



# Interpretación del Ambiente Sedimentario de los Carbones de la Formación Guaduas en el Sinclinal Checua-Lenguazaque a partir del análisis petrográfico

CLARA LILIANA GUATAME <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Email: clara\_guatame@hotmail.com

GUSTAVO SARMIENTO <sup>2</sup>

<sup>2</sup> Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Email: gsarmiento@unal.edu.co

GUATAME, C.L. & SARMIENTO, G. (2004): Interpretación del Ambiente Sedimentario de la Formación Guaduas en el Sinclinal Checua-Lenguazaque a partir del análisis petrográfico.- GEOLOGIA COLOMBIANA, 29, pp. 41-57, 22 Figs., Bogotá.

## RESUMEN

Con el propósito de establecer los factores que controlan la acumulación de la materia orgánica de los carbones de la Formación Guaduas en el Sinclinal Checua-Lenguazaque (Departamento de Cundinamarca, Colombia), se llevaron a cabo estudios micro y macro-petrográficos. La madurez termal de los carbones aumenta de acuerdo a la profundidad y se clasifican como Bituminoso Alto Volátil C a Bituminoso Bajo Volátil (reflectancia). La distribución de los litotipos Dureno y Vitreno, son resultado de variaciones en la tabla de agua, pH fluctuante y descomposición aeróbica a subaeróbica en un pantano inundado periódicamente con exposición y oxidación de la superficie por extensos lapsos de tiempo (fuseno). Según la composición maceral y de microlitotipos predomina el grupo de la Vitrinita (65.4%- 83.8%), indicando diferentes grados de preservación de los tejidos originales de la turba. La inertinita (8% - 25.8%) es resultado de periodos de desecación o incendios causados por una disminución en la tabla de agua local, mientras la ausencia de exinita indica un mayor grado de gelificación y la influencia de aguas marinas salobres en el periodo de formación.

Los carbones analizados representan facies típicas de ambientes transgresivos parálisos, telmáticos a limnotelmáticos, detrás de barrera con influjo de aguas ricas en calcio; se desarrollan en un sistema de pantanos de bosques húmedos y secos con intermitente moderada a alta inundación, con dominio de plantas arborescentes y herbáceas bajo condiciones ligeramente óxicas a anóxicas, en un pantano o turbera ombrotrofico (levantado) y alimentado por agua lluvia (oligotrofica).

Palabras clave: carbón, facies, Formación Guaduas, litotipos, macerales, microlitotipo.

## ABSTRACT

Micro and macroscopic petrographic studies were carried out to establish the depositional conditions of the organic matter of the Guaduas Formation coals of the Checua-Lenguazaque Syncline Department of Cundinamarca, Colombia. The thermal maturity of the coals increases with depth; coals were classified as High Volatile Bituminous C to Low Volatile Bituminous by vitrinite reflectance. Distribution of Durain and Vitrain lithotypes is due to water level variations, fluctuating pH and aerobic to subaerobic decomposition in a flooded swamp with surface exhibition and oxidation during long time periods (Fusain). Maceral and microlithotypes composition show predominance of the Vitrinite Group (65.4% - 83.8%), indicating different preservation levels of the original peat tissues. Inerts (8% - 25.8%) are interpreted as result of dry periods or fires caused by a diminution of the local water level, while the low concentration of Exinite suggests a greater gelification level and brackish marine water influence during the formation time.

The studied coals represent typical facies of transgressive, telmatics to limnotelmatics environments behind barrier with calcium rich waters influence. The coals were formed in a dry to wet forest swamp system with intermittent moderate to high flood, arborescent and herbaceous dominion under slightly oxic to anoxic conditions in a swamp or ombrotrophic peat bog (raised) and fed by rain water (oligotrophic).

Key words: coal, facies, Guaduas Formation, lithotypes, macerals, microlithotypes, .

## INTRODUCCIÓN

La Formación Guaduas está ampliamente distribuida en la parte central de la Cordillera Oriental en lo que se ha denominado el Altiplano Cundiboyacense; se le ha determinado una edad Maastrichtiano superior a Paleoceno inferior de acuerdo con estudios palinológicos y paleontológicos (Van Der Hammen 1958; De Porta 1974; Sarmiento 1992b). Se encuentra como una secuencia sedimentaria de aproximadamente 1100 m de espesor (Sarmiento 1992a) en el Sinclinal Checua-Lenguazaque, el cual tiene dirección preferencial hacia el noreste.

De manera general, los carbones de la Formación Guaduas han sido caracterizados y clasificados de acuerdo con parámetros fisicoquímicos, petrográficos y de usos industriales (Blanco et al. 1977; Perez et al. 1987, Enciso et al. 1997). Por otro lado, se ha utilizado la herramienta estratigráfica y palinológica como base para la determinación de ambientes de depósito de la unidad. Con relación a los carbones, Sarmiento (1992a) plantea cuatro horizontes de pantanos costeros transgresivos responsables de la acumulación orgánica en diferentes partes de la secuencia sedimentaria.

El principal objetivo de este trabajo es determinar la variación en la composición maceral de los mantos de carbón en las columnas generalizadas de Sutatausa, Guachetá y Samacá dentro de los horizontes carboníferos definidos por Sarmiento (1992a) (Figs. 1 y 2) y establecer los factores que controlan la acumulación de la materia orgánica detectando cambios en las condiciones deposicionales que inciden en la calidad del carbón, geometría del manto y por lo tanto en los usos industriales (Vessey & Bustin 2000; Van Krevelen 1961, 1993; Stach et al. 1982 en Jiménez et al. 1999).

Se identificaron los constituyentes orgánicos, tanto macroscópicos (litotipos) como microscópicos (macerales), incluyendo sus asociaciones (microlitotipos) y el grado de carbonización (porcentaje de reflectancia media de la vitrinita) para la obtención de un modelo del desarrollo de las "facies de los carbones". En el modelo se inferen las condiciones de depósito y diagenéticas de formación a partir de las relaciones cuantitativas de los análisis de macerales y microlitotipos (Taylor et al. 1998), se calculan los índices petrográficos de Gelificación, Preservación de los Tejidos, Aguas Subterráneas y de Vegetación de Diessel (1986) y Calder et al. (1991) (en Singh & Singh 2000; Buillit et al. 2002) y se aplican diagramas ternarios propuestos por Hacquebard & Donaldson (1969); Smyth (1979); Diessel (1986); Mukhopadhyay (1986); Singh & Singh (1996, 2000) (en Singh & Singh 2000).

