carbones derivados de gimnospermas.

Debido al efecto catalítico de la mayor cantidad de materia orgánica que poseen los carbones, éstos normalmente empezarían a generar hidrocarburos antes que las lutitas asociadas. Debido a la mayor cantidad de materia orgánica susceptible de convertirse en hidrocarburos, el tiempo durante el cual generarían petróleo sería mayor que las lutitas.

El inicio de generación a menores temperaturas de las que normalmente se cree implica que cuando se estudian muestras que están levemente por debajo de la ventana de generación ($0.6 - 1.3 R_o$), en el caso de los carbones ya habrían generado grandes cantidades de hidrocarburos y las muestras quedarían empobrecidas en HC líquidos, por esta razón, para evaluar verdaderamente el potencial de generación en los carbones y lutitas muy ricas en materia orgánica, es necesario hacerlo en muestras de baja madurez ($0.4 - 0.45 R_o$).

Los porcentajes de hidrocarburos saturados y aromáticos no superan el 10%, verificando el bajo rango de la secuencia carbonosa estudiada (sub-bituminosos). Sin embargo estos porcentajes aunque sean bajos, demuestran la generación temprana de hidrocarburos líquidos a partir del carbón. Los resultados de pirolisis, petrografía, palinofacies, extracto de bitumen y cromatografía líquida, confirman la generación temprana de hidrocarburos.

Se recomienda utilizar los análisis próximos de los carbones (humedad y materia volátil) como una herramienta de selección y los análisis de palinofacies para comparar con la petrografía y poder conocer el tipo de la materia orgánica que conforma el carbón y las lutitas asociadas para discernir acerca de las mayores o menores posibilidades de generación de hidrocarburos.

Los resultados de los análisis próximos presentan una mejor correlación con los datos de pirolisis y de petrografía, así por ejemplo, existe una relación directa entre el IH, las MV y el contenido de macerales liptiníticos, y una relación inversa entre humedad, MV y el contenido de macerales liptiníticos.

6.4. EXPLOTACIÓN Y BENEFICIO DE LOS CARBONES.

La metodología empleada en este trabajo para estudiar detalladamente los mantos de carbón permitió establecer que en la mayoría de los mantos el contenido de azufre se incrementa hacia el techo de estos, mientras que hacia la base los porcentajes son normalmente bajos (<0.5%). Esta información sería de gran ayuda para los pequeños mineros, ya que podrían extraer el carbón sin incluir la parte del techo que es la que tiene mayor porcentaje de azufre, además sería muy beneficioso para las empresas consumidoras de este carbón, porque aparte de no contaminar el ambiente con óxidos de azufre, disminuirían los problemas de corrosión en las calderas.

6.5. CORRELACION DE LOS MANTOS

Se comprueba que los análisis de palinofacies dan información mucho más detallada que permite discernir acerca de la similitud o no de un manto de carbón, por esta razón con los análisis de palinofacies y esporomorfos se concluye que los mantos de carbón analizados son diferentes o existen variaciones importantes en las condiciones de depositación no solo verticalmente sino también lateralmente.

Los datos de pirolisis están indicando diferencias marcadas en los mantos de las diferentes minas estudiadas, sugiriendo que no existe correlación entre los denominados mantos 1, 2 y 3 de las minas Nechí y el Bloque, ni con los mantos 3 de las minas el Arenal y el Pontón. Es normal encontrar en todos los mantos plies con características totalmente opuestas y localizados contiguamente o muy cercanos. Esto permite afirmar que existe gran variabilidad tanto horizontal como vertical en los mantos estudiados a escalas pequeñas.

Los resultados de los minerales arcillosos también presentan alta variabilidad tanto vertical como lateral y permiten mostrar que los mantos 1 de las minas Nechí y el Bloque se encuentran invertidos. Las diferencias químicas, petrográficas y palinológicas están influenciadas por las condiciones en el ambiente de depositación de la turba, y estas herramientas resultan ser útiles como elementos de correlación y diferenciación de los distintos mantos de carbón.

El conteo manual de puntos utilizado en la clasificación de las liptínitas combinado con el de análisis de imagen permite hacer medidas de la fluorescencia por maceral y el manejo planteado de la información permite hacer comparaciones entre mantos.

REFERENCIAS

- Adatte, T., Keller, Burns, G., Stoykova, S., Ivanov, K.H., Vangelov, M.I., Kramer, D. & Stueben, D., 2002. Paleoenvironment across the Cretaceous-Tertiary transition in eastern Bulgaria. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper* 356, 231-252.
- Agaméz & Ramírez, 2001. Interpretación Secuencial y Palinofacies de la Formación Carbonera en el Piedemonte Llanero. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Medellín. 122 p.
- Albrecht, P. & Ourisson, G., 1969. Diagenèse des hydrocarbures saturés dans une serie sédimentaire épaisse, Douala, Cameroun. *Geochim. Cosmochim. Acta* 33, 138-142.
- Alpern, B., 1963a. Méthode d'extraction des spores des roches du houiller. *Pollen et spores*, 5, 169-177.
- Alpern, B., 1970. Classification pétrographique des constituants organiques fossiles des roches sédimentaires. *Rev. Inst. Fran. Pétrol.*, 25, 1233-1266.
- Alpern, B., 1976. Fluorescence et réflectance de la matière organique dispersée et évolution des sédiments. *Bull. Centre Rech. Pau-SNPA*, 10-1, 201-220.
- American Association for Testing and Materials (ASTM), 2000. Annual Book of ASTM Standard: part 05.06: gaseous fuel; coal and coke ASTM, Philadelphia.
- Arango, F., Restrepo, A. & Blandón, A., 2003. Avance en el estudio de la materia orgánica sedimentaria utilizando herramientas de análisis de imagen. En: VIII Simposio de tratamiento de señales, imágenes y visión artificial. Medellín. 2003.
- Arango, F., 2004. Metodología para el estudio de algunos componentes de las palinofacies para los carbones y rocas asociadas al manto 1 de la Formación Amagá, utilizando microscopía asistida por computador. Trabajo de grado. Universidad Nacional-Medellín. Facultad de Minas, Colombia, 127p.
- Arango, F., Restrepo, A. & Blandón, A., 2004. Application of image analysis to the palynofacies of coal and associated shales. Abstract: TSOP, twenty-first annual meeting. Sydney Australia, 18-21.
- Arango, F. & Blandón, A., 2006. Observations on the origin of inertinites in the coal lithotypes of the Cerrejón Formation, north of Colombia. 23 Th Meeting organic matter. TSOP.
- Báez, P.F., 2004. Análisis de materia orgánica sedimentaria y palinológico en el límite Cretáceo- Paleoceno en el Piedemonte Llanero. TDG Universidad Nacional, Facultad de Minas, Medellín.
- Bates, C.D., Coxon, P. & Gibbard, P.L., 1978. A new method for the preparation of clay-rich sediment samples for palynological investigation. *New Phytol.*, 81, 459-463.
- Batten, D.J., 1996. Palynofacies and palaeoenvironmental interpretation. In: J. Jansonius & D.C. McGregor (Eds), *Palynology: Principles and applications*, American Association of Stratigraphic Palynologist Foundation, 1, 1011-1064.
- Bertrand, P., 1984. Geochemical and petrographic characterization of humic coals considered as possible oil source rocks. *Organic Geochemistry* 6, 481-488.
- Blandón, A., 1999. El carbón y sus posibilidades de uso. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, 209p.
- Blandón, A., Arango, F. & Restrepo, A., 2005. Características Petrográficas, Químicas y Palinológicas de un Manto de Carbón de La Formación Amagá y su Relación al Paleoambiente. *Revista Ciencias de La Tierra*.
- Blandón, A. & Giraldo, B., 1989. Aplicación de la petrografía y la geoquímica orgánica a la exploración de hidrocarburos en la cuenca del Valle Medio Magdalena. (Msc. Thesis). Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín, 219p.
- Blandón, A., Gorin, G., Arango, F. & Restrepo A., 2004. Potential for hydrocarbon generation in sub-bituminous coals of the Tertiary Amaga Formation in Central Colombia: a multidisciplinary study based on coal petrography, palynofacies and Rock-Eval pyrolysis. TSOP, twenty-first annual meeting organic matter down under. Sydney Australia.
- Blandón, A., Gorin, G., Arango, F. & Restrepo, A., 2005. Comparison between petrography, palynofacies and Rock-Eval pyrolysis in subbituminous coals of the Tertiary Amaga Formation in Central Colombia and its relation with the potential for hydrocarbon generation. *International Journal of Coal Geology* (submitted).
- Blandón, A., Parra, L. & Arango, F., 2003. Método de preparación de muestras de carbón y rocas carbonosas para el estudio de la materia orgánica sedimentaria. IX Congreso Colombiano de Geología, Medellín Colombia, 227-228.
- Blandón, A., Parra, N., Gorin, G., Arango, F., in press. Adapting palynological preparation methods in bituminous and subbituminous coals from Colombia to improve palynofacies and hydrocarbon source rock evaluations. *International Journal of Coal Geology*.
- Blandón, A., Restrepo, A., Carmona, I. & Parra, M., 2002. Estudio de los macerales liptiníticos del carbón de la Formación Amagá, pertenecientes a la cuenca de la Sinifaná (Antioquia), utilizando análisis digital de imagen (A.D.I). Informe proyecto de investigación. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Colombia, 263p.

- Blandón, A. & Rey, I., 1998. Caracterización petrográfica de los carbones de Amagá y Puerto Libertador. Memorias IV Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología del Carbón, Paipa Colombia, 46-53.
- Bombardiere, L. & Gorin, G., 1998. Sedimentary organic matter in condensed sections from distal oxic environments: examples from the Mesozoic of SE France. *Sedimentology*, 45, 771-788.
- Bonilla, H., 1986. Método de extracción de bitumen de carbón para estudios de geoquímica orgánica. Informe de investigación Ingeominas, Bogotá, Colombia. 110p.
- Bonilla, H., 1988. Estandarización del método para determinación de asfaltenos en bitumen de carbón. Informe de investigación Ingeominas, Bogotá, Colombia. 130p.
- Bostick, N.H., 1979. Microscopic measurement of the level of catagenesis of solid organic matter in sedimentary rocks to aid exploration for petroleum and to determine former burial temperatures A review. S.E.P.M. Special Publ., No. 26, 17-43
- Boulder, M.C. & Riddick, A., 1986. Classification and analysis of palynodebris, from the Palaeocene sediments of the Forties Fields. *Sedimentology*, 33, 871-886.
- Boulter, M.C., 1994. An approach to a standard terminology for palynodebris. - In: Traverse, A. Cambridge: Univ. Press. [ed.]: Sedimentation of organic particles, 199-216,
- Bruch, A.A. & Pross, J., 1999. Palynomorph extraction from peat, lignite and coal. In: Jones, T.P. & Rowe, N.P. (eds.). Fossil Plants and Spores: modern techniques. Geological Society, London, 26-30.
- Bustin, R.M., Cameron, A.R., Grieve, D.A. and Kalkreuth, W.D., 1983. Coal Petrology: Its Principles, Methods and Applications. Geol. Assoc. Can. Short Course. Notes, 3, 273 pp.
- Bustin, R.M., 1985. Coal petrology its principles, methods and applications, Second Edition, Canada. 229p.
- Deconinck, J.F., Hesselbo, S.P., Debuisser, N., Averbuch, O., Baudin, F. & Bessa, J., 2003. Environmental controls on clay mineralogy of an Early Jurassic mudrock (Blue Lias Formation, Southern England). *International Journal of Earth Sciences* 92, 255-266.
- Donalson et al., 1970. Holocene Guadalupe Delta of Texas Gulf Coast. In: Morgan, J.P. (ed.). Deltaic Sedimentation. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 15, 107-137.
- Calder, J.H., Gibbing, M.R. & Mukhopadhyay, P.K., 1991. Peat formation in a Westphalian B piedmont setting, Cumberland Basin, Nova Scotia: implication for the maceral-based interpretation of rheotrophic and raised paleomires. *Bull. Soc. Geol. Fr.* 162, 283-298.
- Calder, J.H., 1993. The evolution of a ground-water-influenced (Westphalian B) peat-forming ecosystem in a piedmont setting: the No.3 seam, Springhill coalfield, Cumberland Basin, Nova Scotia. In: Cobb, J.C. & Cecil, C.B. (eds.). Modern and Ancient Coal-Forming Environments. Geological Society of America, Special Paper, 286, 153-180.
- Cameron, A.R., 1978. Megascopic description of coal with particular reference to seams in southern Illinois. In: R. R. Dutcher (Editor), Field Description of Coal. Am. Soc. Test. Mater. Spec. Tech. Publ., 661: 9-32.
- Campuzano, J., 1977. Facies en los pisos inferior y medio del Terciario Carbonífero. Titiribí Antioquia, Boletín de Ciencias de la Tierra No.2. Facultad de Ciencias- Universidad Nacional de Colombia-Medellín, 123-146.
- Canónico, U., Tocco, R., Ruggiero, A. & Suárez, H., 2004. Organic geochemistry and petrology of coals and carbonaceous shales from western Venezuela. *International journal of coal geology*, 57, 151-165.
- Carmona, 1992. Introducción al Estudio Petrográfico de las rocas de la Formación Amagá. Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellín. Facultad de Ciencias, 55p.
- Carmona, I., 1997. Estudio de la petrografía y palinología de los carbones de la Formación Amagá localizados en la zona Palomos municipio de Fredonia. (Msc. Thesis). Facultad de minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 147p.
- Clocke M., Lester E., Allen M. & Miles N., 1995. Automated maceral analysis using fluorescence microscopy and image analysis. *Fuel*, 74/5, 659-669.
- Cohen, A.D., Spackman, W. & Raymond Jr, R., 1987. Interpreting the characteristics of coal seams from chemical, physical and petrographic studies of peat deposits. In: SCOTT, A. C. (ed.). Coal and coal-bearing strata: recent.
- Collinson, M.E., Van Bergen, P.F., Scott, A.C. & De Leeuw, J.W., 1994. The oil generating potential of plants from coal and coal-bearing strata through time: a review with new evidence from Carboniferous plants. In: Scott, A.C. & Fleet, A.J. (eds.), Coal and Coal-Bearing Strata as Oil-Prone Source Rocks? Geological Society, Spec. Publ., 77, 31-70.
- Combaz, A., 1964. Les palynofaciès. *Revue de Micropaléontologie*, 7, 205-218.
- Combaz, A., 1980. Les kérogènes vus au microscope. In: Durand, B. (ed.), Kerogen: insoluble organic matter from sedimentary rocks. Editions Technip, Paris, 55-111.
- Curry, D.J., Emmett, J.K. & Hunt, J.W., 1994. Geochemistry of aliphatic-rich rocks in the Cooper Basin, Australia, and Taranaki Basin, New Zealand: implications for the occurrence of potentially oil-generative coal. In: Scott, A.C. & Fleet, A.J. (Eds.), Coal and Coal-Bearing Strata as Oil-Prone Source Rocks? Geological Society Special Publication, 77, 149-182.

- David, P. & Fermont, W., 1993. Determination of coal maceral composition by means of colour image analysis. *Fuel processing technology*, 36, 9-15.
- Deconinck, J.F., Chamley, H., Debrabant, P. & Colbeaux, J.P., 1982. Le Boulonnais au Jurassique supérieur: données de la minéralogie des argiles et de la géochimie. *Annales de la Société géologique du Nord* 102, 145-152.
- Deconinck, J.F., Beaudoin, B., Chamley, H., Joseph, P. & Raoult, J.F., 1985. Controles tectonique, eustatique et climatique de la sédimentation argileuse du domaine subalpin français au Malm-Cretacé. *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique* 26, 311-320.
- Delsahut, B. & Tejada, E. 1982. Utilización de análisis litoestratigráficos detallados para correlación de mantos de Carbón en la Formación Amagá, Antioquia. IV Cong. Col. Geol, Cali, 8.
- Del Valle, J.I., 1996. Los bosques de guandal del delta del Río Patía (Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 20 (78), 476-489.
- Del Valle, J.I., & Urrego, L.E., 2002. Reconstrucción de la sucesión en un bosque de Guindal (Pacífico Colombiano) durante el Holoceno reciente. *Caldasia*, 24 (2): 476-489.
- Díaz M L. 2002. Estadística multivariada. Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, 529p.
- Dieckmann, V., Horsfield, B., Keym, M., 2005. Risking the Timing of Petroleum Formation from Heterogeneous Source Rocks, 4th ALAGO Workshop - Basin Modeling (Buenos Aires, Argentina).
- Diessel, C.F.K., 1965. Correlation of macro and micro-petrography of some New South Wales coals. *Proc. 8th Commonw. Min. Metall. Congr.*, 6: 669-677.
- Diessel, C.F.K., 1986. On the correlation between coal facies and depositional environments. *Advances in the study of the Sydney basin. 20th Newcastle Symp. Proc.* 246, 19- 22.
- Diessel, C.F.K., 1992. *Coal-Bearing Depositional Systems*. Springer-Verlag, Berlin, 721p.
- Dijkstra, S.J., 1946. Eine monographische Bearbeitung der Karbonischen Megasporen. *Med. Geol. Stich., Serie C*, 3(1),1-101.
- Dueñas, H., 1983. Fluctuaciones del nivel del mar durante el depósito de los sedimentos basales de la Formación Ciénaga de Oro. *Rev. Acad. Col. de ciencias exactas, físicas y naturales*, 15 (58), 67-76.
- Durand, B. & Espitalié, A., (1976). Geochemical studies on the organic matter from the Douala Basin (Cameroon) - II. Evolution of kerogen. *Geochemica and cosmochemica*, 40, 801-808.
- Durand, B. & Parratte, M., 1983. Oil potential of coals, a geochemical approach. In: Brooks, J. (ed.), *geochemistry and exploration of Europe*. Blackwell scientific, Oxford, 255-265.
- Eble, C.F., Grady, W.C., 1993. Palynologic and petrographic characteristics of two Middle Pennsylvanian coal seams and a probably modern analogue. In: Cobb, J.C. & Cecil, C.B. (eds.), *Modern and Ancient Coal-Forming Environments*. Geological Society of America, Special Paper, 286, 119-138.
- Eble, C.F., Pierce, B. & Grady, W., 2003. Palynology, petrography and geochemistry of the Sewickley coal bed (Monongahela Group, Late Pennsylvanian), Northern Appalachian Basin, USA. *International Journal of Coal Geology*, 55, 187-2004.
- Ercegovac M. & Kostić A., 2006. Organic facies and palynofacies: Nomenclature, classification and applicability for petroleum source rock evaluation. *International Journal of Coal Geology*, 68, 1-2, 1, 70-78
- Escalera, A. (2001). *Visión por computador Fundamentos y Métodos*. En Printice Hall Madrid Amo.
- Escobar, L.H., 1990. *Palinoestratigrafía de la Formación Amagá*. (Msc. Thesis). Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 95p.
- Escobar, E. & Rozo, T., 1984. *Investigación palinológica de la Formación Amagá*. (Undergrade thesis). Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 180p.
- Fleet, A.J. & Scott, A.C., 1994. Coal and coal-bearing strata as oil prone source rocks: an overview. In: Scott, A.C. & Fleet, A.J. (eds.), *Coal and Coal-Bearing Strata as Oil-Prone Source Rocks?* Geological Society Special Publication, 77, 1-8.
- Fuel, 2001. *The new inertinite classification (ICCP System 1994)*.
- Fürsich, F.T., Oschmann, W., Pandey, D.K., Jaitly, A.K., Singh, I.B. & Liu, C., 2005. Palaeoecology of Middle to lower Upper Jurassic macrofaunas of the Kachchh Basin, western India an overview. *Journal of the Palaeontological Society of India*.
- Fürsich, F.T., Singh, I.B., Joachimsk, M., Krumm, I.S., Schlirf M. & Schlirf S., 2005. Palaeoclimate reconstructions of the Middle Jurassic of Kachchh (western India): an integrated approach based on palaeoecological, oxygen isotopic, and clay mineralogical data *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 217, 3-4, 25 289-309
- Galloway, W.E., & Hobday, D.K., 1983. *Terrigenous Clastic Depositional Systems; Application to Petroleum, Coal, and Uranium Exploration*. Springer-Verlag, New York, 423p.
- García, M., Surdam, R.C., & Lee, M.L., 1997. Generation and expulsion of petroleum and gas from Almond Formation coal, Greater Green River Basin, Wyoming. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 81, 62-81.

- Gmur, D., & Kwiecińska B., 2002. Facies analysis of coal seams from the Cracow Sandstone Series of the Upper Silesia Coal Basin, Poland. *International Journal of Coal Geology*, 52, 1-4, 29-44
- Gonzales, H., 1980. Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina). *Bol. Geol. INGEOMINAS*. Vol. 23 (1), 174p.
- Gorin, G. & Steffen, D., 1991. Organic facies as a tool for recording eustatic variations in marine fine-grained carbonates—example of the Berriasian stratotype at Berrias (Ardèche, SE France). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 85, 303 – 320.
- Greb, S.F., Eble, C.F. & Hower, J.C. 1999. Depositional history of the Fire Clay coal bed (Late Duckmantian), Eastern Kentucky, USA. *International Journal of Coal Geology*, 40, 255-280.
- Grosse, E., 1926. *El Terciario Carbonífero de Antioquia*. Dietrich Reimer, Berlin, 361p.
- Guzmán, C. & Sierra, G., 1984. Ambientes sedimentarios en la Formación Amagá. (Undergrade Thesis). Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 303p.
- Guzmán, C.A., 1991. Condiciones de depositación de la Formación Amagá entre Amagá y Angelópolis. (M. Sc. Thesis). Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 213p.
- Chen, C., Huang, J., Chen, J., & Tian, X., 1984. Depositional models of tertiary rift basins, eastern China, and their application to petroleum prediction *Sedimentary Geology*, 40, 1-3, 73-88
- Hallam, A., 1975. *Jurassic Environments*. Cambridge University Press, Cambridge, 269p.
- Hallam, A., Grose, J.A. & Ruffell, A., 1991. Palaeoclimatic significance of changes in clay mineralogy across the Jurassic–Cretaceous boundary in England and France. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 81, 173–187.
- Harvey, R., & Dillon, J.W., 1985. Maceral distributions in Illinois coals and their paleoenvironmental implications. *International Journal of Coal Geology*, 5, 1-2, 141-165
- Hasiah, A. (1999). Oil - generation potential of Tertiary coal and other organic-rich sediments of the Nyalau Formation, Onshore Sarawak. *Journal of Asian Earth Sciences*, 17, 255-267.
- Hedberg, H. D., 1968. Significance of high wax oils with respect to genesis of petroleum. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52, 736– 750.
- Herrera, H.M., & Mejía, J.C., 1989. Estudio geomorfológico y estructural de la cuenca del río Poblano. Tesis de Grado Ing. de Geol. Universidad Nacional, Medellín.
- Highon, P.J., Pearson, A. & Scott, A., 1991. Palynofacies and palynodebris and their use in coal measure palaeoecology and palaeoenvironmental analysis. *N. Jb. Geol. Palaont. Abh, Stuttgart*, 183/1-3, 135-169.
- Hoffman, C.F., Mackenzie, A.S., Lewis, C.A., Maxwell, J.R., Oudin, J.L., Durand, B., & Vandembroucke, M., 1984. A biological marker study of coals, shales and oils from the Mahakam Delta, Kalimantan, Indonesia. *Chemical Geology*, 42, 1–23.
- Huang, D., 1999. Advances in hydrocarbon generation theory: II. Oils from coal and their primary migration model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 22, 131–139.
- Hubbard, T.E., Miller, T.R., Hower, J.C., Ferm, J.C. & Helfrich, C.T. 2002. The Upper Hance coal bed in Southeastern Kentucky: Palynological, geochemical and petrographic evidence for environmental succession. *International Journal of Coal Geology*, 49, 177-194.
- Hunt, J.M., 1979. *Petroleum Geochemistry and Geology*. Freeman, San Francisco, Calif., 617 pp.
- Hunt, J.H., 1996. *Petroleum Geology and Geochemistry*, 2nd edition. Freeman, New York, 743p.
- ICCP, 1963. *Int. Handbook Coal Petr.*, suppl. to 1st ed.
- ICCP, 1971. *Int. Handbook Coal Petr.* suppl. to 2nd ed.
- ICCP, 1998. The new vitrinite classification (ICCP System 1994). *Fuel* 77, 349–358.
- ICCP, 2001. The new inertinite classification (ICCP System 1994). *Fuel* 80, 459–471.
- Isaksen, G.H., Curry, D.J., Yeakel, J.D. & Jenssen, A.I., 1998. Controls on the oil and gas potential of humic coals. *Organic Geochemistry* 29, 23 – 44.
- ISO 7404-2., 1985. *Methods for the Petrographic Analysis of Bituminous Coal and Anthracite—Part 2: Method of Preparing Coal Samples*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 8p.
- ISO 7404-3., 1994. *Methods for the Petrographic Analysis of Bituminous Coal and Anthracite—Part 3: Method of Determining Maceral Group Composition*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 4p.
- Jaramillo, C., & Dilcher, D., 2001. Middle Paleogene palynology of Central Colombia, South America: A study of pollen and spores from tropical latitudes. *Palaeontographica*. Stuttgart., 87-213.
- Kalkreuth, W.D., Marchioni, D.L., Calder, J.H., Lamberson, M.N., Naylor, R.D., & Paul, J., 1991. The relationship between coal petrography and depositional environments from selected coal basins in Canada. *International Journal of Coal Geology* 19, 21–76.
- Keller, G., Adatte, T., Stinnesbeck, W., Luciani, V., Karoui, N. & Zaghbib-Turki, D., 2002. Paleobiogeography of the Cretaceous-Tertiary mass extinction in planktic foraminifera. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 178, 257-298.

- Killops, S.D., Woolhouse, A.D., Weston, R.J. & Cook, R.A., 1994. A geochemical appraisal of oil generation in the Taranaki Basin, New Zealand. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 78, 1560–1585.
- Kolcon, I., & Sachsenhofer, R.F., 1999. Petrography, palynology and depositional environments of the early Miocene Oberdorf lignite seam (Styrian Basin, Austria) *International Journal of Coal Geology*, 41, 3, 275–308.
- Kuhn, V., Heydeman, A., & Usdowski, E., 2001. Mineralogy of Upper Albian sediments from the Kirchrode I borehole with special emphasis on the clay mineralogy. *Palaeo.* 145-159.
- Lafargue, E., Marquis, F., Pillot, D., 1998. Rock-Eval 6 applications in hydrocarbon exploration, production, and soil contamination studies. *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP* 53, 421–437.
- Laplante, R.E., 1974. Hydrocarbon generation in Gulf Coats Tertiary sediments. *AAPG Bull.* 58, 1281–1289.
- Leenheer, M.J., Palmer, S.E., Sofer Z., Sutton C., & Zumberge, J.E., 1986. Workshop on the practical applications of organic geochemistry in petroleum exploration. Cities Service Oil and Gas Corporation. Exploration and production group. Production Technology. Tulsa Oklahoma.
- Lester, E., Allen, M., Cloke, M., & Miles, N., 1993. Image analysis techniques for petrographic analysis. *Fuel processing technology*, 36, 17-24.
- Lester, E., Watts, D., & Cloke, M., 2002. A novel automated image analysis method for maceral analysis. *Fuel* 81, 2209 - 2217.
- Li, M., Stasiuk, L., Maxwell, R., Monnier, F., & Bazhenova, O., 2006. Geochemical and petrological evidence for Tertiary terrestrial and Cretaceous marine potential petroleum source rocks in western Kamchatka coastal margin, Russia. *Organic geochemistry*, 37, 304-320.
- Linye, Z., Shouchun, Z., Zhilin, C., & Chunrong, Z., 2004. The generation of immature oils in the lacustrine Jijang mega - depression, Bohay Bay basin, China. *Petroleum Geology*
- Littke, R., & Leythaeuser, D., 1993. Migration of oil and gas in coals. In: Law, B.E. & Rice, D.D. (eds.), *Hydrocarbons in Coal*. American Association of Petroleum Geologists, Studies in Geology, 38, 219– 236.
- Lorente, M., 1986. Palynology and palynofacies of the Upper Tertiary in Venezuela. In : Cramer, J. (ed.), *Dissertationes Botanicae*, Berlin/Stuttgart, 99, 222p.
- Lorente, M.A., 1990. Digital image analysis: an approach for quantitative characterization of organic facies and palynofacies. In: Proceedings of the International Symposium on Organic Petrology, Zeist, Mededelingen Rijks Geologische Dienst, 45, 103-109.
- Louis, M., 1964. Etudes géochimiques sur les ‘Schistes cartons’ du Toarcien du Basin de Paris. In: Hosbson, G.D. & Louis, M.C. (eds.), *Advances in Organic Geochemistry*. Pergamon Press, New York, 84–95.
- Louis, M., & Tissot, B.P., 1967. Influence de la température et de la pression sur la formation des hydrocarbures dans les argiles. *Proc. of Seventh World Petr. Cong. Mexico*, 2, 47–60.
- MacGregor, D.S., Mackenzie, A.S., 1987. Quantification of oil generation and migration in the Malacca Strait region central Sumatra. *Proceedings Indonesian Petroleum Association 15th Annual Convention*, 1986, Jakarta, pp. 305– 319.
- MacGregor, D.S., 1994. Coal-bearing strata as source rocks—a global overview. In: Scott, A.C. & Fleet, A.J. (eds.), *Coal and Coal-Bearing Strata as Oil-Prone Source Rocks?* Geological Society Special Publication, 77, 107–116.
- Mastalerz, M., & Glikson, M., 2000. In-situ analysis of solid bitumen in coal: examples from the Bowen Basin and the Illinois Basin. *International Journal of Coal Geology*, 42, 207–220.
- Mastalerz, M., Padgett, P., & Eble, F., 2000. Block coal from Indiana: Inferences on changing depositional environmental. *International Journal of Coal Geology*. 43, 211-226.
- Masselter, T., & Hofmann, C., 2005. Palynology and palynofacies of Miocene coal-bearing (clastic) sediments of the Hausruck area (Austria). *Geobios*, 38, 127-138.
- Mejía, M., & Salinas, R., 1976. Geología y petrografía de carbones en la Cuenca de Amagá. (Undergraduate thesis). Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 79p.
- Millot, G., 1970. *Geology of clays: Heidelberg* (Springer-Verlag).
- Miner, E.L., 1932. Megaspores ascribed to Selaginellites from Upper Cretaceous coals of western Greenland. *Journal Washington Academy Sciences*, 22(18/19), 407-506.
- Mukhopadhyay, P.K., Hatcher, P.G., & Calder, J.H., 1991. Hydrocarbon generation from deltaic and intermontane fluviodeltaic coal and coaly shale from the Tertiary of Texas and Carboniferous Nova Scotia. *Org. geochemistry*, 17, 765-775.
- Muñoz, P., Gorin, G., & Parra, N., 2004. Reconstruction of palaeovegetation as derived from the palynological study of Lower Tertiary coals in Central Colombia. *Abstract XIth International Palynological Congress, Polen* (Univ. Cordoba, Spain) 14, 464-465.
- Murillo, S., 1998. Estudio petrográfico de las areniscas de la secuencia quebrada la Sucia-Mina Palomos. (Undergraduate Thesis). Universidad Eafit - Medellín Colombia, 153p.

- Newman, J., & Newman, N. A., 1982. Reflectance anomalies in Pike River coals: evidence for variability in vitrinite type, with implications for maturation studies and 'Suggate Rank'. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 25, 233–243.
- Newman, J., Price, L.C., & Johnston, J.H., 1997. Hydrocarbon source potential and maturation in Eocene New Zealand vitrinite-rich coals. *Journal of Petroleum Geology*, 20, 137–163.
- Newman, J., Boreham, C.J., Ward, S.D., Murray, A.P. & Bal, A.A., 1999. Floral influences on the petroleum source potential of New Zealand coals. In: Mastalerz, M., Glikson, M. & Golding, S. D. (Eds.), *Coalbed Methane: Scientific, Environmental and Economic Evaluation*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 461–492.
- Olaya, & Restrepo, (2003). *Correlación entre las Palinofacies y la Geoquímica Orgánica del Pozo Toldado 1, Valle Superior Del Magdalena*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín.
- Ospina, T., 1911. *Reseña sobre la Geología de Colombia y especialmente de Antioquia*. Medellín: La organización, 102p.
- Ottenjahn, K., Teichmuller, M., & Wolf, M., 1975. Spectral fluorescence measurements of sporinites in reflected light and their applicability for coalification studies. In: Alpern, B., (ed.), *pétrographie de la matière organique des sédiments, relations avec la paléotempérature et le potentiel pétrolier*, Paris, 1973, Centre National de la Recherche Scientifique, 49-65.
- Parry, C.C., Whitley, P.J., & Simpson, R.D., 1981. Integration of palynological and sedimentological methods in facies analysis of the Brent Formation. In L. V. Illing & G.B. Hobson (Eds), *Petroleum geology of the continental shelf of North-West Europe*, Heyden, London., 205-215.
- Pellaton, C., 2003. *Distribution of sedimentary organic matter (palynofacies) with respect to palaeoenvironmental conditions: two case histories from the Miocene of the USA*. Ph.D. Thesis, Université de Geneve, Geneva, Switzerland, 185p.
- Pérez, C.A.L., 2005. *Formación Combia: Litofacies y aproximación a su edad con base en el estudio palinológico. Suroeste Antioqueño, (Undergrade thesis)*. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Peters, K., & Moldowan, J.M., 1993. *The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments*. New Jersey: Prentice Hall, 363p.
- Petersen, H. I. & Rosenberg, P., 2000. The relationship between the composition and rank of humic coals and their activation energy distributions for the generation of bulk petroleum. *Petroleum Geoscience*, 6, 137–149
- Petersen, H.I., 2004. The effective oil window of coal: variations related to composition and coal age. Abstracts: TSOP, Twenty- first annual meeting, Sydney Australia, 141-143.
- Petersen, H.I., 2005. Oil generation from coal source rocks: the influence of depositional conditions and stratigraphic age. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, 7, 9–12.
- Petersen, H.I., & Nytoft, H.P., 2006. Oil generation capacity of coals as a function of coal age and aliphatic structure. *Organic geochemistry*, 37, 558-583.
- Philp, P.R., 1994. Geochemical characteristics of oil derived predominantly from terrigenous source materials. In: Scott, A.C., & Fleet, A.J. (eds.), *Coal and Coal-Bearing Strata as Oil-Prone Source Rocks?* Geological Society Special Publication, 77, 31–71.
- Pons, D., 1984. *La flore du Bassin Houiller d'Antioquia. (Tertiare de Colombie)*. 109ème Congres Natural des sociétés savantes, Dijon, France, 37-56.
- Posada, J., 1913. *Notas sobre la Formación Carbonífera de Amagá*. *Anales Escuela Nal. de Minas*. Medellín, Vol. II (13), 232-237.
- Powell, T.G., Creaney, S., & Snowdon, L.R., 1982. Limitations of use of organic petrographic techniques for identification of petroleum source rocks. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 66, 430 – 435.
- Powell, T.G., 1987. Depositional controls on source rock character and crude oil composition. *Proc. 12th World Petroleum Congress*, vol. 2, pp. 31– 42.
- Powell, A.J., Dodge, J.D., & Lewis, J., 1990. Late Neogene to Pleistocene palynological facies of the Peruvian continental margin upwelling, Leg 112. In: Suess, E., Von Huene, R. et al., (eds.), *Proc. O.D.P., Scientific Results* 112, 297-321.
- Powell, T.G., & Boreham, C.J., 1994. Terrestrially sourced oils: where do they exist and what are our limits of knowledge? a geochemical perspective. In: Scott, A.C. & Fleet, A.J. (eds.), *Coal and Coal-Bearing Strata as Oil-Prone Source Rocks?* Geological Society Special Publication, 77, 11–29.
- Radke, M., Schaefer, R.G., Leythaeuser, D. & Teichmuller, M., 1980. Composition of soluble organic matter in coals: relation to rank and liptinite fluorescence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44, 1787–1800.
- Ramírez, P., 1991. *Carbones de rangos medios y altos en la Formación Amagá (Antioquia)*. I Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología del Carbón. Medellín, Colombia, 27-44.
- Ramírez, P., 1992. *Introducción a la caracterización de carbones*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín, Colombia, 202p.

- Restrepo, A. & Blandón, A., 2002. Resultados del estudio de los macerales liptiníficos del carbón de la Formación Amagá utilizando análisis de imagen. EITI. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas.
- Restrepo, A., 2003. Desarrollo de la microscopía asistida por computador para el estudio del material particulado: etapa visión artificial de bajo nivel. EITI. Universidad Nacional de Colombia Medellín. Facultad de Minas.
- Restrepo, A., 2004. Microscopía asistida por computador (MAC) aplicada a la caracterización del material particulado. MSc thesis. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Colombia.
- Restrepo, A. Blandón, A., & Arango, F., 2006. Estudio de La Fluorescencia de Mantos de Carbón de la Cuenca de Amaga, usando el índice G/R, Análisis de Imagen y Pirólisis Rock-Eval. Revista Ciencias de la Tierra.
- Restrepo, E. 1921. Apuntes sobre la Formación Carbonífera de Amagá. Anales Fac. Nal. de Minas. No. 5 286-288.
- Robert, P., 1980. The optical evolution of kerogen and geothermal histories applied to oil and gas exploration. In Durand, B. (ed.), Kerogen, insoluble organic matter from sedimentary rocks. Editions Technip Paris, 385-414.
- Robert, C., & Kennett, J.P., 1992. Paleocene and Eocene kaolinite distribution in the South Atlantic and Southern Ocean: Antarctic climatic and paleoceanographic implications. *Mar. Geol.* 103, 99-110.
- Robert, C., & Kennett, J.P., 1994. Antarctic subtropical humid episode at the Paleocene-Eocene boundary: clay mineral evidence. *Geology*, 22:211-214
- Ruiz, O., 1998. Mise en place des flores colombiennes du Maestrichtien au Tertiaire inferieur: Interet de la palynologie. Diplôme d'études approfondies en paléontologie. Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 57p.
- Smyth, M., 1979. Hydrocarbon generation in the Fly Lake, Brolga area of the Cooper Basin. *J. Aust. Pet. Assoc.* 19, 108 – 114.
- Sauvage, J., 1968. La palynologie: Historique, Méthodes et applications. *Revue de Géographie Physique et Dynamique*, Paris, 10, 197-203.
- Scheibe, R., 1919. Geología del Sur de Antioquia. *Comp. Est. Geol. de Colombia*. Bogotá. 97-167.
- Schuler, M., & Doubinger, J., 1970. Observations palynologiques dans le Bassin d'Amagá (Colombie). *Pollen et Spores*, 12, 429-450.
- Schulze, F., 1855. Über das vorkommen wohlhaltener Cellulose in Braunkohle und Steinkohle. *Ber.K. Akad-Wiss*, Berlin, 676-678.
- Scott, A.C., & Fleet, A.J., 1994. Coal and coal-bearing strata as oil prone source rocks: current problems and future directions. In: Scott, A.C. & Fleet, A.J. (eds.), *Coal and Coal-Bearing Strata as Oil-Prone Source Rocks? Geological Society Special Publication*, 77, 201 – 205.
- Shanmugam, G., 1985. Significance of coniferous rain forests and related organic matter in generating commercial quantities of oil, Gippsland basin, Australia. *AAPG bulletin*, 69/8, 1241-1254.
- Smith, M., 1980. Thick coal members: products of an inflationary environment? *Aust. Coal Geol.*, 2: 53-72.
- Smith, M., 1983. Nature of source material for hydrocarbons in Cooper basin, Australia. *AAPG Bulletin*, 67/9, 1422-1428.
- Snowdon, L.R., 1980. Resinite - a potential petroleum source in the Upper Cretaceous/Tertiary of the Beaufort - Mackenzie basin. In: Miall, A.D. (ed.), *Facts and Principles of World Petroleum Occurrence*. Canadian Society of Petroleum Geology Memoir, 6, 421-446.
- Snowdon, L.R., & Powell, T.G., 1982. Immature oil and condensate: modification of hydrocarbon generation model for terrestrial organic matter. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 66, 775-788.
- Snowdon, L.R., 1991. Oil from type III organic matter: resinite revisited. *Org. geochemistry*, 17, 743-747.
- Snowdon, J.O., & Forsthoff, G.M., 1976. Clay sedimentation in the Pearl River Delta, Louisiana-Mississippi. *Trans.-Gulf Coast Assoc. Geol. Soc.*, 26:298-304
- Stach, E., Mackowosky, M., Teichmuller, M., Taylor, G.H., Chandra, D., & Teichmuller, R., 1982. *Stach's Textbook of Coal Petrology*, 3rd Ed, Gebruder Borntraeger, Stuttgart, 335p.
- Staub, J.R., & Cohen, A.D., 1979. The Snuggedy Swamp of South Carolina: a back-barrier estuarine coal-forming environment. *J. Soc. Palynol.*, 49:133-144.
- Steffen, D., & Gorin, G.E., 1993. Palynofacies of the Upper Tithonian-Berriasian deep-sea carbonates in the Vocontian Trough (SE France). In: *Bull. Centr. Rech. Expl. Prod. ELF Aquitaine*, 17, 235-247.
- Stout, S.A., 1994. Chemical heterogeneity among adjacent coal microlithotypes-implications for oil generation and primary migration from humic coal. In: Scott, A.C. & Fleet, A.J. (eds.), *Coal and Coal-Bearing Strata as Oil-Prone Source Rocks? Geological Society Special Publication*, 77, 93-106.
- Styan, W.B. & Bustin, R.M., 1983. Petrography of some Fraser River Delta peat deposits: coal maceral and microlithotype precursors in temperate climate peats. *Int. J. Coal Geol.*, 2:321-370.

- Sucerquia, P., 2004. Uso de la Materia Orgánica Sedimentaria como herramienta para la interpretación de ambientes sedimentarios en la Formación Amagá, Sección los Almendros, Municipio de Sopetrán. (Undergraduate thesis). Universidad Eafit–Medellín Colombia, 93p.
- Surange, K.R., Singh, P., & Srivastava, R., 1953. Megaspores from the west Bokaro Coalfield (Lower Gondwanas) of Bihar. *Palaeobotanist*, 2, 9-17.
- Sweet, A.R., & Cameron, A.R., 1991. Palynofacies, coal petrographic facies and depositional environments: Amphitheatre Formation (Eocene to Oligocene) and Ravenscrag Formation (Maastrichtian to Paleocene), Canada. In: Kalkreuth, W., Bustin, R.M. & Cameron, A.R. (eds.). *Int. J. Coal Geol.*, 19, 121-144.
- Sykes, R., & Snowdon, L.R., 2002. Guidelines for assessing the petroleum potential of coaly source rocks using Rock-Eval pyrolysis. *Organic geochemistry*, 33, 1441-1455.
- Tasch, K.H., 1960. Die Möglichkeiten der Flözgleichstellung unter Zuhilfenahme von Flözbildungsdiagrammen. *Bergbau-Rdsch.* 12, 153–157.
- Taylor, G.H., Teichmüller, M., Davis, A., Diessel, C.F.K., Littke, R. & Robert, P., (eds.), 1998. *Organic Petrology*. Gebrüder Borntraeger, Berlin, 704p.
- Teichmüller, M. & Teichmüller, R., 1973. The geological basis of coal formation. In: Stach, E., Mackowsky, M.T., Teichmüller, M., Taylor, G.H., Chandra, D. & Teichmüller, R. (eds.), *Coal petrology*. Gebrüder Borntraeger, Berlin-Stuttgart, 5-86.
- Teichmüller, M., 1974. Generation of petroleum-like substances in coal seams as seen under the microscope. In: Tissot, B. & Bienner, F. (eds.), *Advances in Organic Geochemistry 1973*. Technip, Paris, 379– 407.
- Teichmüller, M., 1982. Coalification and bituminization. In: Stach, E., Mackowsky, M.T., Teichmüller, M., Taylor, G.H., Chandra, D. & Teichmüller, R. (eds.), *textbook of coal petrology*, Geb. Borntraeger, Berlin-Stuttgart, 66-82.
- Teichmüller, M., & Durand, B., 1983. Fluorescence microscopical rank studies on liptinites and vitrinites in peat and coals, and comparison with results of the Rock-Eval pyrolysis. *International Journal of Coal Geology*, 2, 197– 230.
- Teichmüller, M., 1989. The genesis of coal from the viewpoint of coal petrology. *International Journal of Coal Geology*, 12, 1–87.
- Thiergart, F., 1940. Die Mikropaläontologie als Pollenanalyse im Dienst der Braunkohlenforschung. *Brennstoff-Geologie*, 13:1-82.
- Thomas, B.M., 1982. Land plant source rocks for oil and their significance in Australian Basins. *Australian Petroleum Exploration Association Journal*, 22, 164–178.
- Thomas, L., 2002. *Coal Geology*. John Wiley & Sons Ltd (ed.), England. 384p.
- Tissot, B., Durand, J., Espitalié, J., & Combaz, A. (1974). Influence of Nature and Diagenesis of Organic Matter. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 58/3, 499-506.
- Tissot, B., & Welte, D., 1984. *Petroleum Formation and Occurrence: (2nd revised and enlarged edition)*. Springer-Verlag, Berlin. 538 p.
- Tyson, R.V., 1995. *Sedimentary Organic Matter: Organic Facies and Palynofacies*. Chapman & Hall, London 615 p.
- Tyson, R.V., 1996. Sequence stratigraphical interpretation of organic facies variations in marine siliciclastic systems: general principles and application to the onshore Kimmeridge Clay Formation, UK. In: Hesselbo, S. & Parkinson, N. (eds.), *Sequence Stratigraphy in British Geology*, Geological Society of London Special Publication, 103, 75-96.
- Van der Hammen, T., 1958. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano y tectogenesis de los Andes Colombianos. *Bol. geol. Bogotá*, 6/2, 67-128.
- Van Krevelen, O., 1961. *Coal* Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 270 p.
- Van Valkenburg, S., Mason, D., Owens, P., & McCartan L., 1997. Clay mineralogy of the Cape May, Atlantic City, and island beach boreholes, New Jersey. Miller, K. G. and Snyder S. W. (Eds.). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. Vol 150X*, 59-64
- Vassoevich, N.B., Akramkhodzhaev, A.M., & Geodekyan A.A., 1974. Principal zone of oil formation. In: Tissot, B.P. & Bienner, F., (eds.), *Advances in Organic Geochemistry*. Technip, Paris, 309–314.
- Velásquez, M., 2001. Las Palinofacies como indicadores de discontinuidades estratigráficas en la cuenca de los Llanos. Universidad Eafit. Medellín.
- Wan Hasiyah, A., 1999. Oil-generation potential of Tertiary coal and other organic-rich sediments of the Nyalau Formation, Onshore Sarawak. *Journal of Asian Earth Sciences*, 17, 255-267.
- Waples D.W., 1982. Phosphate-rich sedimentary rocks: Significance for organic facies and petroleum exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 16, 2, 135-160.
- Weaver, C.E., 1989. *Clays, Muds and Shales: New York (Elsevier)*, Dev. In *Sedimentol. Ser.*, 44
- Weng, R.F., Huang, W.L., Kuo, C.L. & Inan, S., 2003. Characterization of oil generation and expulsion from coals and source rocks using diamond anvil cell pyrolysis. *Organic Geochemistry*, 34, 771-787.