## METODOLOGÍA

En cada una de las secciones se escogieron cuatro mantos de carbón correlacionables por su posición estratigráfica y continuidad lateral dentro de los horizontes carboníferos para un total de doce mantos seleccionados (Fig. 2). El muestreo representativo del espesor total de cada manto se realizó en canal y bloque en el frente de explotación de minas activas subterráneas y las muestras se prepararon en el laboratorio para realizar las diferentes determinaciones fisicoquímicas y petrográficas según Norma ASTM D2013- 86 (1994) (ASTM standards 2000).

El sistema de clasificación utilizado para la descripción de litotipos fue el de Stopes (1935) (en Taylor et al. 1998) para carbones duros (Tabla 1); la Nomenclatura Internacional de "Stopes- Herleen" en la composición maceral (Tabla 2) y de microlitotipos (Tabla 3), fundamentada en la morfología, forma, tamaño, afinidad botánica y ocurrencia de los macerales (Stach 1982; Taylor et al. 1998).

En la determinación de rango del carbón se utilizó la clasificación alemana que se basa en la reflectancia de la vitrinita y la clasificación norteamericana ASTM D388-99 (ASTM standards 2000) donde se tienen en cuenta algunas propiedades de los carbones como materia volátil, carbono fijo y poder calorífico.

## RANGO DEL CARBÓN

El rango de un carbón corresponde al estado de carbonización o grado de metamorfismo alcanzado en la serie natural que va desde turba hasta antracita; depende de la acción bioquímica sobre las plantas originales durante la turbificación y es influenciado por los procesos dinamoquímicos en los que intervienen el tiempo, la temperatura y la presión como factores fundamentales de cambio (ASTM D388- 99) (Taylor et al. 1998; Uribe 1986).

Es necesario convertir los resultados experimentales proporcionados por el laboratorio en Base Como se Analiza (csa) a Base Seca Libre de Materia Mineral (slmm) o Base Húmeda Libre de Materia Mineral (hlmm) requeridas en la clasificación empleando la fórmula de Parr, así:

$$\%MV \text{ slmm} = 100 - CF \text{ slmm}$$

$$\%CF \text{ slmm} = (CF_{\text{csa}} - 0.15S) * 100 / 100 - (HR + 1.08 * CZ + 0.55 * S)$$

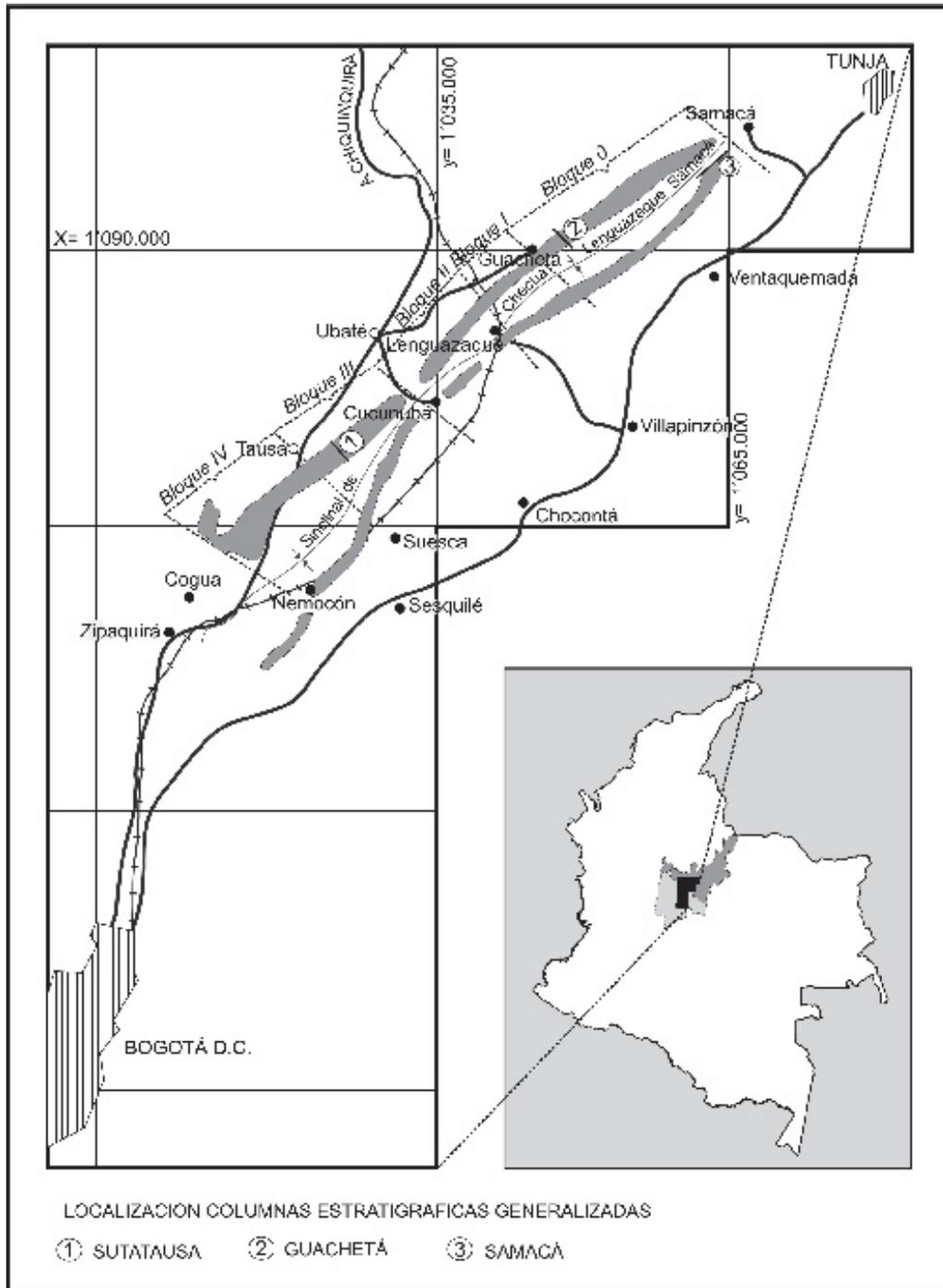


Fig. 1. Localización de las columnas generalizadas en el Sinclinal Checua- Lenguazaque.

$$\%PC \text{ hlmm (cal/g)} = \frac{((PC_{csa} - 27.78 * S_{csa}) * (100 - HE / 100 - HR))}{(1.08 * CZ + 0.55 * S) * (100 - HE / 100 - HR)}$$

Donde:

- csa = Base como se analiza
- hlmm = Base húmeda libre de materia mineral
- slmm = Base seca libre de materia mineral
- MV = Materia volátil
- S = Azufre total
- CF = Carbono fijo

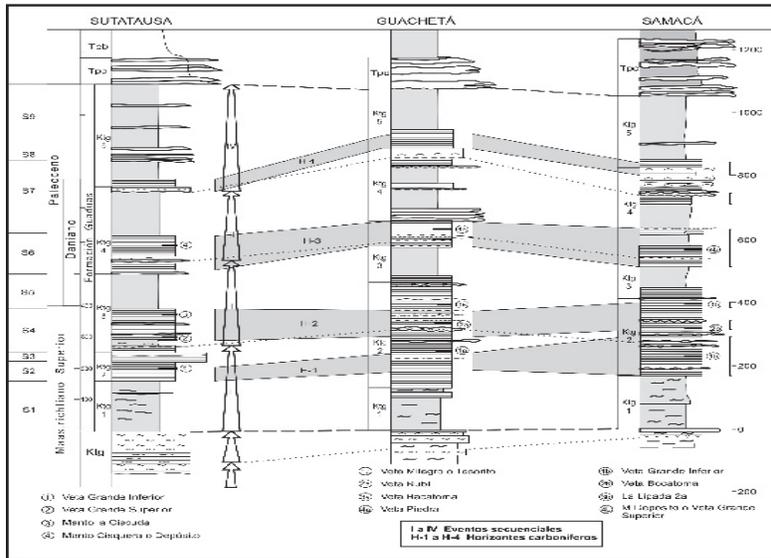


Fig. 2. Localización de los mantos de carbón estudiados dentro de los horizontes carboníferos en las tres columnas estratigráficas.

- PC = Poder calorífico
- HR = Humedad residual
- HE = Humedad de equilibrio
- CZ = Cenizas

Los carbones analizados de la Formación Guaduas son bituminosos, su clasificación abarca desde Bituminoso Alto Volátil C a Bituminoso Medio Volátil de acuerdo a la reflectancia (Fig. 3) y Bituminoso Alto Volátil B a Bituminoso Bajo Volátil en la clasificación ASTM D388-99 (Fig. 4).

#### Discusión

La clasificación de los carbones estudiados de la Formación Guaduas de acuerdo con la reflectancia de la vitrinita muestra proporcionalmente un rango menor al obtenido con la clasificación ASTM. Es importante anotar que estas clasificaciones se han establecido para carbones americanos bajos en inertinita y con valores no mayores al 10% en materia mineral.

Los carbones analizados contienen alto contenido de inertes y proporciones variables de materia mineral. Por lo tanto se puede explicar el efecto de la materia mineral sobre las determinaciones de materia volátil y poder calorífico y sobre su cálculo en base libre de materia mineral. Además, los carbones ricos en inertinita o exinita (liptinita) o ambos no se pueden clasificar apropiadamente porque en estos macerales las propiedades que determinan el rango (poder calorífico,

materia volátil y carácter aglomerante) se diferencian considerablemente de las vitrinitas en el mismo carbón (D388-99).

Sin embargo, se observa un incremento en la madurez termal (rango) de acuerdo a la profundidad en las tres secciones analizadas y tres horizontes carboníferos (H1, H2 y H3) siendo en las dos clasificaciones los carbones de la sección de Guachetá los de mayor rango, lo cual se evidencia en la disminución de la materia volátil, aumento del contenido de carbono fijo, aumento del poder calorífico, aumento del contenido de carbono elemental y disminución de humedad residual.

#### DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

##### Litotipos

Las bandas de carbón reconocidas cualitativa y microscópicamente, denominadas “litotipos”, se utilizan principalmente en la identificación y correlación de mantos en diferentes lugares dentro de la cuenca. Los carbones de la Formación Guaduas presentan un bandeamiento muy tenue (Fig. 5) comparado con los carbones de otras regiones del mundo, son clasificados como carbones húmicos con base en el diagrama de Diessel (1965) (en Falcon et al. 1986) (Fig. 6).

Según la distribución de litotipos (Fig. 7), en las secciones de Sutatausa y Samacá predomina el durenó, que se origina como el producto de la acumulación de partículas de materia orgánica oxidadas incluyendo raíces descompuestas, ramas de árbol, hojas y detritos orgánicos con pequeñas proporciones de cutículas de hojas, esporas y polen. Según Falcon et al. (1986) para la formación del durenó prevalecieron las condiciones de pH fluctuante y descomposición aeróbica a subaeróbica (Fig. 8). Esto sugiere que la turba inicialmente se depositó en bajos topográficos y fue susceptible a degradación en un pantano inundado, ya que requiere condiciones húmedas (Tasch 1960, en Taylor et al. 1998; Mastalerz et al. 2000).

En la sección de Guachetá el contenido de vitrenó es mayor aunque también el contenido de durenó es alto y hay presencia de clarenó y fuseno (Fig. 7). De acuerdo a Falcon et al. (1986), esto refleja condiciones de pH bajo o fluctuante, descomposición anaeróbica y una tabla de agua alta o pantano inundado (Fig. 8). El

Rango	Reflectancia (Ro) de la vitrinita	%MV d.n.l.	Poder calorífico Btu/lb (Kcal/kg)
Turbe.	0.2	68	7200 (4000)
		64	
Lignito	0.3	60	9900 (5300)
		56	
		52	
Sub Bitum.	0.4	48	12600 (7000)
C A	0.5	44	
B	0.6	40	
A	0.7	36	
Bituminoso medio volátil	1.0	32	15500 (8650)
		28	
		24	
	1.4	20	

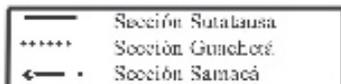


Fig. 3. Clasificación de los carbones analizados de la Formación Guaduas de acuerdo con la Reflectancia media de la Vitrinita.

ambiente de depósito manifiesta un estado óptimo de preservación de la turbera en una cuenca protegida.

Los lentes y láminas de fuseno corroboran el tipo húmico de los carbones de la Formación Guaduas, se encuentran a través de los mantos y su origen está relacionado a troncos de leña, que fueron sujetos a incendios o a exposición y oxidación de la superficie por extensos periodos de tiempo antes de sumergirse (Falcon et al. 1986); ésto indica una relativa tabla de agua baja, pH alto, descomposición aeróbica (Fig. 8) y bajas tasas de subsidencia con cubierta de agua poco profunda (Tasch 1960 en Falcon et al. 1986).