- Whitaker, M.F., 1984. The usage of palynology in definition of Troll Field Geology. In: Reduction of uncertainties in Innovative Reservoir Geomodelling. 6th offshore Northern Seas Conference and exhibition, Stavanger, Norsk Petroleum-forening, paper G6, 44p.
- Wignall, P.B., & Ruffell, A.H., 1990. The influence of a sudden climatic change on marine deposition in the Kimmeridgian of North West Europe. *Journal of the Geological Society, London*, 147, 365–372.
- Wilkins, R.W.T., & George, S.C., 2002. Coal as rock source for oil: a review. *International Journal of Coal Geology*, 50, 317–361.
- Wood, G.D., Gabriel, A.M., & Lawson, J.C., 1996. Chapter 3. Palynological techniques-processing and microscopy. In: Jansonius, J. & McGregor, D.C. (eds.), *Palynology: Principles and applications*, American Association of Stratigraphic Palynologist Foundation, 1, 29-50.
- Wood, S.E., & Gorin, G., 1998. Sedimentary organic matter in distal clinoforms of Miocene slope sediments: Site 903 of ODP leg 150, offshore New Jersey (U.S.A). *Journal of Sedimentary Research*, 68, 856-868.
- Yule, B., Roberts, S., Marshall, J., & Milton J., 1998. Quantitative Spore colour measurement using colour image analysis. *Organic Geochemistry*, 28/3-4, 139-149.
- Zegarra, M., 1993. Estudio palinológico de la Formación Amagá en la cuenca de Sopetrán. (Undergraduate Thesis). Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, 123p.

ANEXO A1: Método de preparación de palinofacies

Appendix A1: Palynofacies preparation method

Las principales etapas de la preparación son las siguientes:

- ***Preparación de la muestra***

Secado a temperatura ambiente durante 24 horas para evitar la aglomeración de las partículas de carbón y de lutitas carbonosas durante la molienda.

Trituración de la muestra con un molino de disco a tamaño menor de 250 μ . Este tamaño relativamente pequeño se escoge con el objeto de separar completamente todos los constituyentes durante el procesamiento químico. Los constituyentes mayores que 250 μ se podrían quebrar, pero se pueden aun observar en las preparaciones de palinofacies. Además, no es común tener megasporas en las muestras estudiadas.

- ***Procesamiento químico***

En el caso de las muestras tropicales, las cuales son ricas en materiales húmicos y contienen constituyentes estructurados que son muy sensibles a los métodos de preparación (por ejemplo los constituyentes vitriniticos se alteran con los ácidos), las técnicas de preparación estándar, han demostrado que no son eficientes. Por lo tanto la técnica de procesamiento ha sido mejorada.

Oxidación de los ácidos húmicos (para ablandar parcialmente la roca)

Con el objetivo de obtener una mezcla de Shulze relacionada a la dureza de las rocas, hay que variar las proporciones de clorato de potasio saturado (KClO₃) y ácido nítrico concentrado (HNO₃). Usualmente la relación varía de 1:3 (método de Shulze) a 1:8. La proporción de muestra molida a la mezcla de Shulze debe ser de un mínimo de 1:20.

Aproximadamente 1 cm³ de carbón, o 1.5 cm³ de lutita carbonosa se adicionan a 20 ml de la solución de Shulze (KClO₃ mezclado con HNO₃ concentrado en una relación de 1:3). Si no se presenta reacción química en la primera 1/2 hora, 2ml o más de ácido nítrico se adicionan hasta que la mezcla empieza a reaccionar volviéndose amarilla o pardo claro u oscuro. La mezcla se deja en reposo durante un o dos días, hasta que la partículas de carbón se ablanden y la solución se vuelve completamente parda. Esto se da a las condiciones del ambiente del laboratorio y se debe dejar hasta que las partículas se desagreguen completamente. Finalmente la muestra es centrifugada durante tres minutos a 3000 rpm.

- ***Depolimerización alcalina***

La degradación de las huminas se lleva a cabo a través del uso de una solución alcalina. Con el objetivo de hacer la solución más adecuada, es una mezcla de hidróxido de sodio 0.1N (NaOH) y pirofosfato de sodio 0.1N (Na₄P₂O₇). Esos dos reactivos se mezclan en una relación de 1:1 y desintegra las huminas en moléculas más pequeñas, las cuales son más solubles en álcalis. Aunque la reacción no es muy visible su influencia sobre el resultado final es notable. Esta solución desagrega completamente la muestra, la cual se vuelve parcialmente líquida. La muestra se deja en la solución alcalina entre una y dos horas, pero normalmente es conveniente dejarla más tiempo.

- ***Remoción de las sustancias húmicas***

Con el objeto de disolver las huminas completamente y simultáneamente limpiar las partículas orgánicas de cualquier componente orgánico que se pueda pegar a ellas, una solución de 50% de hidróxido de amonio (NH₄OH) y agua se adicionan a la muestra. La solución se vuelve instantáneamente negra debido a la disolución de las sustancias húmicas. El residuo orgánico es posteriormente concentrado por centrifugación. El lavado con amonio se repite, hasta que la solución se vuelva sin color: Este paso es importante para eliminar completamente los ácidos húmicos. Este proceso no afecta los constituyentes orgánicos, incluyendo los palinomorfos, Finalmente el residuo es lavado con agua al menos tres veces, hasta que la solución se vuelva neutra.

- ***Chequeo microscópico del residuo***

En esta etapa la evaluación microscópica de una gota del residuo se necesita para evaluar los resultados de las fases de procesamiento 1 y 2. De particular interés es la observación del grado de concentración, de claridad de los componentes, la concentración del tipo de finos (< 10 micras) y el grado de separación del material.

- ***Filtración***

En muchos casos, las partículas menores a 10 micras, interfieren con los estudios de palinofacies y son eliminados por filtración con vacío a través de una malla de nylon de 10 micrones. Esto requiere de equipo de filtración especial (ver Traverse, 1988) y una solución altamente diluida. Este proceso es lento y delicado y se requiere especial cuidado para evitar cualquier fuente de contaminación.

- ***Separación con líquidos pesados***

La separación con líquidos pesados es otra técnica diseñada para concentrar materia orgánica y eliminar la materia mineral. Algunos líquidos pesados como bromuro de zinc no se mezclan con el agua y mucho del contenido de agua necesita ser removido del residuo orgánico antes de la separación. Otros líquidos tales como cloruro de Zinc, tienen la ventaja de mezclarse fácilmente con el agua y son menos tóxicos. En este caso, es preferible usar cloruro de Zinc a una densidad de 2 g/cc.

En la Formación Amagá, la separación con líquidos pesados se llevó a cabo solamente en las lutitas carbonosas, porque los carbones contienen muy bajo porcentaje de minerales. Si se requiere la separación esta se debe efectuar cuidadosamente usando el equipo adecuado (ver Traverse, 1988).

- ***Deshidratación***

El residuo obtenido después de la separación con líquidos pesados (lutitas carbonosas) o filtración directa (carbones) es deshidratado como sigue:

Por centrifugación se elimina la mayor cantidad de agua. Posteriormente el residuo es mezclado con una solución de etanol y agua (proporción 1:1) y centrifugada. Finalmente, el residuo es mezclado con 100% de etanol y centrifugado al menos tres veces. El residuo en etanol se separa en dos partes, una es una muestra de archivo, y la otra se usa para preparar las placas.

- ***Preparación del residuo antes del montaje de la placa***

Preparación del residuo antes del montaje de las placas

El residuo orgánico deshidratado se mezcla con xileno y la solución se deja en reposo por al menos dos horas. Este paso es raramente usado en los procedimientos de preparación estándar, pero tiene muchas ventajas:

Permite la dispersión óptima de las partículas

Ayuda a los granos de polen a hincharse parcialmente

Mejora la adhesión de las partículas a la placa

Mejora el contraste óptico entre las partículas y el medio de montaje

Mejora la homogenización: El medio es más viscoso y mejora la dispersión de los constituyentes

- ***Montaje de la placa***

El cubreobjetos se limpia con alcohol. Una gota del residuo en xileno se coloca sobre el cubreobjetos, se adiciona otra gota de la resina de montaje (eukit[®] diluido con xileno). El residuo se mezcla con una aguja sobre el cubreobjetos. Este se deja secar durante un día a temperatura ambiente.

El portaobjetos se limpia con alcohol. Se colocan una o dos gotas de eukitt[®]. Si la resina esta muy viscosa, algo de xileno se le puede adicionar para diluir ligeramente este. El cubreobjetos es delicadamente colocado sobre el portaobjetos y se ejerce algo de presión hasta que la resina impregne todo el cubreobjetos sin burbujas. La placa se deja secar a temperatura ambiente por un día, luego se limpia el exceso de resina con una cuchilla

- ***Evaluación del método***

Para evaluar el efecto del método de preparación, se seleccionaron varias muestras y en cada paso del proceso de tratamientos ácidos, se tomó una muestra parcial, se lavó con agua destilada y se montó con gelatina glicerizada tal y como se hacen las preparaciones palinológicas de tal modo que no se afectara la muestra con disolventes (etanol y xileno).

Descripción de las muestras resultantes en cada proceso.

1. Muestra después de 40 minutos en ácido nítrico + clorato de potasio. Se pueden observar las partículas grandes de color oscuro con especies de exsudados redondeados alrededor de ellas, en fluorescencia, se nota la alta intensidad que presenta el medio de montaje y el color amarillo pardo de los exsudados. Aquí no se alcanzan a diferenciar los diferentes componentes de la materia orgánica (Fig. A1-1).

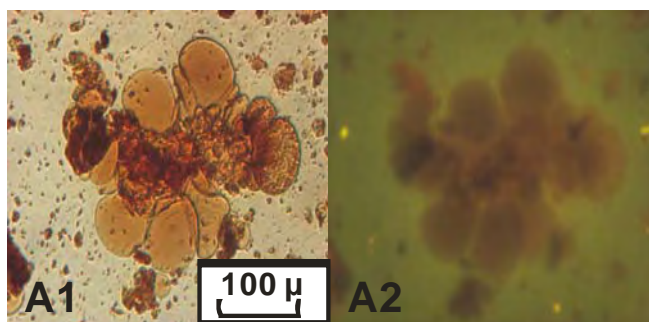


Fig. A1-1. Muestra después de 40 minutos en ácido nítrico+clorato de potasio. A1. Luz blanca transmitida 1/50 seg. y A2. luz reflejada fluorescente 3 seg. 200x

- Muestra después de 24 horas en ácido nítrico+clorato de potasio. A este tiempo las partículas se ven más separadas y presentan los exsudados redondeados. El color de fluorescencia de algunas partículas es muy alto, pero igual que en 1 todavía no se diferencian componentes (Fig. A1-2).

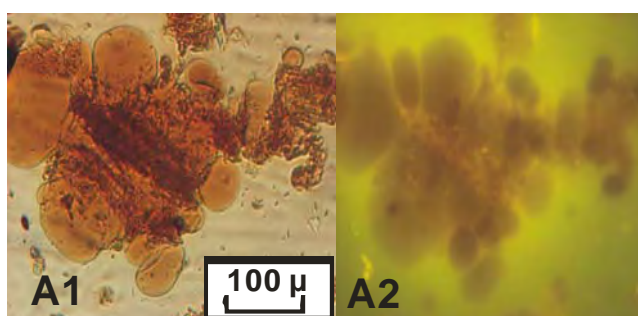


Fig. A1-2. Muestra después de 24 horas en ácido nítrico+clorato de potasio. A1 Luz blanca transmitida 1/50 seg. y A2. luz reflejada fluorescente 3 seg. 200x.

- Muestra después de agregar pirofosfato de sodio+hidróxido de sodio. Se notan exsudados mayores y el color de fluorescencia sigue en aumento, aquí tampoco se diferencian los componentes, pero se alcanzan a ver partículas más pequeñas que en el caso anterior (Fig. A1-3).

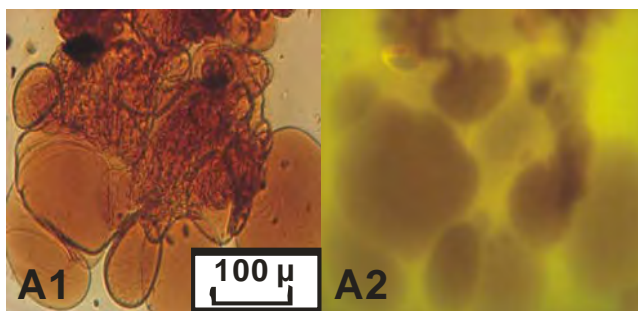


Fig. A1-3. Muestra después de agregar pirofosfato de sodio+hidróxido de sodio. A1. Luz blanca transmitida 1/50 seg. y A2. luz reflejada fluorescente 3 seg. 200x.

- Muestra después de agregar amoníaco (primer vez). Las partículas se tornan pardas amarillas y se ven bien definidas las formas, la fluorescencia del medio de montaje es mucho menor y las partículas presentan una fluorescencia pardo amarilla a amarilla intensa. Aquí todavía se observan partículas unidas y el porcentaje de partículas pequeñas es mayor. Se empiezan a bosquejar algunos componentes claramente (Fig. A1-4).

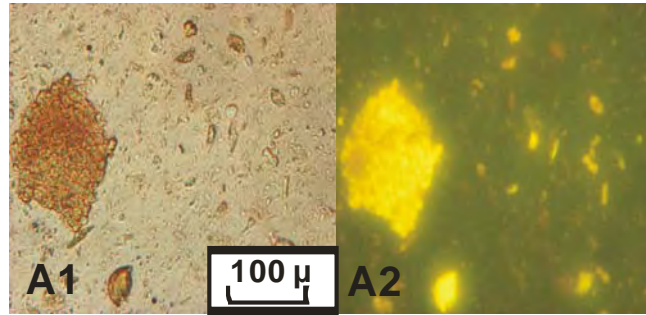


Fig. A1-4. Muestra después de agregar amoniaco (primera vez). A1.Luz blanca transmitida 1/50 seg. y A2. luz reflejada fluorescente 3 seg. 200x.

- Muestra después de agregar amoniaco (segunda vez). Las partículas se tornan mucho más claras y se individualizan más, la fluorescencia del medio de montaje se torna oscura y las partículas presentan una fluorescencia más alta y se alcanzan a diferenciar muchos componentes (Fig. A1-5).

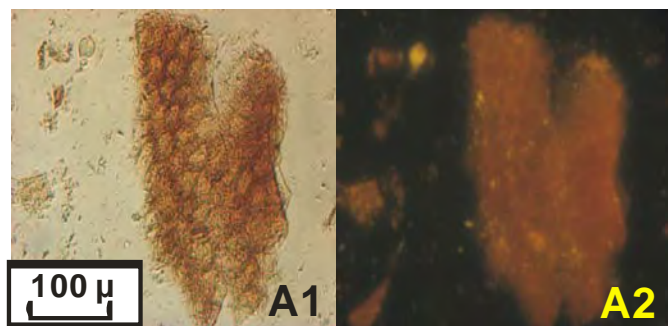


Fig. A1-5. Muestra después de agregar amoniaco (segunda vez). A1. Luz blanca transmitida 1/50 seg. y A2. luz reflejada fluorescente 3 seg. 200x.

- Muestra después de agregar amoniaco (tercera vez). Se ve como realmente son las partículas variando desde muy delgadas a gruesas, de color transparente a pardo oscuro, de tamaño pequeño a grande. Aquí ya se alcanzan a diferenciar claramente los diferentes componentes como son: amorfos, tejidos, cutículas, resinas, granos de polen y esporas, hongos, algas etc. (Fig. A1-6).

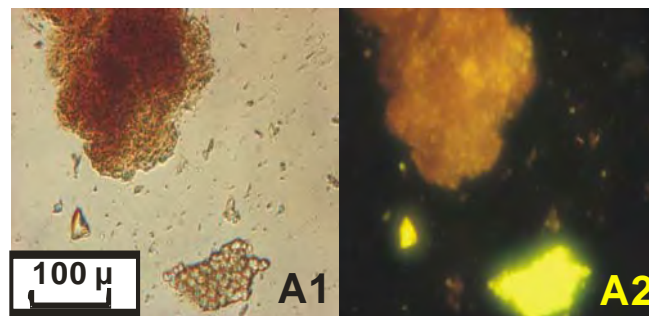


Fig. A1-6. Muestra después de agregar amoniaco (tercera vez). A1. Luz blanca transmitida 1/50 seg. y A2. luz reflejada fluorescente, 3 seg. 200x.

- Muestra final. A medida que avanza el proceso, las partículas se desglosan en sus distintos componentes de tal modo que al final ya se tienen todas las partículas individuales, sólo se tienen agregadas las que realmente aparecen de esa forma. Igualmente los colores de fluorescencia son los reales y así cada componente presenta un color de fluorescencia y una forma característica que los permiten diferenciar unos de otros (Fig. A1-7).

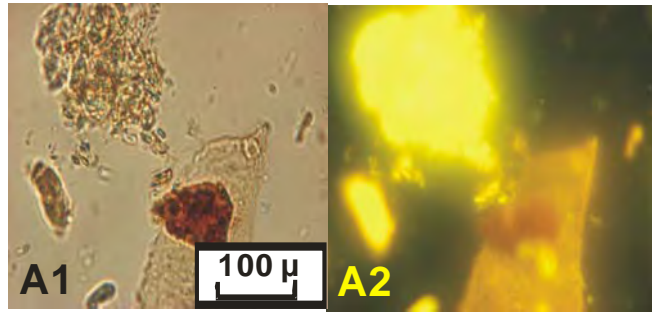
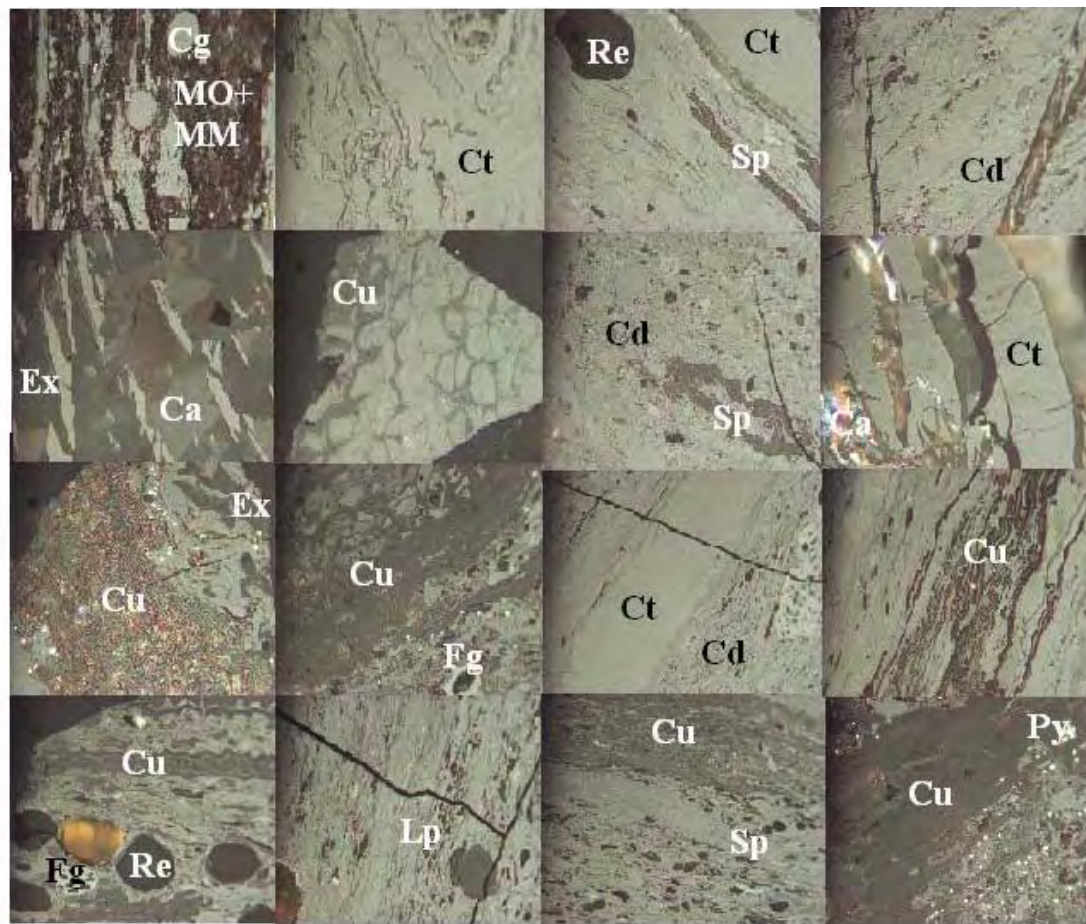


Fig. A1-7. Muestra terminada. A1. Luz blanca transmitida 1/50 seg. y A2. luz reflejada fluorescente, 3 seg. 200x.

ANEXO A2: Imágenes patrón en petrografía y en palinofacies

Appendix A2: Type images in petrography and palynofacies



Vitrinite	Liptinite	Inertinite	Minerals
Ct = Colotelinite	Sp = Sporinite	Fg = Funginite	Ca = Carbonates
Cd = Colodetrinite	Cu = Cutinite		Py = Pyrite
Cg = Corpogelinite	Ex = Exsudatinite	MO + MM = Organic matter + mineral matter	
	Lp = Liptodetrinites		
	Re = Resinita		

Vitrinite	Liptinite	Inertinite	Minerals
Ct=Colotelinite	Sp=Sporinite	Fg=Funginite	Ca=Carbonates
Cd=Colodetrinite	Cu=Cutinite		Py=Pyrite
Cg=Corpogelinite	Ex=Exsudatinite	Others	
	Lp=Liptodetrinite	MO+MM=Organic matter+	
	Re=Resinita	Mineral matter	

Fig. A2-1. Imágenes patrón en petrografía

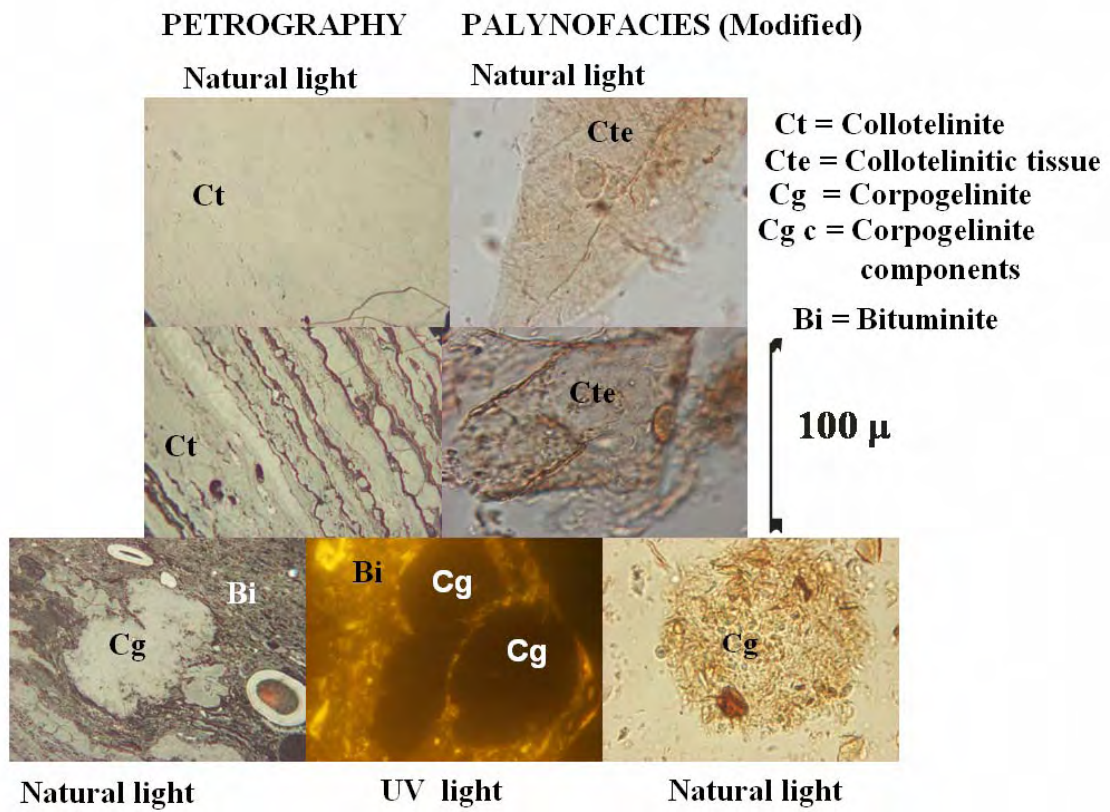


Fig. A2-2. Colotelinite and corpogelinite y su equivalentes en palinofacias.

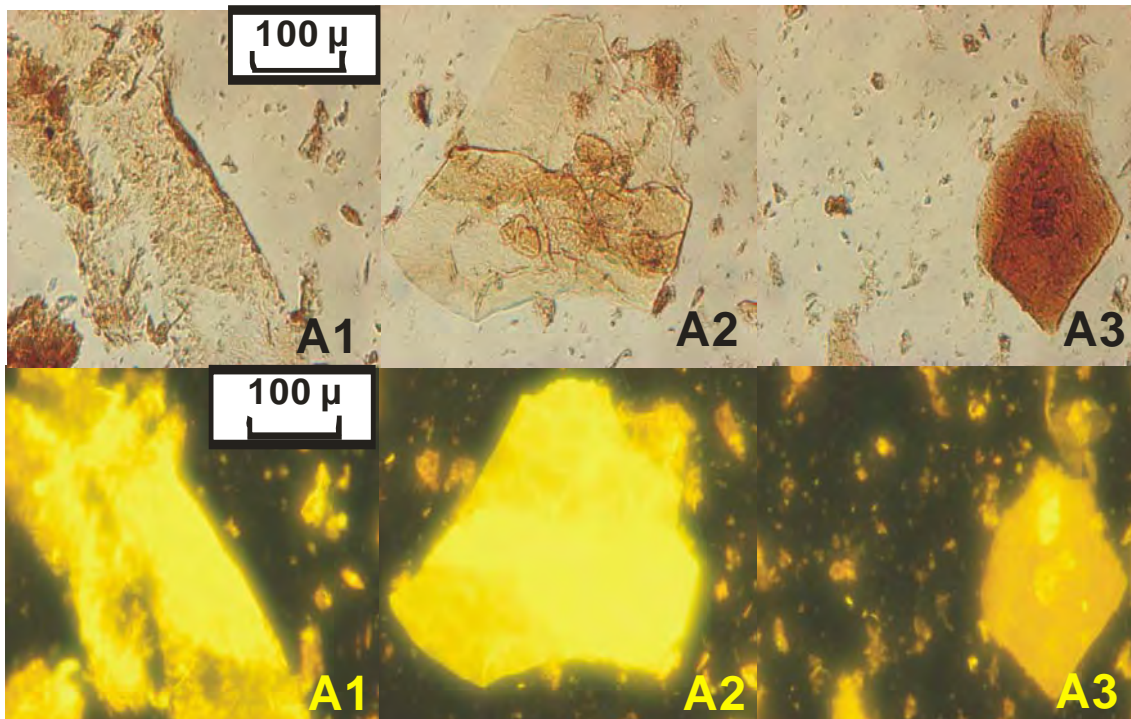


Fig. A2-3. Imágenes tejidos vitriniticos con diferentes grados de preservación

ANEXO A3: Imágenes microscopía electrónica

Annex A3: MEB images

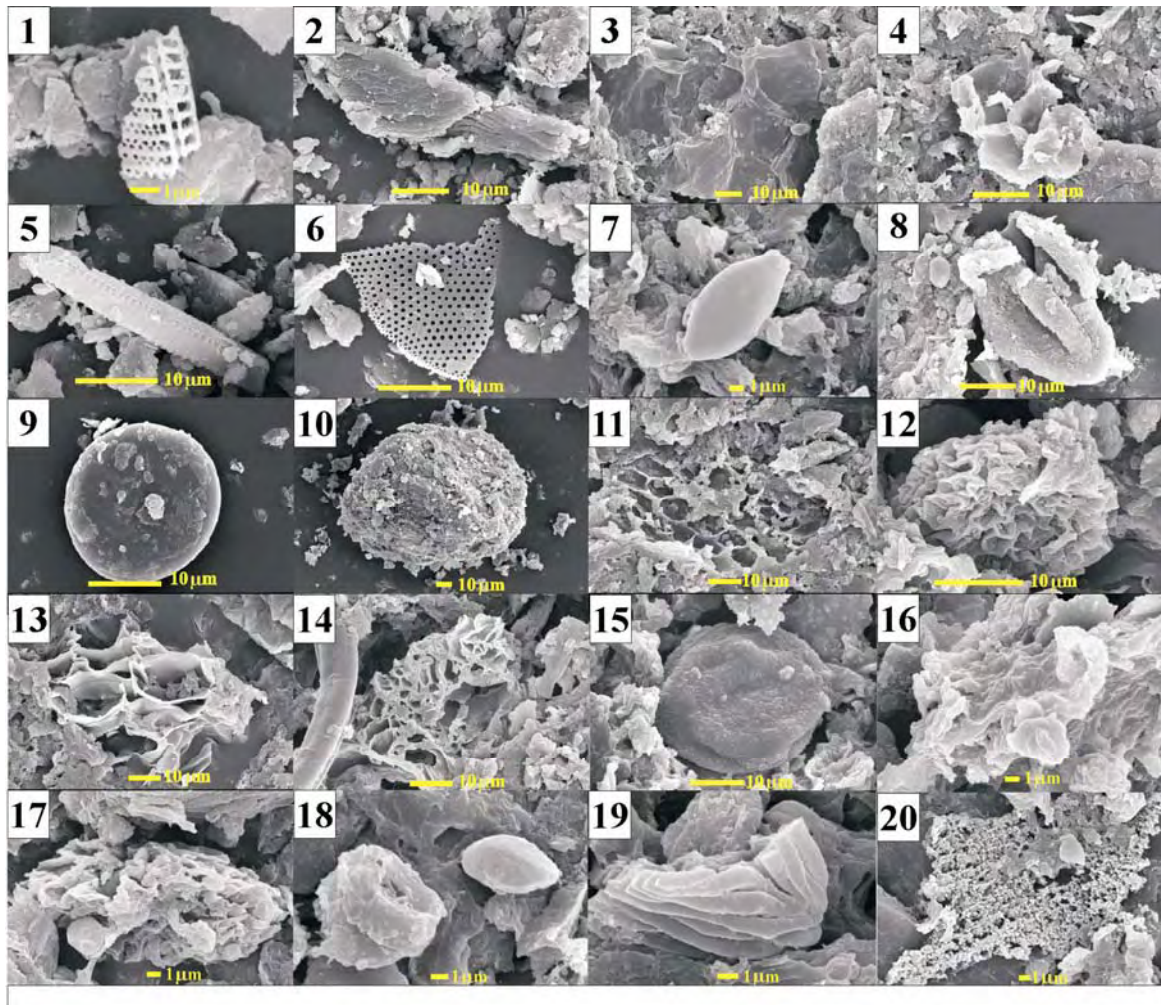


Fig. A3-1. Imágenes de microscopía electrónica de algunos de los componentes de las palinofacies de Manto 1 de las Minas el Bloque y Nechí :

- 1, 5 y 6. Fragmentos de diatomeas;
- 2, 3, 16 y 20. Diferentes tipos de tejidos;
- 4, 11, 13 y 14. Cutículas;
- 7, 8, 9, 11, 12, 15, 17, 18, y 19. Diferentes tipos de palinomorfos (polen, esporas, algas, rosarios).

Fig. A3-1. MEB images of some palynofacies components from seam 1 of the Bloque and Nechi Mines :

- 1, 5 y 6. Fragments of diatomeas;
- 2, 3, 16, 20. Different types of vegetal tissues;
- 4, 11, 13 y 14. Cuticles;
- 7, 8, 9, 11, 12, 15, 17, 18, y 19. Different types of palynomorphs (pollen, spores, algae, rosaries).