Clase	Grupo	Carbones analizados Formación Guaduas
I. Antracita	1. Meta-antracita 2. Antracita 3. Semiantracita	
II. Bituminoso	1. Bituminoso bajo volátil 2. Bituminoso medio volátil 3. Bituminoso alto volátil A 4. Bituminoso alto volátil B 5. Bituminoso alto volátil C	
III. Sub-bituminoso	1. Sub-bituminoso A 2. Sub-bituminoso B 3. Sub-bituminoso C	
IV. Lignito	1. Lignito A 2. Lignito B	

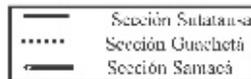


Fig. 4. Clasificación de los carbones analizados de la Formación Guaduas de acuerdo con Norma ASTM D-388.

De acuerdo con la Fig. 6 se interpreta que los carbones de la Formación Guaduas se formaron en pantanos inundados periódicamente. En la Sección de Sutatausa y Samacá predominan las condiciones de bosques secos que alternan con bosques húmedos indicando marcadas variaciones en la tabla de agua y en la Sección de Guachetá los bosques húmedos sobre los bosques secos. Esto podría indicar que los carbones de la sección de Guachetá se desarrollan más cerca a la línea de costa.

Macerales

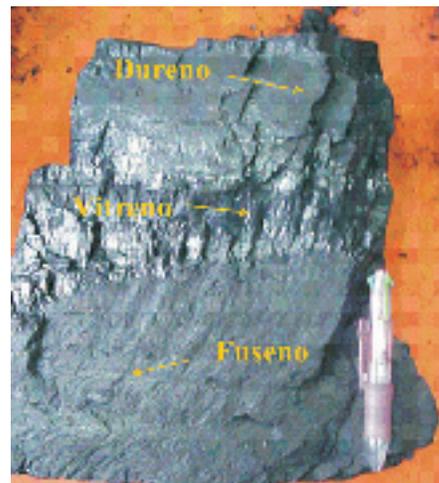


Fig. 5. Litotipos del bloque del manto Veta Grande Superior de la Formación Guaduas

TABLA 1  
Clasificación de litotipos

STOPES (1935)	SCHOPF (1960)	TASCH, (1960)	DIESSEL (1965)
	CARBÓN BRILLANTE	CARBÓN BRILLANTE	CARBÓN BRILLANTE
VITRENO	MODERADAMENTE BRILLANTE	CARBÓN BRILLANTE BANDEADO	
	MEDIANAMENTE BRILLANTE	CARBÓN SEMIBRILLANTE	CARBÓN BRILLANTE BANDEADO
CLARENO	MEDIANAMENTE LUSTRADO	CARBÓN SEMIBRILLANTE CON FIBRAS	CARBÓN BANDEADO
		CARBÓN SEMIBRILLANTE BANDEADO	CARBÓN BANDEADO OPACO
DURENO	MODERADAMENTE OPACO	CARBÓN BANDEADO	CARBÓN OPACO
		CARBÓN OPACO	
FUSENO	OPACO	CARBÓN FIBROSO	CARBÓN FIBROSO

TABLA 2  
Clasificación de macerales según sistema Hopes Herleen

GRUPO MACERAL	MACERAL	SUBMACERAL
	TELINITA	TELINITA 1
		TELINITA 2
		TELOCOLINITA
VITRINITA		GELOCOLINITA
	COLINITA	DESMOCOLINITA
		CORPOCOLINITA
	VITRODETRINITA	
	ESPORINITA	
	CUTINITA	
LIPTINITA	RESINITA	
	ALGINITA	
	LIPTODETRINITA	
	MICRINITA	
	MACRINITA	
	SEMIFUSINITA	
INERTINITA	FUSINITA	PIROFUSINITA
		DEGRADOFUSINITA
	ESCLEROTINITA	
	INERTODETRINITA	

De manera general los carbones analizados de la Formación Guaduas están dominados por macerales del grupo de la vitrinita (65.4%- 83.8%), seguido de la inertinita (8% - 25.8%) y la exinita con porcentajes entre 0% y 18.4%. La materia mineral (1.2%- 15.2%) está representada principalmente por pirita y minerales arcillosos (Fig. 9).

Grupo de la Vitrinita. Los macerales y submacerales de éste grupo se aprecian como bandas gruesas, delgadas y sustancias gelificadas relleno de cavidades o uniendo los demás macerales; se diferencian tonalidades de gris en cada uno de estos constituyentes.

Los altos contenidos de vitrinita son producto de la frecuente saturación de agua de los medios de depósito donde se formaron los carbones, lo que a su vez inhibe la oxidación de la turba (Nowak & Nowak 1999). Los precursores de la vitrinita se originan al comienzo del proceso de turbificación desde plantas húmicas que se acumularon bajo condiciones reductoras según Cohen & Spackman (1980); Cohen & Andrejko (1984) y Corvinos & Cohen (1985) (en Nowak & Nowak 1999; Taylor et al. 1998). Al detallar los tipos de vitrinita se tiene conocimiento del grado de preservación de los tejidos y

TABLA 3  
Clasificación de microlitotipos

GRUPO MICROLITOTIPO	MICROLITOTIPO	COMPOSICIÓN MACERAL
<b>Monomaceral</b>		
	Vitrinita	V > 95%
	Liptita	L (E) > 95%
	Inertita	I > 95%
<b>Bimaceral</b>		
	Clarita	V + L (E) > 95%
	Vitrinertita	V + I > 95%
	Durita	I + L (E) > 95%
<b>Trimaceral</b>		
	Trimacerita	Duroclarita
		V > I, L (E)
		Vitrinertoliptita
		L (E) > I, V
		Clarodurita
		I > V, L (E)

los cambios en las condiciones fisicoquímicas durante la sedimentación (Rimmer & Davis 1988 en Jimenez et al. 1999).