ANEXO A4: Columnas estratigráficas detalladas de los mantos analizados

Appendix A4: Detailed stratigraphical columns of studied coal seams

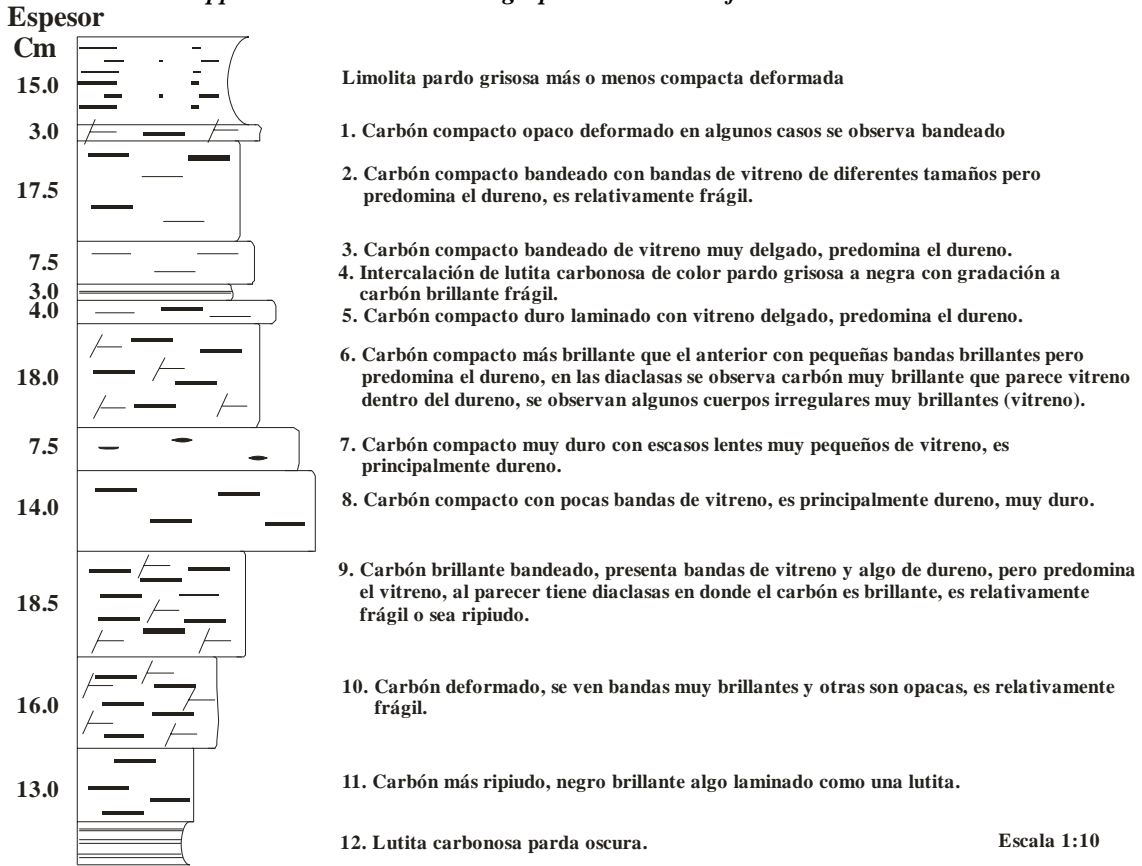


Fig. A4-1. Columna estratigráfica detallada, Manto 1 El Bloque

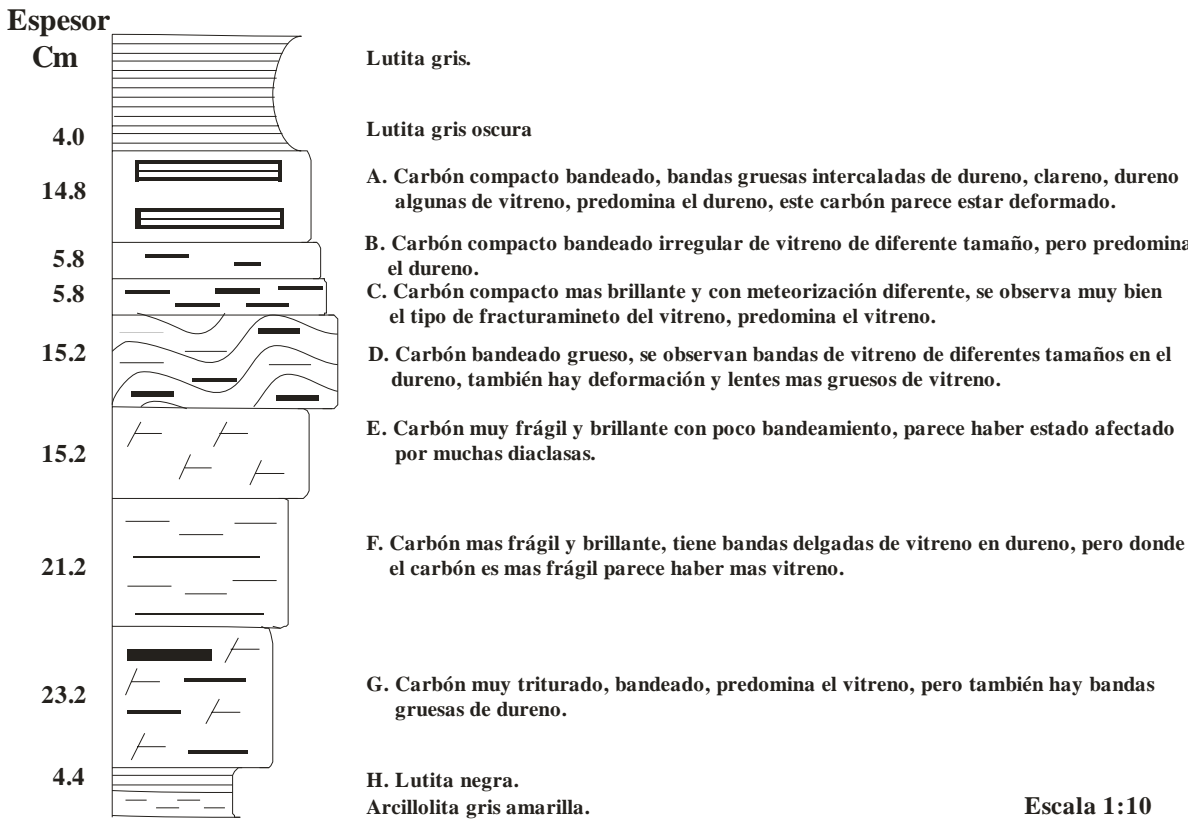


Fig. A4-2. Columna estratigráfica detallada, Manto 2 El Bloque

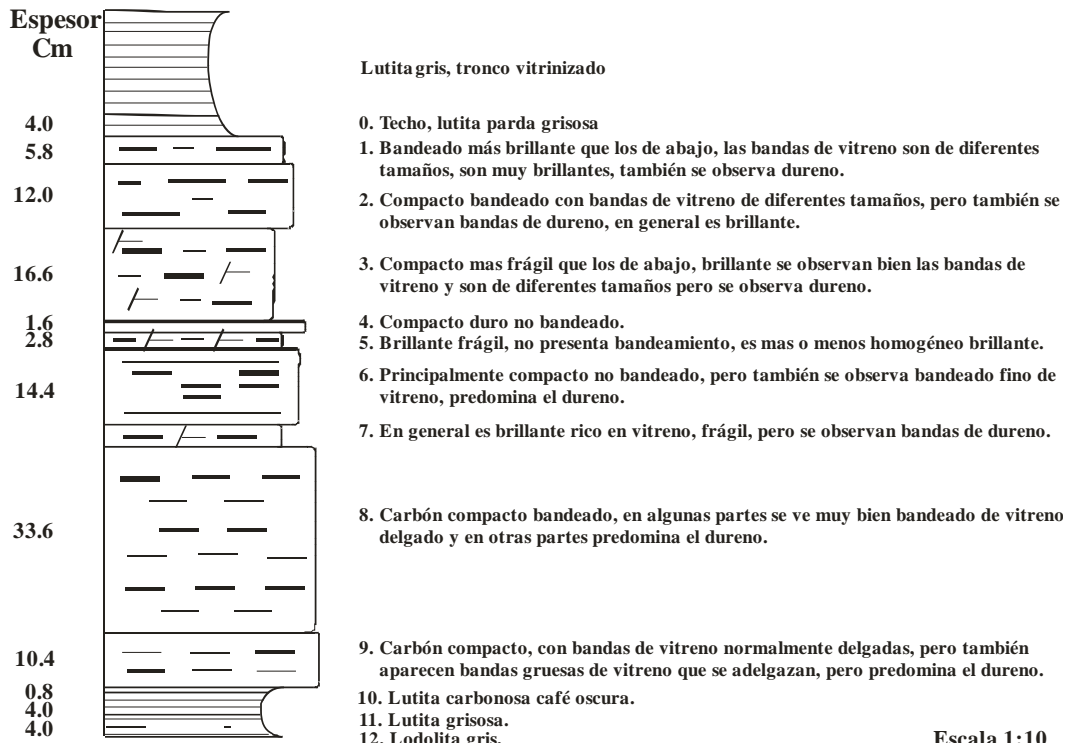


Fig. A4-3. Columna estratigráfica detallada, Manto 3 El Bloque

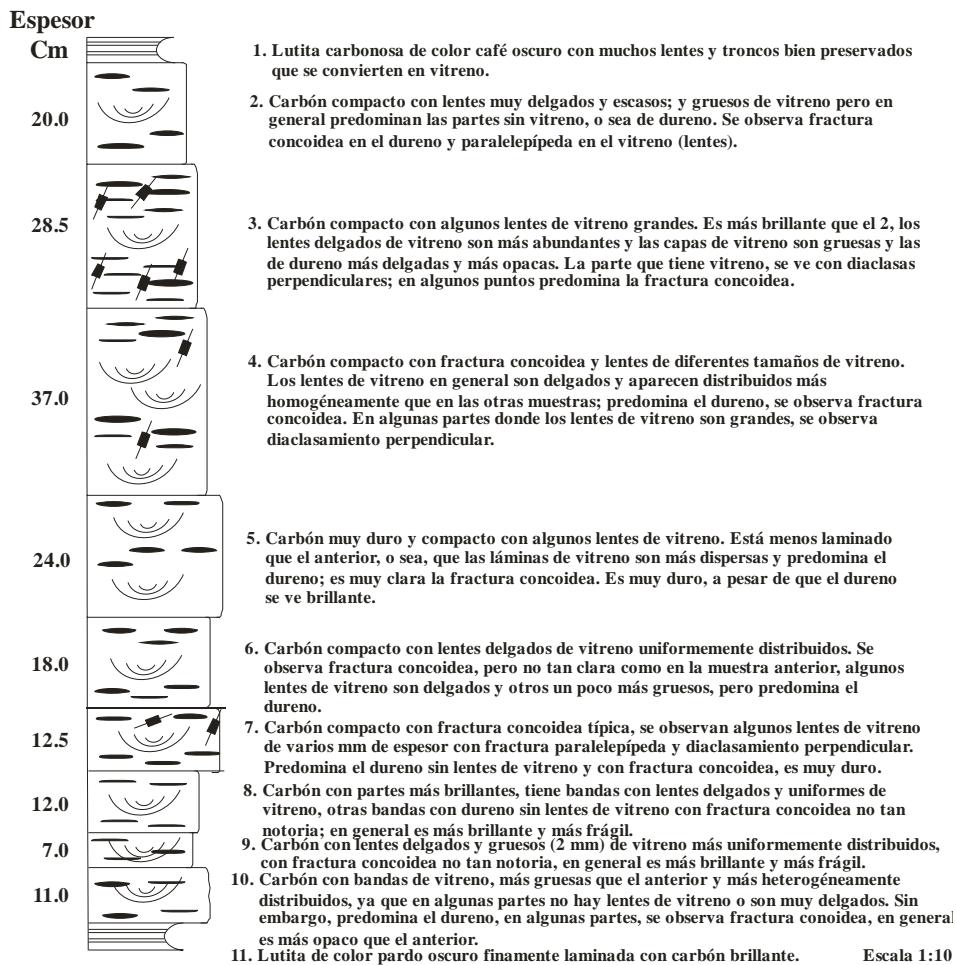


Fig. A4-4. Columna estratigráfica detallada, Manto 1 Nechi

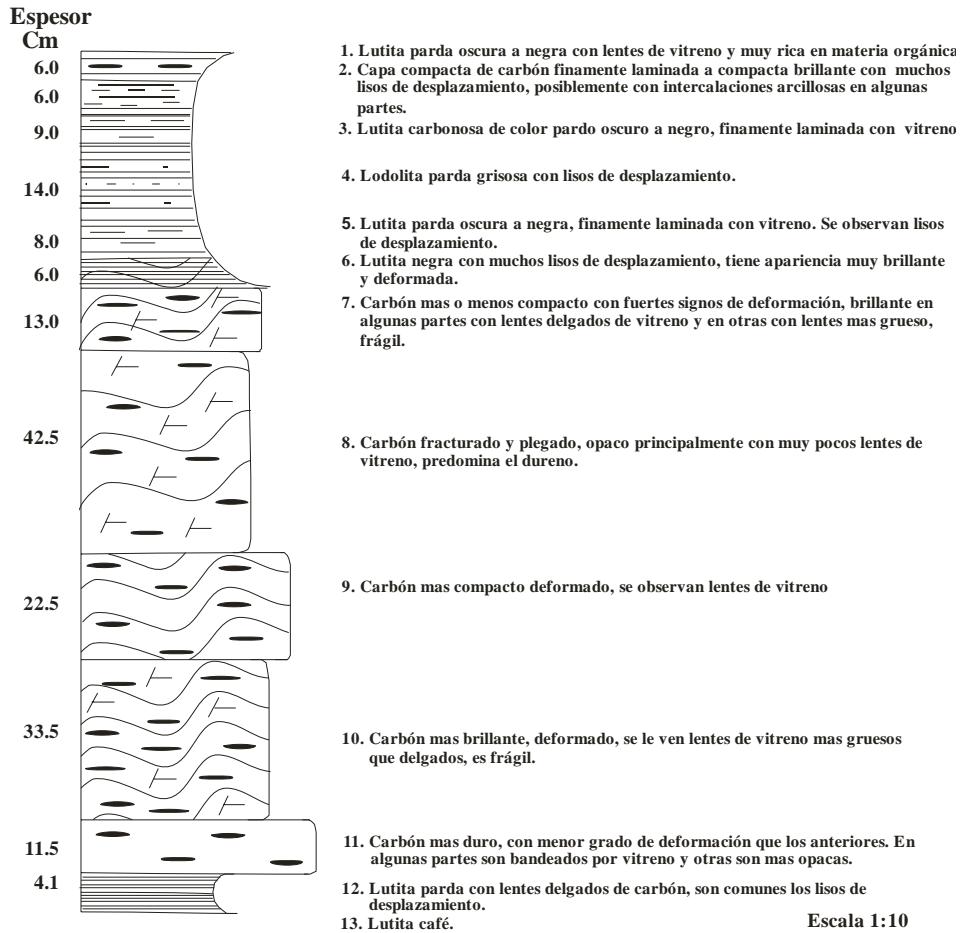


Fig. A4-5. Columna estratigráfica detallada, Manto 2 Nechi

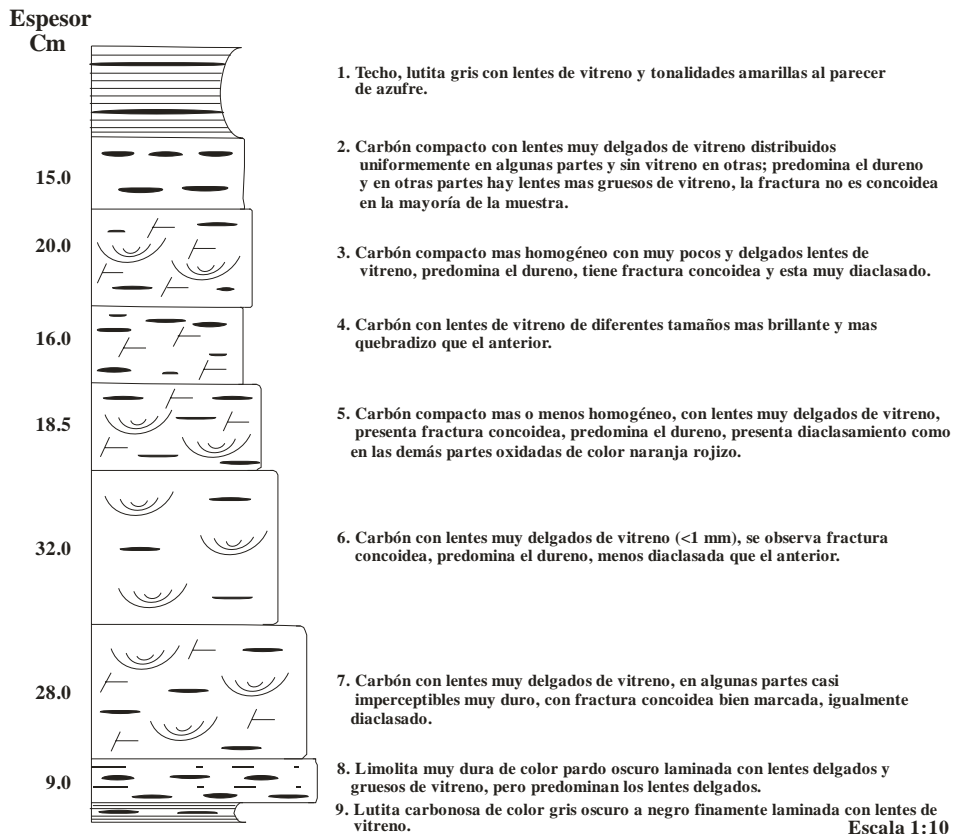


Fig. A4-6. Columna estratigráfica detallada, Manto 3 Nechi

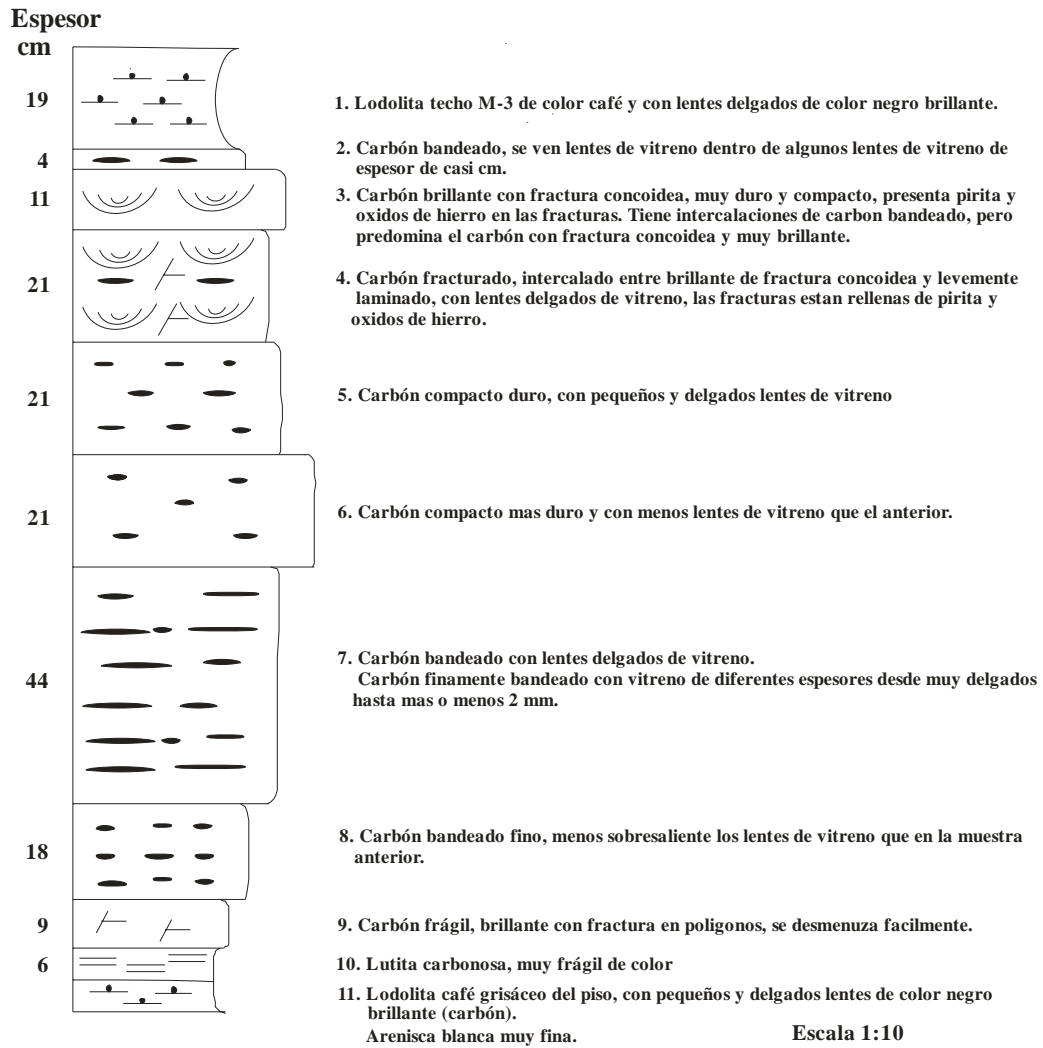
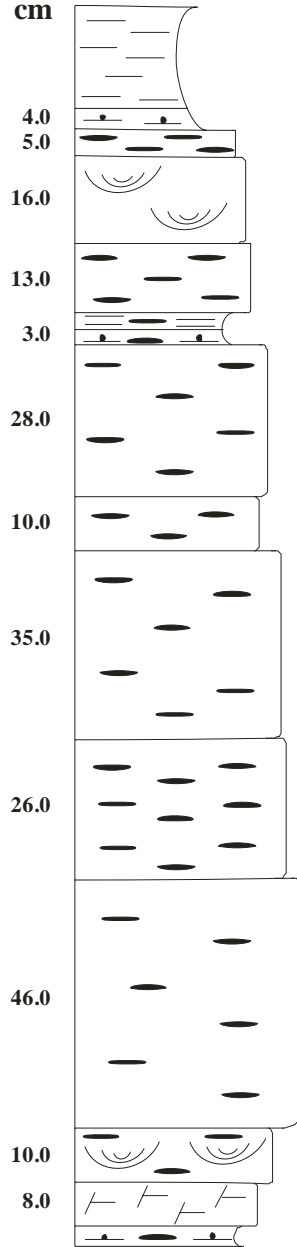


Fig. A4-7. Columna estratigráfica detallada, Manto 3 El Arenal

**Espesor
cm**



1. Lutita de color café grisoso.
2. Techo, Lodolita parda oscura a grisosa con lentes de carbón brillantes delgados.
3. Carbón opaco duro con lentes de vitreno.
4. Carbón brillante con fractura concoidea y diaclasamiento fino perpendicular a la estratificación, las superficies de fractura quedan como monedas de diferentes tamaños y con patinas de óxidos.
5. Carbón opaco duro con lentes de vitreno, no presenta diaclasamiento importante mas fresco que el anterior.
6. Intercalación de lutita carbonosa de color pardo grisosa finalmente laminada de vitreno.
7. Intercalación de lodolita de color pardo con lentes delgados de vitreno.
8. Carbón opaco compacto con lentes de vitreno de diferentes tamaños, pero predomina el dureno.
9. Carbón bandeado, los lentes de vitreno son de diferentes tamaños, pero regularmente espaciados.
10. Carbón opaco compacto con lentes de vitreno de diferentes tamaños, pero predomina el dureno.
11. Carbón opaco compacto con lentes de vitreno muy delgados.
12. Carbón opaco compacto con lentes muy delgados de vitreno predomina el dureno. Los lentes de vitreno están mas o menos regularmente espaciados.
13. Carbón bandeado brillante, con fractura concoidea, son comunes los lentes de vitreno que varían desde cm hasta mm en algunas partes se observa la estructura de huellas de monedas como la descrita en la muestra 4.
14. Carbón bandeado brillante ripiudo, con fracturas en polígonos.
15. Lodolita café grisosa de la base del manto 3 con lentes delgados de vitreno. Escala 1:10

Fig. A4-8. Columna estratigráfica detallada, Manto 3 Nechi

ANEXO A5 : Resultados de análisis próximos de carbones y lutitas carbonosas

Appendix A5. Results of proximate analysis in coals and coaly shales

Samples	Moist	Ash	VM	VM (daf)	FC	S
CB1- 1	5,3	18,6	42,3	55,58	33,8	0,5
CB1- 2	9,4	4,6	41,3	48,02	44,7	0,45
CB1- 3	10,6	8,3	35,2	43,40	45,9	0,62
LB1- 4	4,1	68,3	20,2	73,19	7,4	0,15
CB1- 5	7,8	12,5	40,8	51,19	38,9	1,02
CB1- 6	9,9	6,1	38,5	45,83	45,5	0,68
CB1- 7	9,5	4	40	46,24	46,5	0,43
CB1- 8	9,7	3,2	40,9	46,96	46,2	0,34
CB1- 9	9,3	4,4	40,4	46,81	45,9	0,29
CB1- 10	8,9	4,9	41,9	48,61	44,3	0,3
CB1- 11	10,1	3,8	39,9	46,34	46,2	0,35
LB1- 12	3,4	76,1	13	63,41	7,5	0,073
LN1 - 1	7	46,5	24	51,61	22,5	0,42
LN1 - T	10,1	26,5	31,4	49,53	32	0,4
CN1 - 2	9,3	3,7	42,1	48,39	44,9	0,41
CN1 - 3	10	5,4	40,5	47,87	44,1	0,27
CN1 - 4	9,7	4,2	40,8	47,39	45,3	0,35
CN1 - 5	9,5	3,8	40,1	46,25	46,6	0,27
CN1 - 6	9,4	3,2	41,7	47,71	45,7	0,26
CN1 - 7	9,6	3,5	42,7	49,14	44,2	0,25
CN1 - 8	9,9	4,3	40	46,62	45,8	0,28
CN1 - 9	9,8	4,7	39,8	46,55	45,7	0,23
CN1 - 10	9,2	3,9	44,8	51,55	42,1	0,33
LN1 - 11	6	44,7	25	50,71	24,3	0,17
LB 2 - T	3,2	66,1	21,9	71,34	8,8	0,52
CB2- A	8,9	8	40,2	48,38	42,9	1,75
CB2 -B	10,4	2,6	40,2	46,21	46,8	0,5
CB2 -C	11	4,9	37,3	44,35	46,8	0,47
CB2 -D	9,8	2,9	41,5	47,54	45,8	0,4
CB2 -E	10	4,3	40	46,67	45,7	0,36
CB2 -F	9,9	2,5	40,9	46,69	46,7	0,41
CB2 -G	11,2	3	36,8	42,89	49	0,54
LB2 - H	8	25,1	32,1	47,98	34,8	0,98
L N2 - 1	4,2	60,4	20,4		15	0,69
C N2 - 2	8	22,5	33	47,48	36,5	0,84
LN2 - 3	4,4	59,6	21,3	59,17	14,7	1,06
LN2 - 4	2,8	77,5	14,2	72,08	5,5	0,84
LN2 - 5	6	47,1	23,4	49,89	23,5	5,6
LN2 - 6	4,1	48,6	29,6	62,58	17,7	0,69
CN2 - 7	8,5	7,4	40,7	48,40	43,4	0,95
CN2 - 8	8,7	4,3	40,9	47,01	46,1	0,37
CN2 - 9	8,5	4,1	40,2	46,00	47,2	0,33
CN2 - 10	8,5	4,4	40,3	46,27	46,8	0,37
CN2 - 11	9	3,2	39,4	44,87	48,4	0,46
CN2 - 12	9	11,3	35,1	44,04	44,6	0,83
LN2 - 13	2,8	75,9	16	75,12	5,3	0,17
LB 3 - 0	2,3	78,4	16	82,90	3,3	0,81

CB3 - 1	9,2	6,4	41	48,58	43,4	2,35
Samples	Moist	Ash	VM	VM (daf)	FC	S
CB3 - 2	10,5	2,8	41,3	47,64	45,4	0,43
CB3 - 3	10,4	3,8	38,3	44,64	47,5	0,36
CB3 - 4	7,5	2,9	50	55,80	39,6	0,3
CB3 - 5	10,2	2,9	41,5	47,76	45,4	0,3
CB3 - 6	10,7	4,2	39,4	46,30	45,7	0,28
CB3 - 7	10,3	2,4	40,6	46,51	46,7	0,3
CB3 - 8	11	3,3	39,9	46,56	45,8	0,24
CB3 - 9	9,3	3,9	40,3	46,43	46,5	0,31
LB3 - 10	7,5	42,5	24,2	48,4	25,8	0,18
LB3 - 11	3,7	73	14,3	61,37	9	0,077
LN3 - 1	3,3	78,4	15	81,97	3,3	0,64
CN3 - 2	9,8	6,6	41,9	50,12	41,7	0,92
CN3 - 3	10,5	4,5	39,1	46	45,9	0,38
CN3 - 4	11,3	5,4	38,6	46,34	44,7	0,36
CN3 - 5	9,6	4,1	42,5	49,25	43,8	0,28
CN3 - 6	10,5	4,5	39,6	46,59	45,4	0,32
CN3 - 7	10,9	3,4	38,4	44,81	47,3	0,33
LN3 - 8	5,9	52,7	21,2	51,21	20,2	0,22
LN3 - 9	3,4	73,6	14,1	61,30	8,9	0,12
LoA3 - 1	3,9	74,9	14,6	68,87	6,6	0,19
CA3 - 2	9,1	23,1	30,6	45,13	37,2	0,73
CA3 - 3	11,4	6,7	33,2	40,54	48,7	0,61
CA3 - 4	10,7	6,1	36,7	44,11	46,5	0,56
CA3 - 5	10,4	2,9	39	44,98	47,7	0,39
CA3 - 6	9,7	3,5	39	44,93	47,8	0,35
CA3 - 7	9,9	3,2	39,4	45,34	47,5	0,42
CA3 - 8	9,3	2,9	41,2	46,92	46,6	0,49
CA3 - 9	10,2	9,9	42,3	52,94	37,6	0,55
CA3 - 10	8,8	18,4	33,2	45,60	39,6	0,8
LA3 - 11	1,8	88,4	9,2	93,88	0,6	0,57
LP3 - 1	2,5	81,8	14,2	90,45	1,5	0,52
LoP3 - 2	2,3	69,5	22,7	80,50	5,5	2,63
CP3 - 3	6,9	21,5	36,6	51,12	35	6,78
CP3 - 4	12,7	4,5	34,1	41,18	48,7	1,22
CP3 - 5	10,7	9,8	34	42,77	45,5	1,17
LP3 - 6	5,5	54,4	22,9	57,11	17,2	0,32
LP3 - 7	3,7	64,2	20,5	63,86	11,6	0,17
CP3 - 8	10,9	4,2	39,3	46,29	45,6	0,53
CP3 - 9	10,5	2,3	40,7	46,67	46,5	0,36
CP3 - 10	10,5	3,5	38,2	44,42	47,8	0,32
CP3 - 11	9,6	2,6	41	46,70	46,8	0,25
CP3 - 12	9,8	2,7	41,5	47,43	46	0,26
CP3 - 13	10,7	1,8	39,1	44,69	48,4	0,42
CP3 - 14	10,1	4,8	37,2	43,71	47,9	0,68
Lo P3 - 15	2,8	72,9	20,2	83,13	4,1	1,39

ANEXO A6 : Resultados de análisis elemental de carbones y lutitas carbonosas

Appendix A6: Results of ultimate analysis in coals and coaly shales

Samples	C	H	N	O	C(daf)	H(daf)	N(daf)	O(daf)	H/C	O/C
CN1 - 1	29,31	3,41	1,02	29,68	46,2	5,37	1,6	46,8	1,39	0,76
CN1 - 2	63,38	5,56	1,66	16,41	72,8	6,39	1,9	18,9	1,05	0,19
CN1 - 3	63,8	5,51	1,18	14,12	75,4	6,51	1,39	16,7	1,04	0,17
CN1 - 4	62,70	5,51	1,47	16,43	72,8	6,4	1,71	19,1	1,06	0,20
CN1 - 5	63,52	5,74	1,15	16,3	73,3	6,62	1,32	18,8	1,08	0,19
CN1 - 6	63,44	5,58	1,475	16,91	72,6	6,38	1,69	19,3	1,06	0,20
CN1 - 7	65,84	5,87	1,23	13,97	75,8	6,75	1,41	16,1	1,07	0,16
CN1 - 8	62,05	5,47	1,56	16,74	72,3	6,37	1,81	19,5	1,06	0,20
CN1 - 9	61,77	5,46	1,6	16,68	72,2	6,38	1,87	19,5	1,06	0,20
CN1 - 10	66,32	6,13	1,19	13,27	76,3	7,05	1,36	15,3	1,11	0,15
LN1 - 11	33,46	3,58	0,83	11,44	67,9	7,25	1,68	23,2	1,28	0,26
CB1 - 1	56,17	5,49	0,91	13,54	73,8	7,21	1,2	17,8	1,17	0,18
CB1 - 2	63,32	5,73	1,69	15,27	73,6	6,66	1,96	17,8	1,09	0,18
CB1 - 3	58,20	5,28	1,44	16,19	71,8	6,51	1,77	20	1,09	0,21
CB1 - 5	58,39	5,51	1,47	14,35	73,3	6,91	1,84	18	1,13	0,18
CB1 - 6	60,88	5,29	1,23	16,61	72,5	6,3	1,46	19,8	1,04	0,21
CB1 - 7	63,1	5,54	1,63	16,24	72,9	6,4	1,88	18,8	1,05	0,19
CB1 - 8	65,03	5,61	1,52	14,95	74,7	6,44	1,74	17,2	1,03	0,17
CB1 - 9	62,65	5,53	1,57	16,57	72,6	6,4	1,81	19,2	1,06	0,20
CB1 - 10	62,62	5,33	1,29	16,96	72,6	6,18	1,5	19,7	1,02	0,20
CB1 - 11	64,16	5,57	1,71	14,67	74,5	6,47	1,98	17	1,04	0,17
CB3 - 1	62,65	5,69	1,25	14,82	74,2	6,74	1,48	17,6	1,09	0,18
CB3 - 2	64,82	5,86	1,33	14,7	74,8	6,75	1,53	16,9	1,08	0,17
CB3 - 3	69,28	6,72	1,09	8,72	80,7	7,83	1,27	10,2	1,16	0,09
CB3 - 5	64,14	5,88	1,32	15,56	73,8	6,77	1,52	17,9	1,1	0,18
CB3 - 6	64,16	5,68	1,18	14,09	75,4	6,67	1,39	16,6	1,06	0,17
CB3 - 7	65,76	5,86	1,32	14,36	75,3	6,71	1,51	16,4	1,07	0,16
CB3 - 8	64,34	5,79	1,32	15,86	73,7	6,63	1,51	18,2	1,08	0,19
CB3 - 9	62,54	5,94	1,19	17,14	72	6,84	1,37	19,7	1,14	0,21
LB3 - 10	34,88	3,6	0,68	10,84	69,8	7,2	1,36	21,7	1,24	0,23
CA3 - 2	47,425	4,16	1,25	14,97	61,7	5,41	1,62	19,5	1,05	0,24
CA3 - 3	59,27	5,03	0,96	16,65	72,4	6,14	1,17	20,3	1,02	0,21
CA3 - 4	60,10	5,33	1,25	16,53	72,2	6,41	1,5	19,9	1,06	0,21
CA3 - 5	62,9	5,52	1,30	16,99	72,5	6,36	1,49	19,6	1,05	0,20
CA3 - 6	63,26	5,75	1,27	16,53	72,9	6,62	1,46	19	1,09	0,20
CA3 - 7	63,12	5,63	1,27	16,89	72,6	6,48	1,46	19,4	1,07	0,20
CA3 - 8	65,08	5,84	1,26	15,63	74,1	6,65	1,44	17,8	1,08	0,18
CA3 - 9	59,03	5,17	1,26	14,45	73,9	6,46	1,58	18,1	1,05	0,18
CA3 - 10	50,94	4,85	1	16,01	70	6,66	1,37	22	1,14	0,24
CN3 - 2	62,47	5,72	1,18	14,24	74,7	6,84	1,41	17	1,10	0,17
CN3 - 3	62,04	5,61	1,07	16,29	73	6,59	1,26	19,2	1,08	0,20
CN3 - 4	61,63	5,47	1,19	14,92	74	6,57	1,42	17,9	1,07	0,18
CN3 - 5	63,44	5,63	1,23	16,01	73,5	6,52	1,43	18,5	1,07	0,19
CN3 - 6	62,71	5,51	1,22	15,57	73,8	6,48	1,43	18,3	1,05	0,19
CN3 - 7	63,20	5,64	1,23	15,65	73,7	6,58	1,43	18,3	1,07	0,19
LN3 - 8	27,53	2,93	0,52	54,73	32,1	3,42	0,61	63,9	1,28	1,49
LB2 - T	17,77	2,93	0,23	9,77	57,9	9,54	0,75	31,8	1,98	0,41

CB2 - A	61,22	5,6	1,10	15,19	73,7	6,74	1,32	18,3	1,10	0,19
Samples	C	H	N	O	C(daf)	H(daf)	N(daf)	O(daf)	H/C	O/C
CB2 - B	63,52	5,57	1,52	16,4	73	6,4	1,75	18,9	1,05	0,19
CB2 - C	61,12	5,05	1,05	16,88	72,7	6	1,25	20,1	0,99	0,21
CB2 - D	63,95	5,61	1,60	16,15	73,3	6,42	1,83	18,5	1,05	0,19
CB2 - E	61,81	5,37	1,59	16,94	72,1	6,26	1,86	19,8	1,04	0,21
CB2 - F	64,45	5,87	1,34	15,94	73,6	6,7	1,53	18,2	1,09	0,19
CB2 - G	62,46	5,52	1,66	16,17	72,8	6,43	1,93	18,8	1,06	0,19
LP3 - 1	4,05	2,01	0,13	9,51	25,8	12,8	0,83	60,6	5,96	1,76
LP3 - 2	15,44	2,89	0,13	9,76	54,7	10,2	0,44	34,6	2,24	0,47
CP3 - 3	48,35	4,51	0,98	17,77	67,5	6,29	1,36	24,8	1,12	0,28
CP3 - 4	60,85	5,07	0,75	16,14	73,5	6,12	0,9	19,5	1	0,20
CP3 - 5	57,15	4,79	1,00	16,58	71,9	6,02	1,25	20,8	1,01	0,22
LP3 - 6	24,50	3,13	0,96	11,52	61,1	7,79	2,39	28,7	1,53	0,35
CP3 - 8	63,00	5,56	1,4	14,95	74,2	6,54	1,65	17,6	1,06	0,18
CP3 - 9	65,11	5,58	1,35	15,16	74,7	6,4	1,55	17,4	1,03	0,18
CP3 - 10	63,34	5,28	1,18	16,21	73,7	6,13	1,37	18,8	1,00	0,19
CP3 - 11	65,33	5,86	1,33	15,29	74,4	6,67	1,51	17,4	1,08	0,18
CP3 - 12	65,31	5,48	1,21	15,5	74,6	6,26	1,38	17,7	1,01	0,18
CP3 - 13	65,57	5,55	1,24	15,14	74,9	6,34	1,42	17,3	1,02	0,17
CP3 - 14	61,99	5,45	1,16	16,51	72,8	6,4	1,36	19,4	1,06	0,2
LP3 - 15	17,78	2,47	0,18	4,28	72	9,98	0,73	17,3	1,66	0,18
CN2 - 2	47,51	4,68	0,79	16,53	68,4	6,73	1,13	23,8	1,18	0,26
LN2 - 3	20,83	2,7	0,81	11,66	57,9	7,5	2,25	32,4	1,56	0,42
LN2 - 5	24,06	2,61	0,81	19,43	51,3	5,57	1,72	41,4	1,30	0,61
LN2 - 6	31,95	3,63	0,87	10,85	67,5	7,67	1,84	22,9	1,36	0,26
CN2 - 7	62,68	5,72	1,07	14,64	74,5	6,8	1,27	17,4	1,09	0,18
CN2 - 8	64,41	5,42	1,63	15,55	74	6,22	1,87	17,9	1,10	0,18
CN2 - 9	64,69	5,21	1,44	16,07	74	5,96	1,64	18,4	0,97	0,19
CN2 - 10	64,81	5,56	1,39	15,35	74,4	6,38	1,6	17,6	1,03	0,18
CN2 - 11	64,79	5,28	1,47	16,27	73,8	6,01	1,67	18,5	0,98	0,19
CN2 - 12	56,91	5,12	1,05	16,64	71,4	6,42	1,31	20,9	1,08	0,22

ANEXO A7: Resultados de análisis de pirolisis rock-eval de carbones y lutitas carbonosas

Appendix A7: Results of Rock-Eval pyrolysis analysis in coals and coaly shales

Depth	Samples	PC [%]	RC [%]	TOC [%]	MINC [%]	HI [mg HC/g TOC]	OI [mg CO2/g TOC]	Tmax [°C]	S1 [mg HC/g]	S2 [mg HC/g]	S3
18	LB1 T	1.55	2.30	3.85	0.33	475	25	424	0.14	18.27	0.97
36	CB1-1	20.16	35.72	55.88	0.75	423	20	424	2.73	236.53	10.94
43	CB1-2	12.96	55.53	68.49	0.99	219	21	406	1.54	149.86	14.62
46	CB1-3	7.87	52.43	60.30	0.96	146	30	417	0.53	88.32	18.18
50	LB1-4	4.36	10.95	15.31	0.75	334	24	426	0.20	51.17	3.72
68	CB1-5	14.57	42.30	56.86	0.77	298	23	415	2.01	169.20	13.04
76	CB1-6	9.63	54.09	63.73	1.50	171	28	406	0.95	109.26	17.80
90	CB1-7	10.95	55.96	66.91	1.17	189	22	406	0.93	126.22	14.66
108	CB1-8	12.06	57.65	69.71	0.99	200	21	405	1.09	139.38	14.60
124	CB1-9	12.05	54.45	66.50	1.40	209	25	408	1.05	138.68	16.56
137	CB1-10	13.98	55.48	69.46	1.38	233	22	414	1.85	161.51	15.40
	CB1-11	12.81	50.04	62.85	0.92	235	26	417	1.20	147.82	16.23
	LB1-12	1.67	8.49	10.16	0.33	219	38	425	0.11	22.30	3.83
	CB1-Tot	11.60	53.23	64.83	1.31	204	29	406	1.18	132.47	18.52
	NI- Cinta C	5.39	29.36	34.75	0.78	169	52	431	0.2	58.8	18.1
	LN1- T	1.70	5.96	7.67	0.59	248	58	425	0.05	19.00	4.48
	LN1-1	4.63	23.27	27.90	0.54	192	22	411	0.26	53.53	6.07
20	CN1-2	14.56	52.04	66.60	0.96	255	21	413	1.19	169.55	14.30
49	CN1-3	11.34	54.49	65.84	1.53	199	23	405	0.74	130.99	15.10
86	CN1-4	12.93	54.22	67.15	1.48	228	11	403	0.5	152.9	7.4
110	CN1-5	11.79	55.13	66.92	1.30	202	27	406	0.90	135.16	18.14
128	CN1-6	14.14	54.74	68.88	1.12	238	21	405	1.67	164.06	14.23
140	CN1-7	15.57	55.04	70.61	1.17	257	21	409	1.57	181.17	14.69
152	CN1-8	12.51	55.42	67.93	1.38	216	14	406	0.7	146.7	9.8
159	CN1-9	12.74	46.51	59.25	1.28	252	17	411	0.9	149.4	9.8
170	CN1-10	19.12	48.31	67.43	0.98	331	19	413	2.7	223.4	12.9
	CN1-11	15.88	31.85	47.73	0.56	386	29	423	2.76	184.02	13.83
	CN1-Tot	11.28	53.83	65.12	1.23	196	31	410	1.30	127.93	20.42
	LN1- M2,07Ash	1.45	11.33	12.78	0.50	111	75	422	0.1	14.2	9.6
4											
18.8	CB2-A	12.65	48.25	60.90	1.15	240	25	417	1.23	146.27	15.04
24.6	CB2-B	10.45	57.68	68.13	1.05	177	23	415	0.45	120.39	15.43
30.4	CB2-C	6.53	56.60	63.13	1.52	115	27	416	0.31	72.82	16.92
45.6	CB2-D	12.49	56.96	69.45	1.05	209	20	414	0.85	145.03	13.92
60.8	CB2-E	11.15	52.76	63.91	1.16	201	22	409	1.08	128.67	13.81
82	CB2-F	12.03	53.79	65.82	0.85	213	20	413	0.85	139.88	12.95
105	CB2-G	8.21	56.63	64.84	0.90	144	24	419	0.35	93.45	15.71
110	CB2-H	8.12	33.79	41.91	0.77	220	35	417	0.66	92.33	14.71
	CB2-Tot	9.40	43.08	52.48	1.29	200	40	416	1.47	104.94	20.87
	LN2-Tesup	1.72	19.88	21.60	0.94	71	68	416	0.5	15.4	14.6
	LN2- Tinf	2.86	5.13	8.00	0.20	416	39	428	0.20	33.27	3.12
6	LN2-1	3.31	16.41	19.72	0.80	193	26	420	0.0	38.1	5.2

Depth	Samples	PC [%]	RC [%]	TOC [%]	MINC [%]	HI [mg HC/g TOC]	OI [mg CO2/g TOC]	Tmax [°C]	S1 [mg HC/g]	S2 [mg HC/g]	S3
12											
21											
35	LN2-4	1.09	6.20	7.30	0.85	168	39	424	0.0	12.3	2.8
43	LN2-5	3.56	21.46	25.02	0.73	165	19	407	0.1	41.2	4.8
49	LN2-6	13.30	19.67	32.96	0.61	477	15	421	1.3	157.3	5.0
62	CN2-7	14.25	43.37	57.62	1.15	289	21	415	1.3	166.4	12.0
105	CN2-8	13.48	52.56	66.04	1.37	239	17	406	1.1	157.6	11.3
127	CN2-9	11.28	56.12	67.40	1.27	194	17	408	1.09	130.91	11.70
161	CN2-10	12.11	55.71	67.82	1.42	207	20	409	0.89	140.45	13.85
172	CN2-11	11.17	54.99	66.16	1.11	198	14	412	0.4	131.0	9.6
176	CN2-12	9.02	44.73	53.75	1.03	196	17	410	0.5	105.2	9.3
	LN2-13	2.11	7.30	9.41	0.39	262	24	429	0.0	24.7	2.2
	CN2-Tot	9.93	51.35	61.28	1.07	182	34	414	0.99	111.70	21.07
6											
10	LEB3-0	2.85	4.28	7.13	0.22	467	30	426	0.29	33.31	2.17
16	CB3-1	12.61	50.04	62.64	0.92	234	20	413	1.16	146.50	12.81
28	CB3-2	12.36	55.12	67.48	0.95	213	19	410	1.23	143.42	13.09
44	CB3-3	10.04	56.63	66.68	1.36	171	28	420	0.84	114.14	18.34
46	CB3-4	24.62	49.09	73.71	1.04	392	17	421	3.73	288.85	12.31
49	CB3-5	14.49	56.76	71.25	1.16	236	21	424	1.67	167.87	15.19
63											
67	CB3-7	13.73	56.92	70.66	1.22	225	20	411	1.62	159.17	14.29
101											
111	CB3-9	12.14	49.87	62.01	1.04	224	29	406	1.23	139.17	17.88
112	LB3-10	5.60	27.39	32.99	0.52	195	28	424	0.14	64.25	9.23
116	LB3-11	2.20	10.49	12.69	0.32	201	25	431	0.01	25.47	3.13
	CB3-Tot	10.87	52.97	63.84	1.10	192	33	409	1.49	122.46	21.28
	LN3-T	1.56	4.70	6.25	0.18	278	50	422	0.31	17.41	3.12
15	CN3-2	13.46	50.05	63.51	1.10	243	31	407	1.4	154.4	19.4
35	CN3-3	9.80	56.27	66.07	1.32	168	27	411	0.91	111.21	17.94
51	CN3-5	13.30	64.10	77.40	2.03	199	22	418	0.9	153.7	16.9
70	CN3-6	11.89	59.45	71.34	1.22	191	25	413	0.8	136.6	18.1
102	CN3-7	10.74	59.07	69.82	1.20	175	29	414	0.7	122.0	20.4
130	LN3-8	5.15	23.09	28.24	0.49	214	16	427	0.2	60.4	4.5
139	LN3-9	1.96	11.55	13.51	0.51	167	24	434	0.0	22.5	3.2
19	LA3-1	1.57	7.48	9.05	0.30	197	39	426	0.04	17.81	3.50
23	LA3-2	5.75	41.33	47.08	0.87	135	36	420	0.13	63.59	16.88
34	CA3-3	5.21	55.43	60.63	0.96	92	34	419	0.13	55.87	20.49
65	CA3-4	9.70	52.25	61.96	0.90	180	23	413	0.56	111.59	14.51
86	CA3-5	11.53	57.85	69.38	0.91	192	22	411	1.08	132.88	15.19
107	CA3-6	10.18	58.35	68.53	1.14	171	22	409	0.69	117.01	14.93
151	CA3-7	11.58	58.61	70.19	0.91	191	20	407	1.11	133.81	14.16
169	CA3-8	13.50	53.97	67.47	0.79	233	18	402	1.45	157.12	12.42
178	CA3-9	9.70	46.97	56.67	0.71	198	21	418	0.53	112.36	12.12
184	CA3-10	8.38	40.54	48.92	0.74	194	33	417	0.69	95.08	15.95
	LA3-11	0.36	7.51	7.87	0.29	51	44	433	0.02	3.98	3.44

Depth	Samples	PC [%]	RC [%]	TOC [%]	MINC [%]	HI [mg HC/g TOC]	OI [mg CO2/g TOC]	Tmax [°C]	S1 [mg HC/g]	S2 [mg HC/g]	S3
	CA3-Tot	11.05	53.03	64.08	1.01	196	30	414	1.12	125.71	19.05
	LEP3-1	1.64	2.28	3.92	0.19	490	28	431	0.17	19.19	1.09
4	LEP3-2	8.60	5.82	14.43	0.22	707	11	428	1.12	102.02	1.57
9	CP3-3	10.11	34.44	44.55	0.79	263	24	418	1.21	117.16	10.63
25	CP3-4	3.70	57.79	61.50	1.05	64	25	418	0.11	39.53	15.12
38	CP3-5	6.68	49.59	56.28	0.88	135	24	424	0.31	75.86	13.29
44	LP3-6	4.51	21.57	26.08	0.66	201	20	421	0.15	52.42	5.28
47	LP3-7	4.42	15.20	19.62	0.61	265	17	421	0.18	51.96	3.42
75	CP3-8	10.52	57.37	67.89	1.05	178	23	416	0.90	120.78	15.54
85	CP3-9	11.76	62.64	74.40	1.12	183	19	410	1.11	135.97	13.86
120	CP3-10	8.67	67.18	75.85	1.25	130	19	411	0.70	98.98	14.50
146	CP3-11	11.56	64.80	76.36	1.17	175	18	411	1.38	133.37	13.86
172	CP3-12	11.99	58.96	70.95	1.03	195	21	405	1.36	138.20	14.81
218	CP3-13	10.78	59.68	70.46	0.84	177	18	405	0.79	124.86	12.75
228	CP3-14	9.96	51.75	61.71	0.68	186	21	417	0.93	114.78	12.89
236	CP3-15	4.65	7.37	12.02	0.53	459	18	426	0.22	55.09	2.11
	CP3-Tot	10.48	54.63	65.11	1.18	183	31	415	0.85	118.85	19.88

ANEXO A8: Resultados del conteo en petrografía de carbones y lutitas de la Fm Amagá

Appendix A8: Petrography data of coals and shales from Amagá Formation

Macerals	Vitrinite					Liptinite										Inertinite					
	Te	Ct	Vd	Cd	Cg	Sp	Cu	Alg	Lip	Bi	Ex	Re	Ro	MO+ MM	Mi	Ma	Sm	Fu	Fg	Sc	In
CB1-1	3,4	5,4	4,3	17,0	6,5	7,8	4,3	0,6	13,6	19,4	0,2	6,9	0,0	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	5,4	0,0	2,8
CB1-2	1,8	41,9	2,1	19,6	4,9	8,5	9,3	0,5	6,2	0,5	0,0	1,6	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	1,3
CB1-3	5,2	46,2	0,0	19,4	7,2	5,5	9,7	0,0	3,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	2,2
LB1-4	2,2	21,2	2,2	13,2	5,1	13,2	23,8	0,0	4,8	4,0	0,0	0,0	0,0	9,2	0,0	0,0	0,4	0,0	0,7	0,0	0,0
CB1-5	1,9	31,3	0,0	9,3	9,5	12,1	10,8	0,8	13,3	4,9	1,7	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,6
CB1-6	1,1	54,4	0,8	20,8	1,1	5,8	3,4	0,8	5,3	2,1	0,3	1,3	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	1,3
CB1-7	0,0	38,4	0,3	26,7	5,5	5,1	9,6	0,0	8,6	0,0	0,3	2,1	0,7	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	1,0	0,0	1,0
CB1-8	6,6	32,2	0,0	30,8	7,4	6,3	4,0	0,0	9,1	0,0	0,3	1,1	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,3	
CB1-9	0,4	52,0	0,0	25,8	1,1	8,6	3,6	0,0	4,7	0,0	0,4	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	1,8	
CB1-10	2,4	39,2	3,6	24,0	1,8	6,4	4,6	0,0	8,5	3,3	0,3	3,3	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	0,3	0,0	0,6	
CB1-11	1,4	41,4	0,6	17,2	1,7	7,3	16,1	0,0	7,3	0,3	2,0	1,1	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	1,1	
CB2-A	0,0	56,2	0,0	22,4	1,0	2,8	5,9	0,0	3,5	0,0	0,0	2,0	4,1	0,0	0,0	0,0	0,4	1,8	0,0	0	
CB2-B	0,0	44,1	0,0	39,0	1,2	1,4	3,3	0,0	4,1	0,0	0,0	0,4	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0	
CB2-C	0,0	66,4	0,0	26,9	0,4	1,1	0,6	0,0	1,5	0,0	0,0	0,4	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	
CB2-D	0,0	30,3	1,8	48,1	1,1	3,7	2,0	0,0	2,9	0,0	0,0	3,3	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0	0	
CB2-E	0,0	32,7	1,8	50,6	0,7	2,9	2,2	0,0	1,8	0,0	0,0	1,6	3,8	0,4	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	
CB2-F	0,0	28,3	1,3	49,5	0,0	4,6	4,4	0,0	3,7	0,0	0,0	2,6	4,6	0,0	0,0	0,0	0,2	0,9	0,0	0,0	
CB2-G	2,5	53,5	0,0	15,8	5,5	5,0	7,5	0,3	7,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	1,7	
LB2-H	0,0	33,4	1,5	34,9	7,8	1,3	4,8	0,0	2,5	1,5	0,3	1,8	0,0	8,6	0,0	0,0	0,5	1,0	0,0	0,0	
CB3-1	0,6	43,0	0,0	24,0	8,1	5,2	2,9	1,5	9,0	0,0	0,2	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	2,3	0,4	0,0	1,7	
CB3-2	0,0	41,0	0,2	26,6	6,7	5,7	3,8	0,8	10,9	0,0	0,6	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,4	1,1	0,0	0,6	
CB3-3	0,4	41,2	0,0	21,7	17,4	3,6	2,6	0,2	8,7	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	1,2	0,0	0,0	2,0	0,0	0,8	
CB3-4	0,0	8,0	1,6	16,0	10,5	10,9	2,5	1,4	17,2	23,8	0,2	1,0	0,0	0,0	0,2	0,0	2,9	1,4	0,0	2,3	
CB3-5	0,0	29,1	0,0	30,9	5,8	4,1	5,8	1,2	14,2	3,1	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	3,3	0,0	1,2	
CB3-6	0,0	37,8	0,0	25,9	9,8	6,6	3,8	0,9	9,6	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0	0,6	1,7	0,0	1,1	
CB3-7	0,0	54,1	0,0	19,1	4,0	3,8	6,2	0,0	8,9	0,0	0,0	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,4	2,2	0,0	0,7	
CB3-8	0,6	59,6	0,0	8,5	7,9	3,6	6,1	0,4	5,7	0,2	0,0	0,0	6,1	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6	0,0	0,2	
Macerals	Vitrinite					Liptinite										Inertinite					
Te	Ct	Vd	Cd	Cg	Sp	Cu	Alg	Lip	Bi	Ex	Re	Ro	MO+ MM	Mi	Ma	Sm	Fu	Fg	Sc	In	

Macerals	Vitrinite										Lipinite										Inertinite																				
	Te	Ct	Vd	Cd	Cg	Sp	Cu	Alg	Lip	Bi	Ex	Re	Ro	MO+ MM	Mi	Ma	Sm	Fu	Fg	Sc	In	Te	Ct	Vd	Cd	Cg	Sp	Cu	Alg	Lip	Bi	Ex	Re	Ro	MO+ MM	Mi	Ma	Sm	Fu	Fg	Sc
CB3-9	2.5	49.2	0.0	11.2	10.6	3.3	9.1	0.8	7.9	0.0	0.0	0.2	3.3	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	1.0	0.0	0.4																				
LB3-10	0.0	51.3	0.7	2.0	10.5	2.0	17.8	0.0	5.3	1.3	0.0	0.0	0.0	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0																				
CEN1-2	3.0	32.6	0.0	34.5	3.3	10.5	2.8	0.0	6.9	0.0	1.9	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8	0.0	0.0	1.1																				
CNI-3	9.2	39.5	0.0	23.5	2.2	8.4	4.8	0.0	6.7	0.0	0.3	1.4	0.8	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	1.4	0.0	0.6																				
CNI-4	4.4	41.8	0.0	23.3	2.2	7.2	8.2	0.0	7.5	0.0	0.0	2.5	0.6	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3	0.0	0.6																				
CNI-5	4.6	27.1	0.0	39.3	1.4	12.2	1.6	0.0	9.8	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.5	0.0	0.8																				
CNI-6	1.1	30.1	0.0	27.1	0.8	16.2	4.9	0.8	10.2	0.0	1.5	0.8	1.5	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.8	0.0	1.5																				
CNI-7	0.0	32.2	0.0	23.9	2.7	7.7	6.8	0.0	8.6	0.0	11.8	0.6	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	1.8																				
CNI-8	0.9	44.0	0.0	30.1	0.6	7.0	5.1	0.0	4.1	0.0	2.5	1.6	1.6	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.9	0.0	0.0																				
CNI-9	1.8	42.1	0.0	17.7	4.0	11.3	12.5	0.0	7.3	0.0	0.0	0.3	1.2	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0																				
LN1-10	0.0	35.7	0.0	10.2	1.4	13.3	8.5	0.0	9.5	0.0	10.9	1.4	6.5	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.7	0.0	1.4																				
CN2-2	0.2	62.7	0.0	13.5	1.7	6.4	11.2	0.0	1.7	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0																				
LN2-3	2.4	39.9	0.0	24.8	8.6	5.0	2.2	0.8	12.6	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.8	0.0																				
LN2-5	0.6	61.3	2.6	2.6	1.3	0.6	16.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																				
LN2-6	0.0	18.6	6.9	7.8	2.0	11.8	2.9	1.0	7.8	15.7	0.0	0.0	0.0	23.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0																				
CN2-7	0.0	37.1	0.4	27.0	8.9	6.5	2.8	1.2	9.7	4.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.2	0.0	0.8	0.6	0.0																				
CN2-8	0.0	26.8	0.0	37.5	5.5	7.5	3.2	0.6	12.2	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.4	0.0																				
CN2-9	0.5	32.4	0.0	43.2	4.1	4.6	0.2	0.7	11.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0																				
CN2-10	0.8	50.8	0.0	14.5	12.3	4.8	5.2	0.6	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.2	0.0																				
CN2-11	0.2	55.2	0.0	9.8	15.9	3.7	5.9	0.0	7.6	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.7	0.0																				
CN2-12	0.0	50.9	0.8	10.9	17.5	2.5	10.1	0.0	5.5	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.2	0.2	0.0																				
LN2-13	0.8	47.1	2.5	1.7	0.8	1.7	8.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	35.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0																				
CN3-2	0.4	37.5	0.4	28.6	9.5	7.5	2.1	1.2	9.5	0.6	0.2	0.2	1.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.6	0.0	0.4																				
CN3-3	2.0	38.4	0.0	34.2	9.6	2.3	2.7	1.2	6.7	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	1.2	0.0																				
CN3-5	0.6	38.2	0.0	29.7	3.4	7.8	3.0	0.6	10.1	2.5	0.0	0.6	1.3	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	1.1	0.0	0.4																				
CN3-6	0.0	38.9	0.0	29.5	7.3	6.7	3.7	1.2	7.3	0.0	0.2	0.0	2.4	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	1.2	0.0	1.2																				
CN3-7	0.6	53.0	0.0	22.1	6.6	6.0	3.0	0.0	5.2	0.0	0.0	0.8	2.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.4	0.0	0.2																				
LP-2	0.0	2.7	2.7	1.9	1.2	6.6	5.0	0.0	0.0	0.4	41.0	0.0	2.0	34.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0																				
CP-3	21.1	9.1	5.3	27.9	5.6	8.4	3.8	0.0	0.0	3.0	10.2	0.5	0.3	1.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	3.0	0.5																				
CP-4	69.8	16.5	0.0	4.0	8.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																				
CP-5	31.0	21.9	1.0	24.6	5.0	4.9	3.4	0.0	0.0	5.2	0.0	0.5	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5																				