Al analizar los mantos de las secciones se tiene que el submaceral del grupo de la vitrinita que predomina tanto en su distribución vertical dentro de cada sección como en la horizontal (horizontes carboníferos) es la

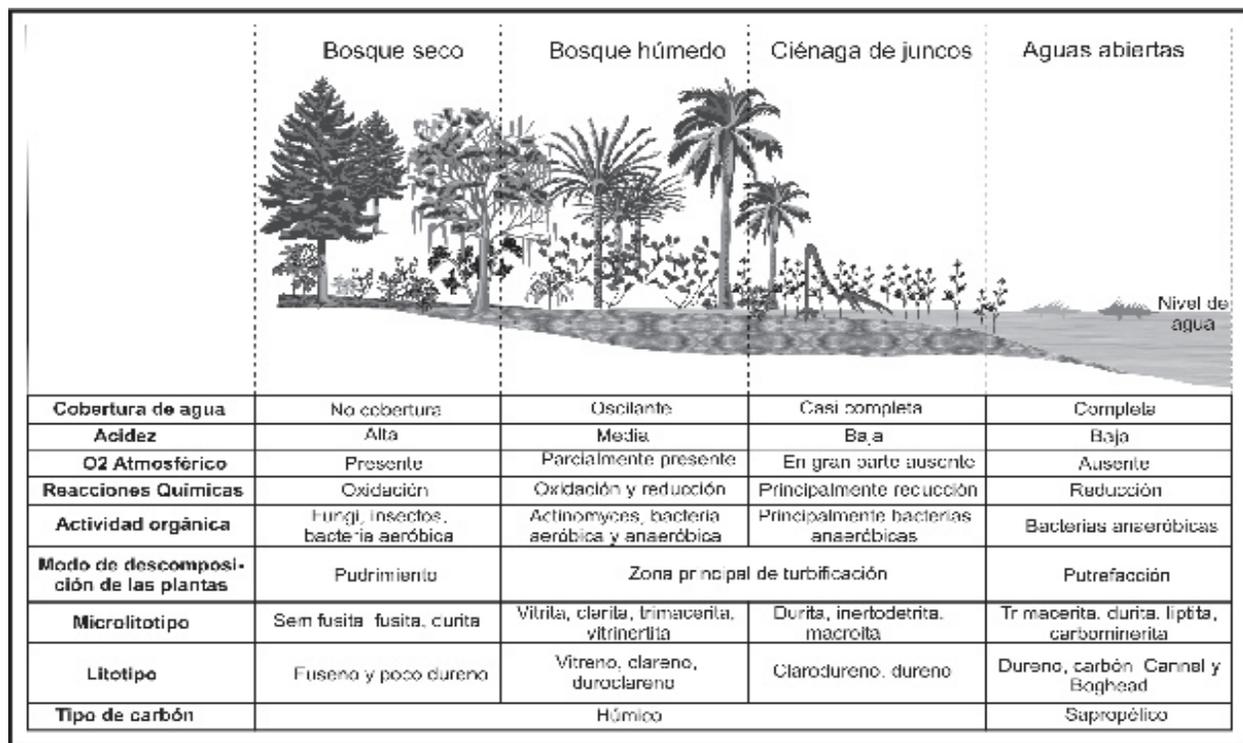


Fig. 6. Facies formadoras de carbón según Diessel (1965) en Falcon et al. (1986).

TABLA 3  
Clasificación de microlitotipos

GRUPO MICROLITOTIPO	MICROLITOTIPO	COMPOSICIÓN MACERAL
<b>Monomaceral</b>		
Vitrita		V > 95%
Liptita		L (E) > 95%
Inertita		I > 95%
<b>Bimaceral</b>		
Clarita		V + L (E) > 95%
Vitrinertita		V + I > 95%
Durita		I + L (E) > 95%
<b>Trimaceral</b>		
Trimacerita	Duroclarita	V > I, L (E)
	Vitrinertoliptita	L (E) > I, V
	Clarodurita	I > V, L (E)

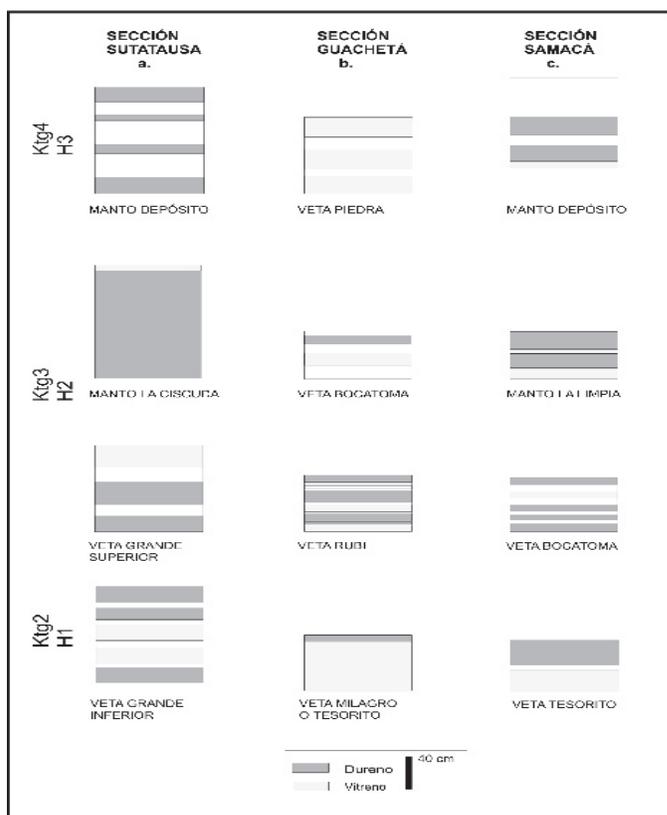


Fig. 7. Distribución de los litotipos predominantes en las secciones analizadas de la Formación Guaduas

desmocolinita, excepto en el manto La Ciscuda de la Sección de Sutatausa. La desmocolinita (Fig. 10) se deriva de tejidos parenquimatosos de plantas ricas en celulosa que se destruyeron por la fuerte descomposición que ocurre en los inicios de la formación de la turba (ICCP 1975, 1998; Stach et al. 1982; en Jiménez et al. 1999).

Las altas proporciones de desmocolinita se asocian a procesos de gelificación causados por un alto pH hacia la interface agua- sedimento. Así mismo, puede coincidir con un ambiente sedimentario que favorece la degradación bajo agua fresca neutra y oxigenada conduciendo a la descomposición del material precursor (Mukhopadhyay 1994; en Jiménez et al 1999).

La telocolinita (Figs. 10 y 11), maceral que predomina en el manto La Ciscuda (Horizonte carbonífero 2), se origina de tejidos leñosos, tallos, hojas y raíces compuestos de celulosa y lignina provenientes de plantas arborescentes y herbáceas. Cuando ocurre un alto porcentaje se atribuye a un rápido enterramiento, pH bajo y menos inundación de la turba (ICCP 1975, 1998; Goodarzi 1985; Rimmer & Davis 1988 en Jiménez et al. 1999) lo que conlleva a la preservación de grandes fragmentos de plantas (Nowak & Nowak 1999).

La corpocolinita y vitrodetrinita (Fig. 10), se encuentran en proporciones muy bajas en los mantos analizados indicando degradación de las plantas en forma de detritos tanto gelificados como no gelificados.

Grupo de la Inertinita. Los macerales predominantes de este grupo son la fusinita (Figs. 10 y 11), semifusinita (Fig. 10), micrinita (Fig. 10) y en muy baja proporción inertodetrinita, mientras esclerotinita y macrinita no incidieron en el conteo.

Los porcentajes son variables entre los mantos y a través de las secciones. Los valores más altos en los horizontes carboníferos se encontraron en los mantos de la sección de Samacá y los más bajos en Guachetá, mientras la sección de Sutatausa presenta valores intermedios. Los altos contenidos de macerales del grupo de la inertinita son probablemente el resultado de periodos de desecación o incendios causados por una disminución intermitente en la tabla de agua local (Scott 1989 en Alves & Adeb 1996; Nowak & Nowak

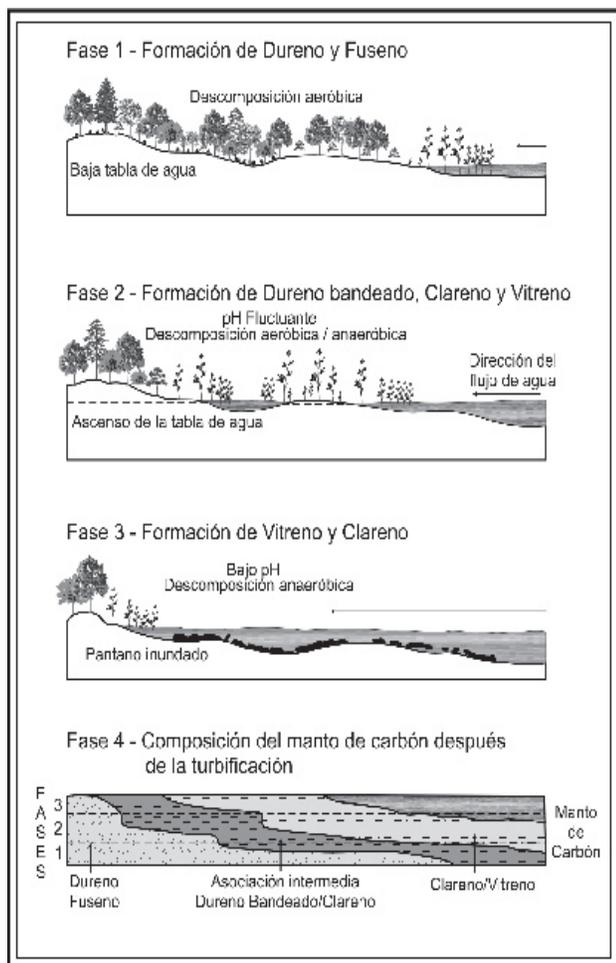


Fig. 8. Desarrollo de una turba de pantano con cambios en las condiciones faciales, modificado de Falcon et al. (1986).

1999). Estos macerales se forman en un ambiente deposicional seco y pueden representar periodos de exposición subaérea y meteorización prolongada y/o depositación de la turba relativamente rápida (Marchioni & Kalkreuth 1991 en Jimenez et al. 1999).

Grupo de la Exinita o Liptinita. Los macerales de este grupo presentes en los carbones analizados son principalmente esporinita y cutinita (Fig. 11), en muy baja proporción resinita (Fig. 11) y alginita y la liptodetrinita no está presente.

Las bajas proporciones de exinita en los mantos analizados indican una destrucción de los precursores liptiniticos de la turba y un mayor grado de gelificación que no permite su conservación y la influencia de aguas marinas y salobres en el periodo de formación (Taylor et al. 1998).

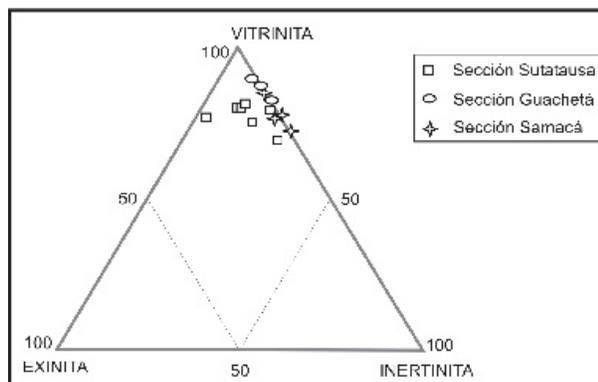


Fig. 9. Distribución de grupos macerales de los carbones analizados de la Formación Guaduas.

Materia Mineral. Esta también es tenida en cuenta en el conteo maceral; se observa relleno de espacios vacíos, reemplazando exinitas o de manera aislada. Aunque no se realizó un estudio detallado de este componente, se pudo observar que está conformado de minerales arcillosos y pirita (framboidal y diseminada). Los porcentajes de materia mineral en las secciones son variables, el mayor está en Veta Piedra (15.2%) de la sección de Guachetá (Fig. 11).

De la composición y distribución maceral se concluye que los carbones analizados se formaron bajo condiciones reductoras, en una tabla de agua variable, que origina periodos secos y húmedos. En el manto Veta Grande Inferior, Veta Grande Superior y Depósito de la sección de Sutatausa predominan las condiciones en que se forma la desmocolinita con periodos en que disminuye notablemente la tabla de agua, mostrando altos valores de inertinita, mientras, el Manto La Ciscuda se origina bajo las condiciones en que prevalece la telocolinita, igualmente con periodos de exposición o baja tabla de agua.

Con respecto a los horizontes carboníferos 1 y 3 se tiene que los carbones se formaron bajo condiciones reductoras con un predominio de desmocolinita. En el horizonte carbonífero 2 predomina la desmocolinita en las secciones de Guachetá y Samacá, mientras en Sutatausa el manto Veta Grande Superior varía con respecto a La Ciscuda donde prevalece la telocolinita.

Microlitotipos

Las asociaciones y capas microscópicas mayores de 50µm en espesor pueden estar compuestas de macerales puros (monomacerales), asociación de dos macerales (bimacerales) y de macerales correspondientes a los tres grupos macerales (trimacerales); si los minerales se encuentran en proporciones mayores a 20% en volumen son denominados Carbomineritas (Fig. 12).