Vitrimitic Components														Liptinitic Components														Inertomic C			
Components	I rs	I lb	Vt ti	Tiwp	I trti	Aom	Cic	Spi	Pc d	M tc	Ps f	Rtc i	S vg	P tc	Eq	Z pstc	Others	Re cu	Th cu	Re	Alg	Ro	Rs l	Fsp	Fh	Dp					
CB1-1	19,0	10,9	1,4	3,0	0,0	48,7	6,3	2,9	0,7	0,0	0,9	0,8	0,5	1,6	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,2	0,0	0,0					
CB1-2	13,7	27,6	20,1	4,0	3,0	9,1	0,0	0,0	6,3	0,3	1,0	1,3	0,0	3,3	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	8,4	0,0	0,0	0,0	0,0					
CB1-3	0,0	20,5	28,4	24,9	0,6	0,0	0,0	0,0	3,8	0,3	1,5	0,9	0,2	1,5	0,0	0,0	0,0	2,0	2,0	1,4	0,0	2,0	0,0	1,1	0,0	1,0					
LB1-4	36,4	0,0	3,0	25,2	11,0	0,0	0,0	0,0	3,6	0,0	4,7	2,5	0,8	2,7	0,4	0,7	0,0	7,7	0,1	0,5	0,0	0,4	0,0	0,2	0,0	0,0					
CB1-5	19,6	1,2	12,1	20,2	6,6	18,5	0,9	3,2	5,6	0,0	1,9	1,4	1,2	1,6	0,0	0,4	0,6	1,2	0,5	0,8	0,0	2,6	0,0	0,1	0,0	0,0					
CB1-6	5,9	40,4	12,7	0,8	7,5	0,0	0,2	1,4	2,5	0,0	1,6	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	2,9	0,4	14,2	0,0	4,5	1,0	0,0					
CB1-7	0,4	20,8	18,9	30,3	0,0	7,0	0,0	0,0	1,0	0,0	1,3	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,3	0,0	0,0	1,6	0,0	5,4	0,9	0,0					
CB1-8	0,0	36,5	19,3	14,1	1,0	0,0	0,0	0,8	1,8	1,0	0,0	0,0	0,3	0,8	0,0	0,0	0,0	1,0	1,3	1,8	0,0	13,0	0,0	3,1	1,4	2,6					
CB1-9	2,4	37,0	21,7	8,0	3,1	0,0	0,0	0,0	4,0	0,0	0,5	0,0	0,0	1,7	0,0	0,9	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	17,1	0,0	2,1	0,0	1,0					
CB1-10	9,4	9,6	25,0	20,9	4,6	5,6	2,6	1,9	5,1	0,9	1,4	2,2	0,0	4,6	0,0	0,5	0,0	0,0	3,4	0,0	0,0	2,2	0,0	0,2	0,0	0,0					
CB1-11	1,5	0,9	55,0	11,4	0,5	4,3	0,5	0,3	0,2	0,7	0,7	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	23,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3					
CB2-A	77,2	0,2	3	0,9	0,0	3,3		0,4		0,2	1,1	0,4	0,4	0,7	0,6	0,0	0,0	0,2	1,6	1,8	1,6	5,3	0,0	0,9	0,2	0,0					
CB2-B	67,8	0,0	15,8	2,8	0,0	0,5	0,3	1	0,5	0,9	0,2	0,0	0,2	0,0		0,0	0,0	1,2	0,4	0,8	1,3	3,5	0,0	1,4	1,3	0,0					
CB2-C	69,7	0,0	14,9	0,0	0,0	0,8	0,0	1	0,0	0,6	1,2	0,0	0,8	0,0	0,3	0,0	0,0	0,6	1	2,1	0,6	3,7	0,0	2,1	0,6	0,0					
CB2-D	40,1	0,5	21,4	2,5	0,0	2,1	0,0	0,0	0,5	2,4	1	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	6	1,1	6,6	10,5	0,0	4,3	0,5	0,0					
CB2-E	45,7	0,0	27,2	1,6	0,0	1,8	0,0	0,4	0,4	1,3	0,6	0,0	0,5	0,0		0,0	0,0	0,0	5,6	1,3	1	7,1	0,0	5,5	0,0	0,0					
CB2-F	50,4	1	24,1	1,8	0,0	3	0,0	0,0	0,1	0,9	0,4	0,2	0,0	0,2	0,4	0,0	0,0	0,0	1,8	2	0,5	8,3	0,0	2,8	1,1	0,0					
CB2-G	50,1	0,0	33,1	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,5	0,9	0,0	0,0	0,5		0,0	0,0	0,1	1,8	0,6	0,4	3,3	0,0	5,9	0,4	0,0					
CB3-1	11,5	6,8	26,0	6,2	4,5	0,0	0,3	0,5	3,0	0,7	7,6	0,4	2,3	1,7	0,7	1,0	0,0	0,8	7,2	2,8	0,0	13,1	0,0	2,4	0,0	0,7					
CB3-2	6,3	21,8	31,5	2,1	1,8	0,0	0,7	1,1	2,8	0,0	3,0	2,3	0,2	0,6	0,2	0,4	0,0	0,9	6,8	6,8	0,6	2,7	0,0	4,3	1,1	2,0					
CB3-3	4,0	44,7	11,7	16,5	0,3	0,0	0,3	1,2	2,5	0,2	0,8	0,0	0,3	2,2	0,2	0,0	0,0	0,0	4,7	2,4	0,0	4,6	0,0	1,8	0,2	1,2					
CB3-4	3,4	12,7	6,5	0,0	3,8	36,2	8,4	9,2	2,2	1,3	1,0	1,7	0,3	0,8	0,3	1,8	2,3	0,0	2,7	3,2	0,7	1,3	0,0	0,0	0,0	0,3					
CB3-5	1,9	34,1	30,8	1,1	0,0	5,8	0,9	1,1	2,7	0,4	0,0	0,2	6,1	0,6	0,3	0,0	0,8	0,0	6,9	1,4	0,0	2,4	0,0	1,5	0,0	1,0					
CB3-6	6,6	34,0	12,1	1,9	2,4	6,2	0,3	0,5	2,1	0,9	0,0	0,8	3,9	0,7	0,0	0,3	0,0	5,0	6,4	1,4	3,0	7,7	0,0	2,9	0,0	0,9					
CB3-7	1,1	43,1	14,7	8,2	2,8	0,0	0,0	0,0	2,0	0,6	0,5	0,3	5,1	0,9	0,2	0,3	0,9	4,2	4,2	3,9	1,1	3,2	0,0	2,1	0,0	0,7					
CB3-8	0,7	1,7	26,2	27,4	1,7	0,0	0,7	0,0	0,0	0,3	0,0	0,3	0,0	0,7	0,5	0,7	0,3	0,0	5,4	1,3	0,0	31,2	0,0	0,9	0,0	0,3					
CB3-9	5,1	12,5	20,5	21,7	2,5	0,0	0,0	0,0	1,1	0,4	0,4	0,0	0,8	0,9	0,0	0,1	0,0	9,5	0,0	0,0	18,3	36,7	0,0	0,3	0,0	0,9					
CN2-2	8,3	1,0	8,1	29,9	0,0	2,0	0,0	0,0	0,7	0,0	2,3	1,0	0,9	0,0	1,0	0,0	0,1	0,0	3,3	0,3	37,1	0,0	0,0	2,4	1,1	0,6					
LN2-3	0,0	1,6	21,9	0,4	58,2	1,3	0,0	0,6	0,0	0,6	1,3	0,0	3,9	0,0	5,0	0,0	0,2	0,0	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	1,3					
Vitrimitic Components														Liptinitic Components														Inertomic C			
Components	I rs	I lb	Vt ti	Tiwp	I trti	Aom	Cic	Spi	Pc d	M tc	Ps f	Rtc i	S vg	P tc	Eq	Z pstc	Others	Re cu	Th cu	Re	Alg	Ro	Rs l	Fsp	Fh	Dp					
LN2-4	0,0	4,1	25,7	29,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,5	11,1	0,0	4,4	9,2	1,2	0,0	3,7	1,2	4,6	0,5	3,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0					

Keys

Irregular with rigid surface and yellow light color.	I rs	<i>Ciclusphaera</i>	Cic	<i>Retritricolporate irregularis</i>	Rtc i	Others pollen grains	Others	Rosarios (Resins – algae?)	Ro
Irregular light brown color formed by other different sized and shaped particles	I lb	<i>Spirosyncolpites spiralis</i>	Spi	Spore Verrugate	S vg	Thick reddish yellow cuticles	Re cu	Particles of rigid surface and light color	Rs l
very thin Light yellow Tissue	Vt ti	Policolpate deformed	Pc d	Psilate tricolporate	P tc	Thin Cuticles	Th cu	Fungi Spores	Fsp
Tissues very well preserved (preserved very little)	Ti wp	Microreticulate tricolporate	M tc	Equinate	Eq	Resins	Re	Fungi hyphae	Fh
Irregular transparent tissues	I trti	Folded Psilate	Ps f	Zoned Psilatricolporate	Z pstc	Algae	Alg	different shapes of dark colored particles	Dp
Amorphous organic matter reddish – yellow	Aom								

ANEXO A10: Resultados del conteo de esporomorfos de los carbones y lutitas de la Formación Amagá
Appendix A10. Sporomorph data of coals and shales from Amagá Formation

SPOROMORPHS	Angiosperms Dicotyledoneae																				Palms					Ferns				
	Cic	Spi	Spi s	Pc d	Mtc	Rtci	P tci	Z ptc	Ps pc	Ps bp	Y vg	Ps e	Ps p	Ps t	M pp	Ps tp	Mt vg	T vg	Vg d	Vg ds	Eq	Ps m	R m	Vg m	Ps f	S vg	S t	Ot		
																													Angiosperms Dicotyledoneae	
CB1-1	16,9	13,9	6,5	3,5	1,5	13,9	9,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	5,5	15,4	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	2,0	5,5	0,5	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	
CB1-2	1,9	1,0	5,3	4,3	6,3	22,7	8,7	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,7	15,5	0,5	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	7,2	10,1	1,9	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	3,9	
CB1-3	0,0	0,0	0,0	4,9	3,4	24,4	13,2	1,0	0,0	0,0	0,0	3,9	8,8	11,7	0,0	2,4	0,5	0,0	0,0	0,0	6,8	9,3	1,0	0,0	0,0	0,0	5,9	1,0	0,0	
LB1-4	0,0	0,0	0,0	2,0	7,9	7,4	10,4	0,5	0,0	1,0	0,0	0,0	5,0	11,4	0,5	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	4,0	41,6	0,0	0,0	0,0	0,0	5,4	0,0	0,0	
CB1-5	3,0	2,0	1,5	1,5	8,0	11,6	28,6	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	6,0	0,5	4,5	0,0	0,0	1,0	0,0	2,0	8,0	0,0	0,0	0,0	10,6	0,0	3,0		
CB1-6	0,9	7,7	2,6	0,9	4,3	12,0	12,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,7	5,1	3,4	0,9	8,5	0,0	0,0	0,0	7,7	13,7	0,0	0,0	0,0	8,5	0,9	2,6		
CB1-7	0,0	0,7	0,0	3,9	15,0	3,3	23,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	9,2	1,3	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	5,9	19,6	3,3	0,0	0,0	5,2	0,0	5,9		
CB1-8	1,2	0,0	0,6	0,0	17,3	17,9	9,2	0,6	0,6	0,0	0,0	0,0	6,9	7,5	5,8	1,2	3,5	0,0	2,3	0,0	4,6	12,1	4,6	0,0	0,0	1,2	0,6	2,3		
CB1-9	0,7	0,0	0,0	1,3	15,3	19,3	4,7	12,7	0,0	0,0	0,0	0,7	4,0	5,3	4,7	4,7	4,0	0,0	0,0	4,7	10,7	1,3	0,0	0,0	6,0	0,0	0,0			
CB1-10	9,4	5,8	3,1	1,0	9,9	13,1	14,7	1,0	0,0	0,0	0,0	0,5	5,8	5,8	2,6	2,1	3,1	0,0	1,6	0,0	4,2	8,9	2,6	0,0	0,0	3,7	0,5	0,5		
LB1-11	0	0	0,0	10,6	8,5	1,6	6,9	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	9,6	4,8	1,1	4,8	2,7	0,0	0,0	0,0	5,9	17,0	1,1	0,0	0,5	21,3	2,1	0,0		
CB2-A	0	5	11,7	5,0	6,7	10,0	13,3	0,0	0,0	6,7	0,0	0,0	3,3	8,3	5,0	0,0	0,0	13,3	0,0	0,0	1,7	5,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0		
CB2-B	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
CB2-C	2,5	4,3	9,3	3,7	2,5	8,0	11,1	0,6	0,0	8,0	0,0	0,0	0,0	6,8	3,7	0,0	0,0	14,2	0,0	0,0	3,7	14,2	2,5	0,0	0,0	4,9	0,0	0,0		
CB2-D	1,7	2,3	0,6	10,3	8,0	4,0	16,0	5,1	0,0	2,3	0,0	0,0	0,6	8,0	4,0	0,0	3,4	0,0	8,0	0,0	2,3	16,6	0,6	0,0	0,0	5,1	0,6	0,6		
CB2-E	0,0	1,2	0,0	14,9	7,5	3,7	17,4	0,0	0,0	6,2	0,0	0,0	0,0	6,8	5,6	0,0	7,5	0,0	0,0	5,0	15,5	5,0	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0			
CB2-F	0,0	1,1	0,0	6,7	12,4	4,5	14,6	4,5	0,0	0,0	0,0	1,1	3,4	10,1	4,5	3,4	6,7	0,0	1,1	0,0	6,7	9,0	2,2	0,0	3,4	0,0	4,5			
CB2-G	0,0	0,0	0,7	5,2	11,8	12,4	9,8	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	6,5	5,2	1,3	3,9	0,0	0,0	1,3	0,0	10,5	20,3	1,3	0,0	0,0	8,5	0,0	0,7		
CB3-1	0,6	1,9	0,0	10,4	9,1	1,9	1,3	5,2	0,0	3,9	0,0	0,0	0,0	8,4	0,0	2,6	6,5	0,0	0,0	1,9	29,2	1,9	7,1	3,2	0,6	0,6	3,2			
CB3-2	4	2	7	17	15	3	27	4	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	1	7	1	0	3	0	0	0		
CB3-3	21,1	18,4	3,4	8,2	10,9	2,7	2,7	6,1	0,0	0,0	0,0	1,4	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,6	2,7	0,0	0,0	4,8	1,4	1,4	1,4		
CB3-4	12,9	9,5	28,5	10,2	7,5	4,1	12,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,3	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	0,0	4,7	0,0	0,0	0,3	0,7	0,0	0,0		
CB3-5	3,9	3,9	1,3	46,5	11,6	5,2	4,5	2,6	3,2	2,6	0,0	0,0	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,6	0,6	0,0	0,0	0,0	5,2	0,0	3,2		
CB3-6	3,9	0,7	6,6	21,1	8,6	3,3	22,4	1,3	0,0	2,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,7	19,7	0,0	0,0	6,6	0,7	0,0	0,0		
CB3-7	0,0	0,6	1,1	11,7	11,1	2,2	16,1	0,6	0,0	0,6	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	38,3	5,6	0,0	5,0	1,7	1,7	1,7			
CB3-8	0	0	0,7	21,8	8,8	6,1	4,8	5,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	0,0	0,0	3,4	0,0	14,3	0,0	5,4	16,3	2,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0		
CB3-9	0,6	1,2	0,0	40,2	3,0	0,6	6,7	1,8	0,0	1,8	0,0	0,0	1,2	3,7	0,0	3,0	0,0	0,0	7,3	0,0	4,3	10,4	4,3	0,0	0,6	7,3	0,6	1,2		
SPOROMORPHS	Cic	Spi	Spi s	Pc	Mtc	Rtci	P tci	Z	Ps	Ps	Y	Ps	Ps p	Ps t	M	Ps	Mt	T	Vg	Vg	Eq	Ps m	R m	Vg	Ps	S vg	S t	Ot		

ANEXO A11: Esporomorfos comunes en algunos de las muestras de carbón y lutita

Appendix A11: Common sporomorphs in coal and shale samples

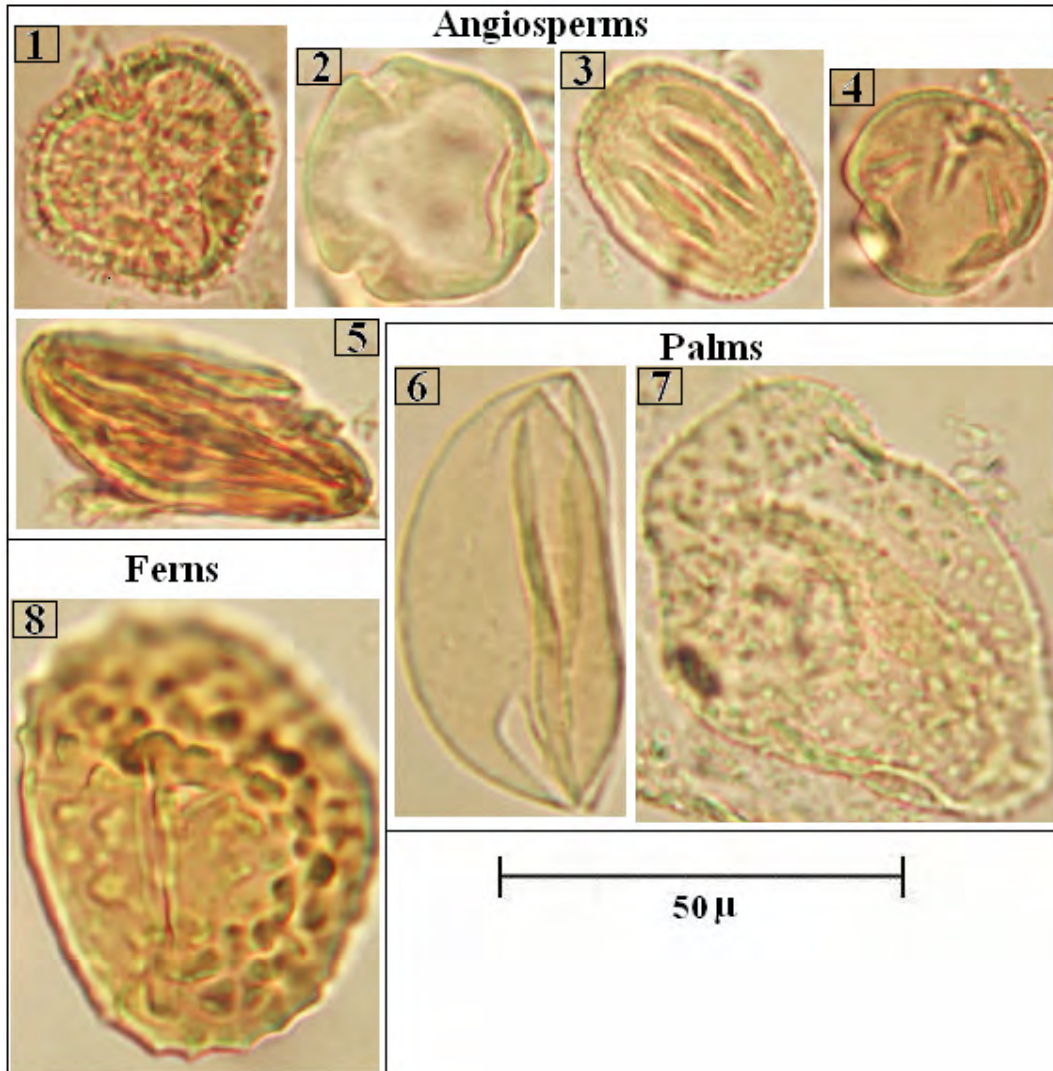


Fig. A11-1. Manto 1 El Bloque. Principales granos de polen y esporas presentes en los carbones y en las lutitas carbonosas estudiadas

1. *Retitricolporites irregularis*; 2. *Psilatricolporites* sp.; 3. *Microreticulado tricolporado*; 4. *Psilatricolporites* sp.; 5. *Psilapolicolpado*; 6. *Psilamonocolpites* sp.; 7. *Equinado monocolpado*; 8. *Verrucatosporites usmensis*

Seam 1 El Bloque. Main pollen grains and spores present in coals and coaly shales studied.

1. *Retitricolporites irregularis*; 2. *Psilatricolporites* sp.; 3. *Microreticulate tricolporate*; 4. *Psilatricolporites* sp.; 5. *Psilapolycolpate*; 6. *Psilamonocolpites* sp.; 7. *Spiny monocolpate*; 8. *Verrucatosporites usmensis*.

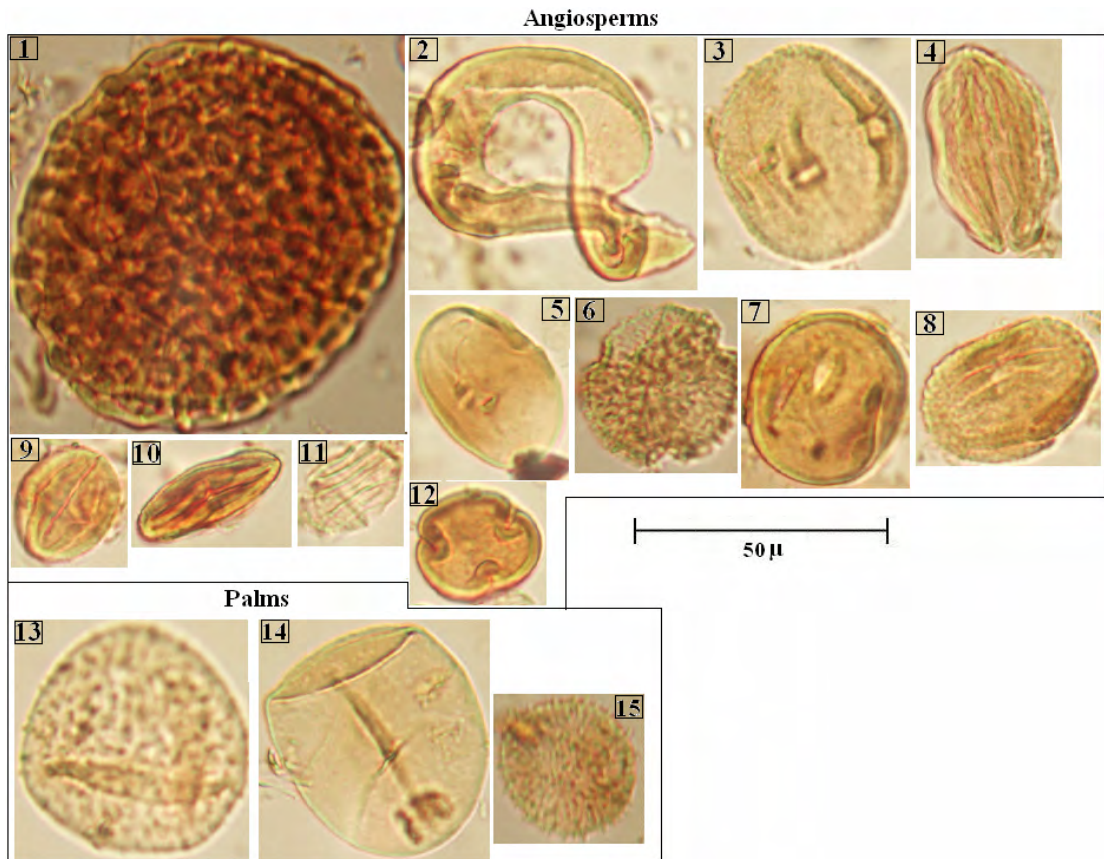


Fig. A11-2. Manto 2 El Bloque. Principales granos de polen y esporas presentes en los carbones y en las lutitas carbonosas estudiadas

1. *Spirosyncolpites spiralis*; 2. *Cyclusphaera euribei*; 3 y 8. Microreticulado policolporado;
 4. *Striapolicolpites* sp.; 5, 7 y 9. *Psilatricolporites* sp.; 6. *Retitricolporites irregularis*;
 10 y 11. *Psilapolicolpites* spp.; 13 y 15. Equinado; 14. *Psilamonocolpites* sp.

Seam 2 El Bloque. Main pollen grains and spores present in coals and coaly shales studied.

1. *Spirosyncolpites spiralis*; 2. *Cyclusphaera euribei*; 3 and 8. Microreticulate polycolporate;
 4. *Striapolicolpites* sp.; 5, 7 and 9. *Psilatricolporites* sp.; 6. *Retitricolporites irregularis*;
 10 and 11. *Psilapolicolpites* sp.; 13 and 15. Spiny palm pollen; 14. *Psilamonocolpites* sp.