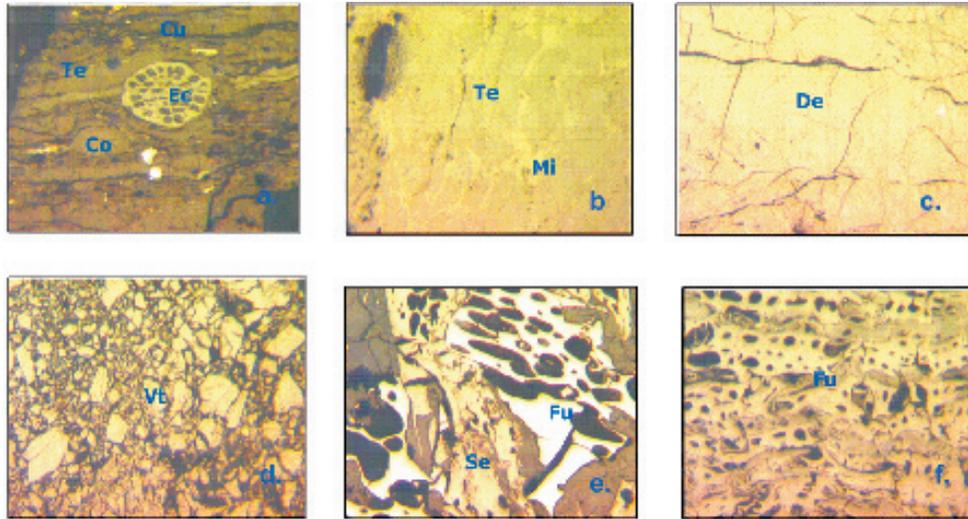


Fig. 10. Microfotografías de macerales, microlitotipos y material mineral de los carbones de la Formación Guaduas. a. Esclerotinita (Ec) en una masa de telocolinita (Te), se observa cutinita (Cu) y corpocolinita (Co) en una banda de Duroclarita (Manto Depósito). b. Vitrinertita compuesta de Micrinita (Mi) que se encuentra reemplazando cutinita en una masa de telocolinita (Te) (Manto Depósito). c. Banda de Vitrita compuesta por Desmocolinita (De) fracturada (Manto Bocatoma). d. Vitrodetrinita (Vt) compuesta por partículas de diferentes tamaños en una banda de Vitrita (Manto Depósito). e. Fusinita (Fu), semifusinita (Se) y Desmocolinita (De) (Veta Tesorito). f. Banda de Inertita compuesta de Fusinita (Fu) con estructura Bogen (paredes celulares bien definidas), las cavidades celulares se encuentran vacías (Veta Grande Inferior). Vitrinita (V), Telinita (T), Telocolinita (Te), Desmocolinita (De), Gelocolinita (Ge), Corpocolinita (Co), Vitrodetrinita (Vt), Inertinta (I), Fusinita (Fu), Esclerotinita (Ec), Macrinita (ma), Micrinita (Mi), Inertodetrinita (Id), Semifusinita (Se), Exinita (E), Esporinita (Es), Cutinita (Cu), Resinita (Re), Alginita (Al), Liptodetrinita (Li).

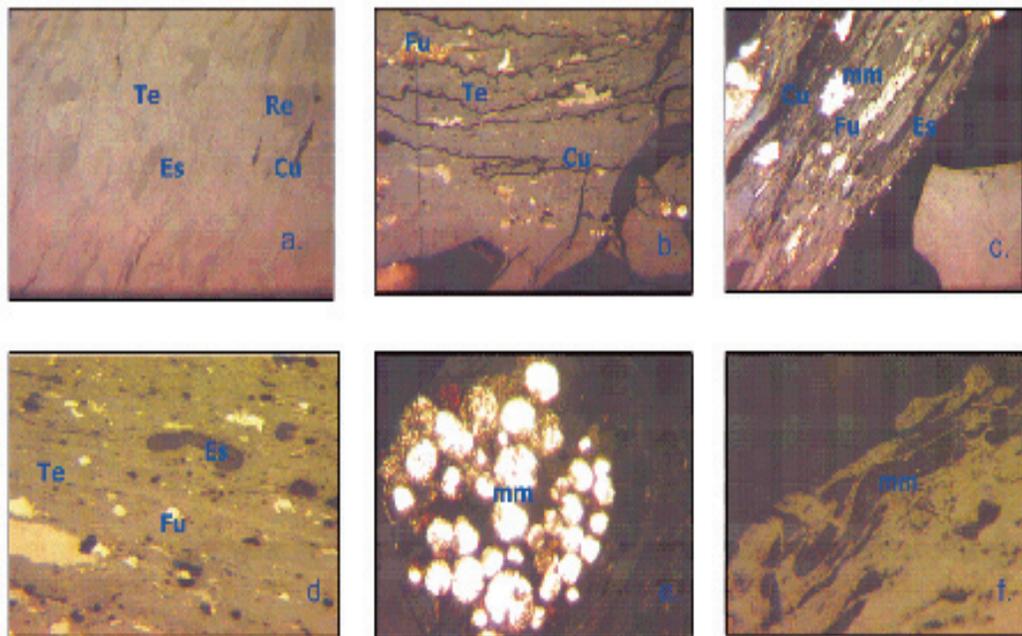


Fig. 11. Microfotografías de macerales, microlitotipos y material mineral de los carbones de la Formación Guaduas. a. Banda de Clarita formada por Esporinita (Es), cutinita (Cu) y resinita (Re) en telocolinita (Te) (Manto Depósito). b. Cutinita (Cu) en forma dentada y fusinita en telocolinita (Te) en una banda de Clarita (Manto Depósito). c. Cutinita (Cu), fusinita (Fu) y esporinita (Es) en vitrinertoliptita (Manto Depósito). d. Esporinita (Es) y fusinita (Fu) y telocolinita (Te) en una banda de Clarita (Manto Depósito). e. Materia mineral (pirita framboidal) en Carbominerita (Manto Depósito) f. Materia mineral (minerales arcillosos) reemplazando exinitas en Carbominerita (Manto Depósito). Vitrinita (V), Telinita (T), Telocolinita (Te), Desmocolinita (De), Gelocolinita (Ge), Corpocolinita (Co), Vitrodetrinita (Vt), Inertinta (I), Fusinita (Fu), Esclerotinita (Ec), Macrinita (ma), Micrinita (Mi), Inertodetrinita (Id), Semifusinita (Se), Exinita (E), Esporinita (Es), Cutinita (Cu), Resinita (Re), Alginita (Al), Liptodetrinita (Li).