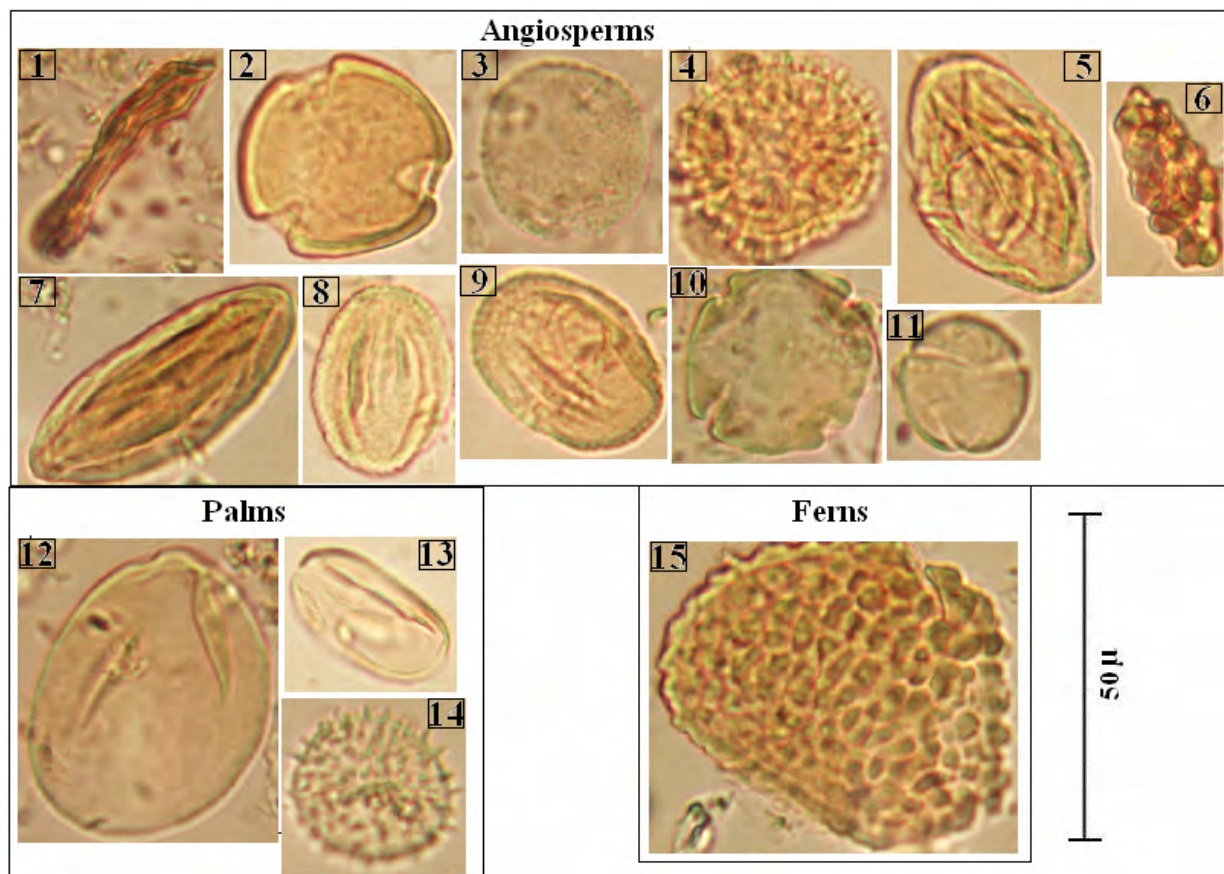


Fig. A11-3. Manto 3 El Bloque. Principales granos de polen y esporas presentes en los carbones y en las lutitas carbonosas estudiadas

1. Policolpado deformado; 2, 5 y 11; *Psilatricolporites* sp.; 3. Microreticulado policolporado
 4. *Retitricolporites irregularis*; 6. *Spirosincolpites spiralis*;
 7. Spilapolicolpado; 8. Microreticulado tricolporado; 9. Microreticulado policolporado; 10. Psilado tetraporado; 12 y 13. *Psilamoncolpites* sp.; 14. Equinado; 15. *Verrucatosporites usmensis*.

Seam 3 El Bloque. Main pollen grains and spores present in coals and coaly shales studied.

1. deformed polycolpate; 2, 5 and 11; *Psilatricolporites* sp.; 3 Microreticulate polycolporate
 4. *Retitricolporites irregularis*; 6. *Spirosincolpites spiralis*;
 7. Spilapolicolpate pollen; 8. Microreticulate tricolporate; 9. Microreticulate polycolporate; 10. Psilate tetraporate; 12 and 13. *Psilamoncolpites* sp.; 14. Spiny palm pollen; 15. *Verrucatosporites usmensis*.

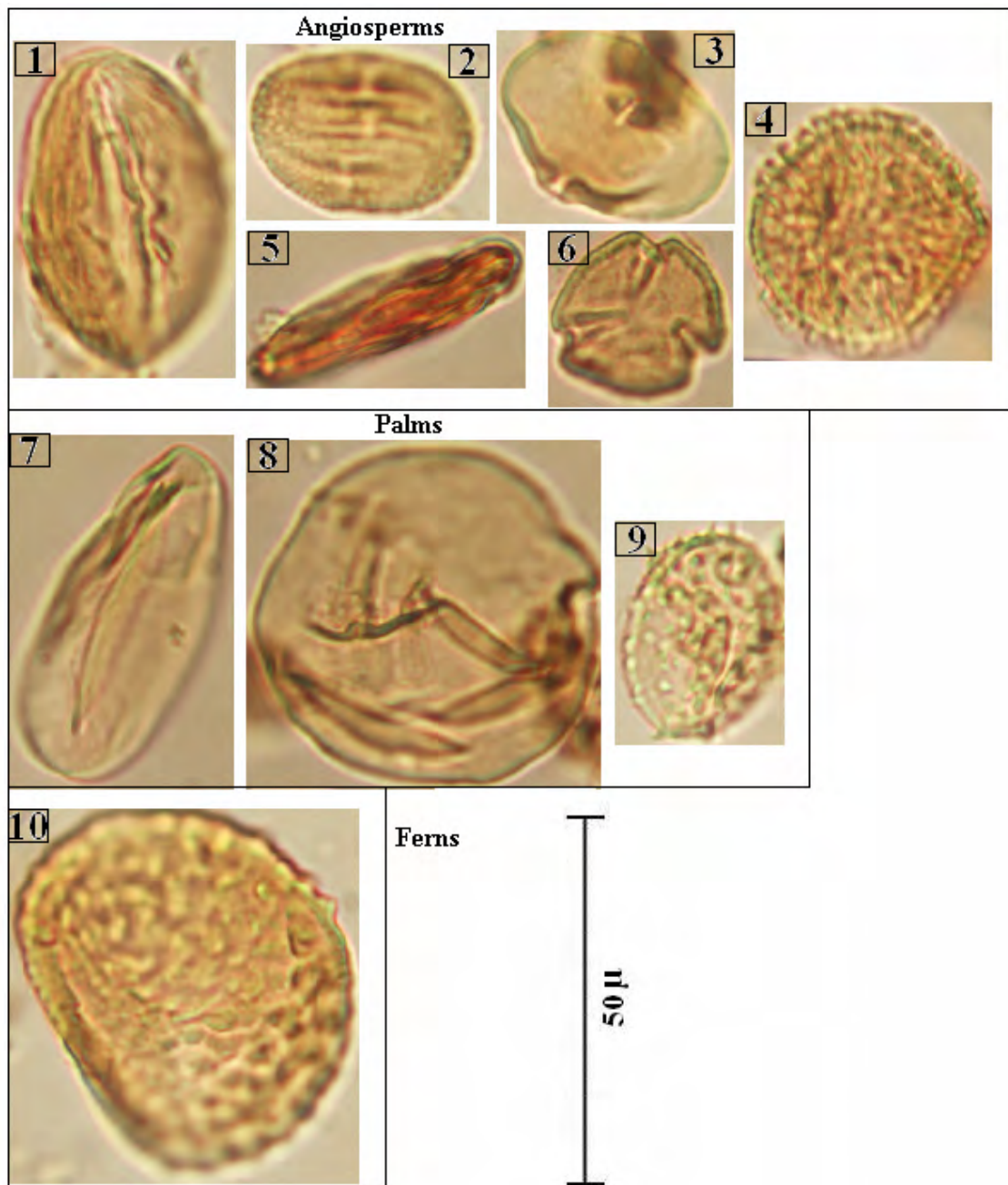


Fig. A11-4. Manto 1 Nechí. Principales granos de polen y esporas presentes en los carbones y en las lutitas carbonosas estudiadas

1. *Striapolicolpites* sp.; 2. Microreticulado policolporado; 3 y 6. *Psilatricolporites* sp.; 4. *Retitricolporites irregularis*; 5. Policolpado deformado; 7 y 8. *Psilamonocolpites* spp.; 9. Equinado; 10. *Verrugatosporites usmensis*.

Seam 1 Nechi . Main pollen grains and spores present in coals and coaly shales studied.

1. *Striapolicolpites* sp.; 2. Microretulate polycolporate; 3 and 6. *Psilatricolporites* sp.; 4. *Retitricolporites irregularis*; 5. deformed polycolpate; 7 and 8. *Psilamonocolpites* spp.; 9. Spiny palm pollen; 10. *Verrugatosporites usmensis*.

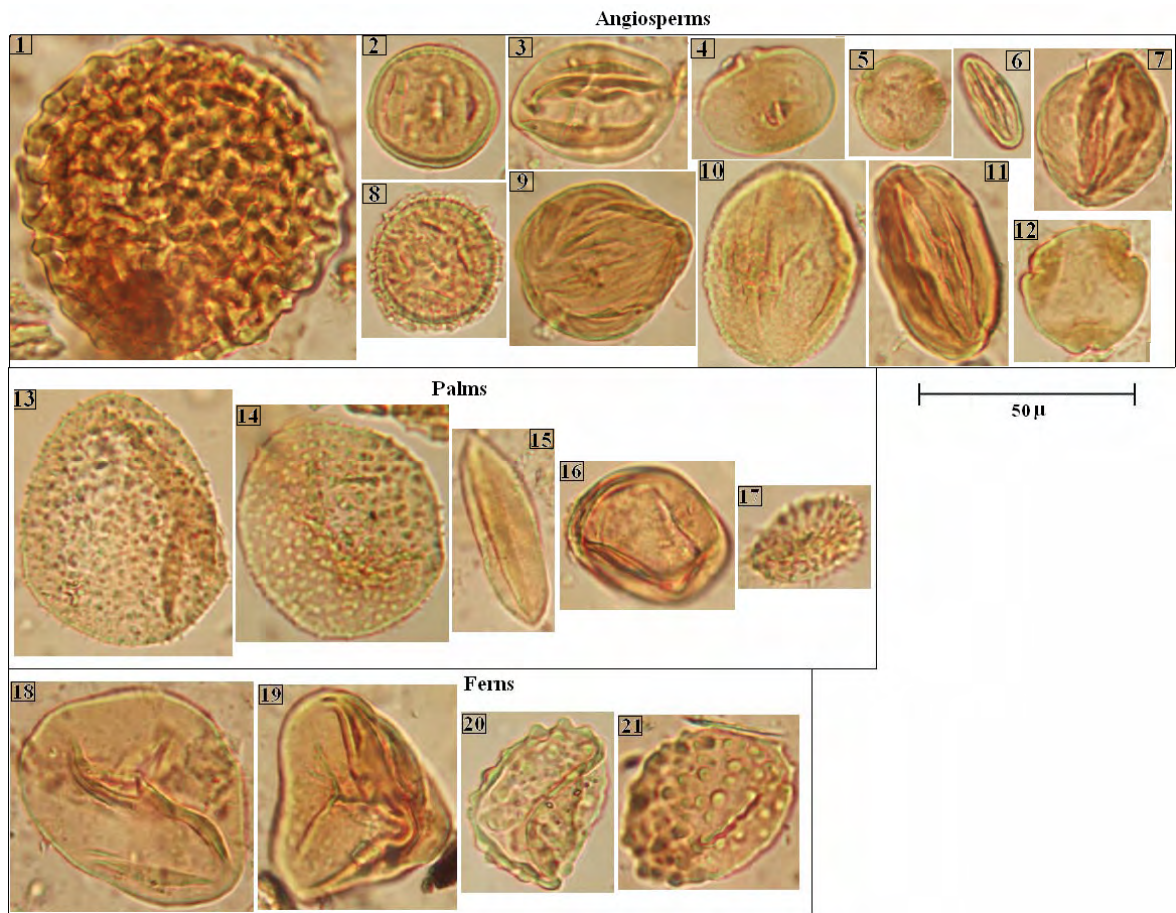


Fig. A11-5. Manto 2 Nechi. Principales granos de polen y esporas presentes en los carbones y en las lutitas carbonosas estudiadas

1. *Spirosyncolpites spiralis*; 2, 3, 4 y 12. *Psilatricolporites* sp.; 5 y 10. Microreticulado tricolporado; 6 y 11. *Psilapolycolporites* sp.; 8. *Retitricolporites irregularis*; 7 y 9. *Striatricolpites* spp.; 13, 14 y 17. Equinado; 15 y 16. *Psilamonocolpites* sp. 18 y 19. Esporas triletes; 20 y 21. *Verrucatosporites usmensis*

Seam 2 Nechi. Main pollen grains and spores present in coals and coaly shales studied.

1. *Spirosyncolpites spiralis*; 2, 3, 4 and 12. *Psilatricolporites* sp.; 5 and 10. Microreticulate tricolporate; 6 and 11. *Psilapolycolporites* sp.; 8. *Retitricolporites irregularis*; 7 and 9. *Striatricolpites* spp.; 13, 14 and 17. Spiny palm pollen; 15 and 16. *Psilamonocolpites* sp. 18 and 19. Trilete spores; 20 and 21. *Verrucatosporites usmensis*

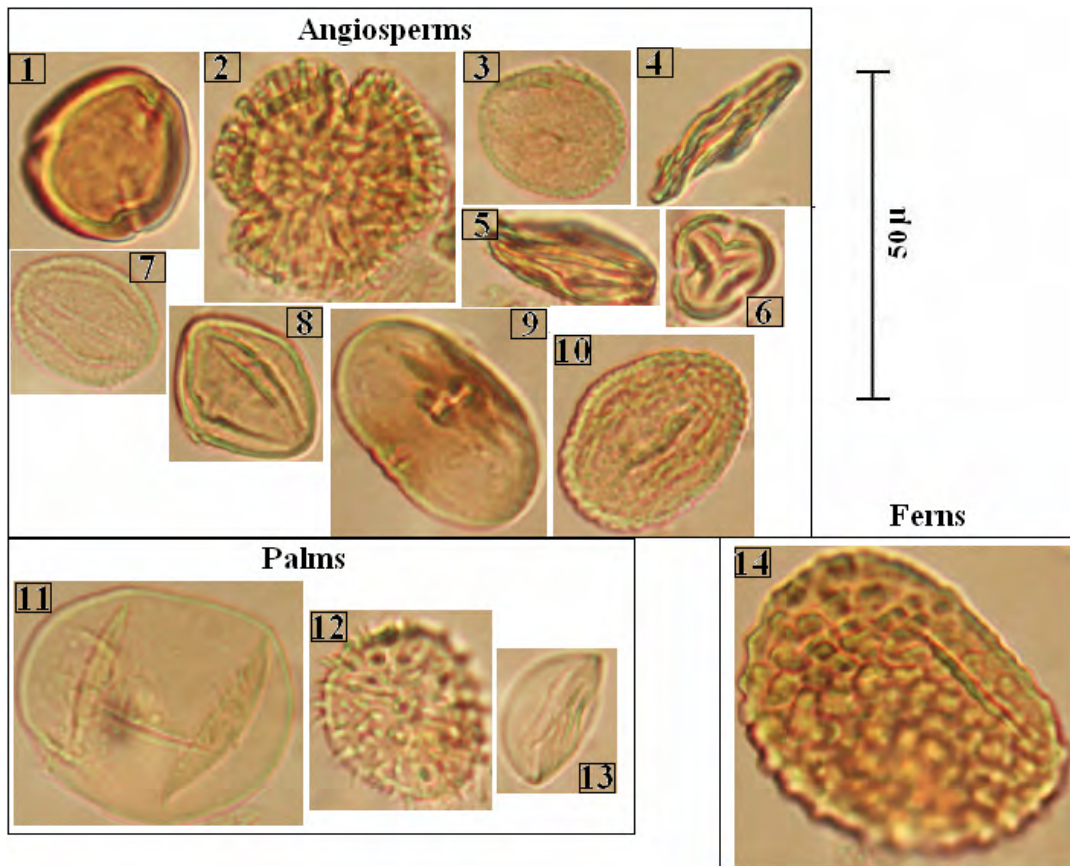


Fig. A11-6. Manto 3 Nechi. Principales granos de polen y esporas presentes en los carbones y en las lutitas carbonosas estudiadas

1, 6, 8 y 9 *Psilatricolporites* sp.; 2. *Retitricolporites irregularis*; 3. Microreticulado tricolporado; 5. Policolpado deformado; 7. Microreticulado policolpado; 10. Microreticulado policolporate; 12. Equinado; 11 y 13. *Psilamoncolpites* sp.; 14. *Verrucatosporites usmensis*.

Seam 3 Nechi. Main pollen grains and spores present in coals and coaly shales studied.

1, 6, 8 and 9 *Psilatricolporites* sp.; 2. *Retitricolporites irregularis*; 3. Microreticulate tricolporate; 5. Deformed policolpate; 7. Microreticulate policolpate; 10. Microreticulate policolporate; 12. Spiny palm pollen; 11 and 13. *Psilamoncolpites* sp.; 14. *Verrucatosporites usmensis*.



Fig. A11-7. Manto 3 El Ponton. Principales granos de polen y esporas presentes en los carbones y en las lutitas carbonosas estudiadas

1. *Spirosyncolpites spiralis*; 2. *Cyclusphaera euribei*; 3, 5 y 6. *Psilatricolporites* sp.; 4. *Psilatricolpites* sp. 7. *Psilapolicolpites* sp.; 8. *Striapolicolpites* sp.; 9. Microreticulado policolporado.; 10. Equinado; 11. 12 y 13. *Psilamonocolpites* sp.; 14, 16 y 17. *Verrucatosporites usmensis*; 15. Espora trilete.

Seam 3 El Ponton. Main pollen grains and spores present in coals and coaly shales studied.

1. *Spirosyncolpites spiralis*; 2. *Cyclusphaera euribei*; 3, 5 and 6. *Psilatricolporites* sp.; 4. *Psilatricolpites* sp. 7. *Psilapolicolpites* sp.; 8. *Striapolicolpites* sp.; 9. Microreticulate policolporate.; 10. Spiny palm pollen; 11. 12 and 13. *Psilamonocolpites* sp.; 14, 16 and 17. *Verrucatosporites usmensis*; 15. Spore trilete.

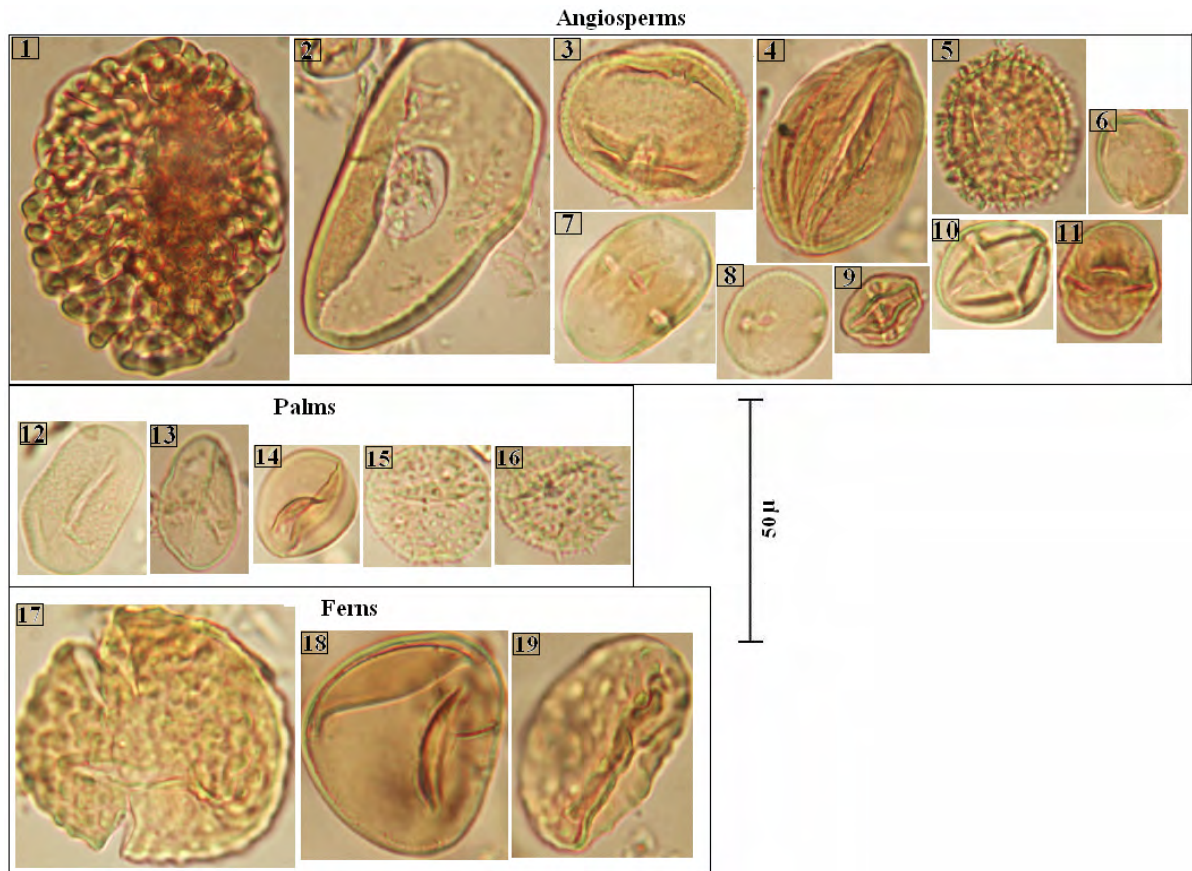


Fig. A11-8. Manto 3 El Arenal. Principales granos de polen y esporas presentes en los carbones y en las lutitas carbonosas estudiadas

1. *Spirosyncolpites spiralis*; 2. *Cyclusphaera euribei*; 3. Microreticulado tricolporado; 4. *Striapolicolpites* sp.; 5. *Retitricolporites irregularis*; 6, 7, 9, 10 y 11. *Psilatricolporites* sp.; 8. Microreticulado poliporado; 12. Microreticulado monocolpado; 13 y 14. *Psilamoncolpites* spp.; 15 y 16. Equinado; 17 y 19. *Verrucatosporites usmensis*; 18. Espora monolete

Seam 3 El Arenal . Main pollen grains and spores present in coals and coaly shales studied.

1. *Spirosyncolpites spiralis*; 2. *Cyclusphaera euribei*; 3. Microreticulate tricolporate; 4. *Striapolicolpites* sp.; 5. *Retitricolporites irregularis*; 6, 7, 9, 10 and 11. *Psilatricolporites* sp.; 8. Microreticulate poliporate; 12. Microreticulate monocolpate; 13 and 14. *Psilamoncolpites* spp; 15 and 16. Spiny palm pollen; 17 and 19. *Verrucatosporites usmensis*; 18. Spore monolete

ANEXO A12: Extracto de bitumen y cromatografía líquida de algunos de los carbones y lutitas carbonosas

Appendix A12: Bitumen extract and liquid chromatography data of coal and coaly shales

Samples	Ext ppm	% Saturates	% Aromati	% Resins	% Asfaltén	% HC	% No HC
M1 Bloque	47866	1,89	5,95	44,28	47,89	7,84	92,17
M2 Bloque	42370	1,90	4,28	20,71	73,11	6,18	93,82
M2 Nechi	70604	1,19	3,82	21,29	73,70	5,01	94,99
M3 Bloque	79880	1,40	5,00	18,92	74,68	6,40	93,60
M1 Nechi (11)	25268	2,76	6,05	26,85	64,34	8,81	91,19
M3 Arenal	46274	1,49	5,08	24,85	68,58	6,57	93,43
M3 Ponton	60846	0,69	4,86	29,95	64,50	5,55	94,45
M1 Nechi	65183	0,20	9,67	22,76	67,38	9,87	90,13
M1 Nechi (10)	85172	2,19	5,26	18,02	74,53	7,45	92,55
M2 Nechi (6)	32728	1,51	5,30	20,34	72,84	6,81	93,19
M1 Bloque (5)	53425	1,96	4,51	23,00	70,50	6,47	93,53

ANEXO A13: Difracción de rayos X de los minerales arcillosos

Appendix A13: X-ray diffraction data of clay minerals

Samples	% SMEC	% INTER	% MIC	% KAOL	% CHLOR
EL Bloque M1 - techo	0,00	0,00	19,73	58,22	22,04
El Bloque M1 - 4	0,00	0,00	0,00	93,28	6,72
El Bloque M1-12	0,00	0,00	8,12	91,88	0,00
El Bloque - 0	10,66	4,10	14,75	70,49	0,00
Nechi M1- techo	0,00	0,00	20,23	79,77	0,00
Nechi M1- techo cinta de carbón	0,00	12,48	17,27	58,95	11,30
Nechi M2 - techo	0,00	9,57	12,70	62,77	14,96
Nechi M3 - techo	0,00	0,00	12,22	71,20	16,58
Nechi M1-1	21,50	0,00	20,09	45,55	12,86
El Ponton M3 - 1	0,00	7,21	16,57	76,22	0,00
El Pontón M3 - 2	0,00	0,00	23,08	48,99	27,93
El Pontón M3 - 15	0,00	0,00	36,11	53,99	9,89
El Arenal M3 - 1	0,00	5,89	17,99	71,49	4,63
El Arenal M3 - 11	0,00	0,00	24,93	75,07	0,00