Grupo Monomaceral. En este grupo el microlitotipo que predomina en los carbones estudiados es la vitrita (Fig. 10, c, d), que está directamente relacionado a los altos valores de desmocolinita y telocolinita. El valor más alto se encuentra en la Sección de Guachetá en Veta Tesorito donde igualmente se obtuvo el mayor porcentaje de vitrinita. La inertita (Fig. 10, e, f) se encuentra en menor proporción de manera fluctuante en los carbones de las tres secciones, mientras la liptita es inexistente en la mayoría de ellos.

Grupo Bimaceral. Este grupo está compuesto principalmente de clarita (Fig. 10, a, b, d,) en los carbones de la Sección de Sutatausa (7.8% - 51.4%), mientras en las demás secciones no sobrepasa el 15.8%. Valores altos de vitrinertita (Fig. 10b) se presentan en Guachetá (49.6%) y Samacá (55.6%); la durita se encuentra en muy baja proporción en los mantos La Ciscuda y Depósito de la Sección de Sutatausa, Manto Bocatoma de la Sección de Guachetá y Veta Tesorito y Manto Depósito de Samacá.

Grupo Trimaceral. Dentro de este grupo los valores más altos de duroclarita (Fig. 10, a) se obtuvieron en el manto La Ciscuda (11.93%) de la sección de Sutatausa; 2.6% en Veta Piedra de la sección de Guachetá y 2% en la Sección de Samacá. La vitrinertoliptita y clarodurita se encuentran en las tres secciones en porcentajes muy bajos, no mayores a 2.6%; la carbominerita es dominada por carbagilita y carboxipirita.

#### INTERPRETACION

En los carbones analizados de la Formación Guaduas se observó de manera general un predominio de los microlitotipos asociados a la vitrinita y de manera secundaria de los que tienen que ver con la inertinita, siendo clara la siguiente relación: al aumentar el porcentaje de vitrita aumenta la clarita; igualmente ocurre que al aumentar la inertita aumenta la vitrinertita.

El alto contenido de vitrita en los carbones analizados está relacionado al origen de la vitrinita propio de un ambiente de pantano arbóreo igual que los demás microlitotipos ricos en este maceral. Las claritas de manera general son pobres en exinita, las cuales se originan de la cubierta forestal fuertemente descompuesta y los microlitotipos ricos en inertinita indican períodos de bajo nivel freático y por lo tanto oxidación alta en la acumulación.

#### FACIES Y MARCO DEPOSICIONAL DE LOS CARBONES

El término "Facies" se refiere a todas las características primarias exhibidas por una roca sedimentaria, con las cuales su origen y ambiente de formación pueden ser

inferidos, determinando así su composición mineral y orgánica (Gary et al. 1972 en Taylor et al. 1998).

#### Composición de microlitotipos y macerales.

El diagrama propuesto por Hacquebard & Donaldson (1969) modificado por Marchioni (1980) y Nicolas et al. (1998) en Singh & Singh (2000), consta de cuatro elementos A, B, C y D (Fig. 13) localizados en los vértices de los triángulos y agrupados de acuerdo a su afinidad:

- A = Microlitotipos relacionados a depósitos subacuáticos con poca oxidación.
- B = Microlitotipos que indican oxidación.
- C = Microlitotipos relacionados a pantanos arbóreos.
- D = Microlitotipos que representan bajo nivel freático y alta oxidación.

Este modelo sugiere que los carbones de las tres secciones analizadas de la Formación Guaduas tienen un predominio de microlitotipos con afinidad de pantanos arbóreos que envuelven facies de pantano de bosques secos y húmedos.

#### Índices Petrográficos.

En el diagrama de Diessel (1986), modificado por Alves (1996) se determinan los parámetros GI - Índice de Gelificación y TPI - Índice de preservación de los tejidos (Fig. 14) de acuerdo con la composición maceral.

Índice de Gelificación - GI. Este expresa la relación entre componentes gelificados y oxidados, reflejando el nivel relativo de la tabla de agua (persistencia de condiciones húmedas) durante la formación de la turba (Marchioni 1994; en Jimenez et al 1999; Buillit et al 2002).

$$GI = \frac{\text{vitrinita} + \text{macrinita}}{\text{semifusinita} + \text{fusinita} + \text{inertodetrinita}}$$

Índice de Preservación de los Tejidos - TPI. Este es esencialmente la medida del grado de destrucción de los tejidos y la proporción de plantas leñosas en el material que formó la turba original. Expresa el radio entre componentes orgánicos preservados mecánica y texturalmente y los que no lo son (Diessel 1992, en Buillit et al. 2002; Singh & Singh 2000).

$$TPI = \frac{\text{telinita} + \text{telocolinita} + \text{semifusinita} + \text{fusinita}}{\text{desmocolinita} + \text{macrinita} + \text{inertodetrinita}}$$

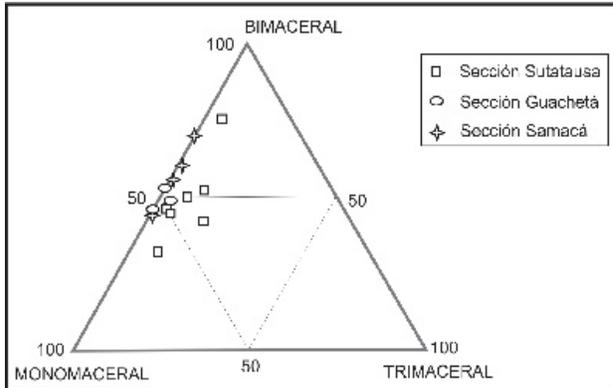


Fig. 12. Distribución mono, bi y trimaceral libre de carbominerita en los carbones analizados de la Formación Guaduas

De acuerdo con la Fig. 14 los carbones de la Formación Guaduas se depositaron bajo condiciones limno- telmáticas a telmáticas en un ambiente

transgresivo detrás de barrera, lo cual es coherente con la sucesión estratigráfica adyacente a los horizontes carboníferos.

Los altos valores de GI como es el caso de los mantos de la Sección de Guachetá presentan poca inertinita, siendo característicos de incursiones marinas y altos niveles de la tabla de agua, ocasionando un constante influjo de aguas ricas en calcio hacia los pantanos de carbón y un aceleramiento en la descomposición de la materia orgánica (Marchioni 1994, en Jimenez et al. 1999; Singh & Singh 2000).

Bajos valores de TPI reflejan un incremento en la humificación de los precursores de la vitrinita (Jimenez et al. 1999). El alto porcentaje de desmocolinita, puede indicar un extenso transporte de partículas dentro de los ambientes (Buil It et al. 2002).

Calder et al. (1991) (en Singh & Singh 2000) proponen los índices VI - Índice de vegetación y GWI - Índice

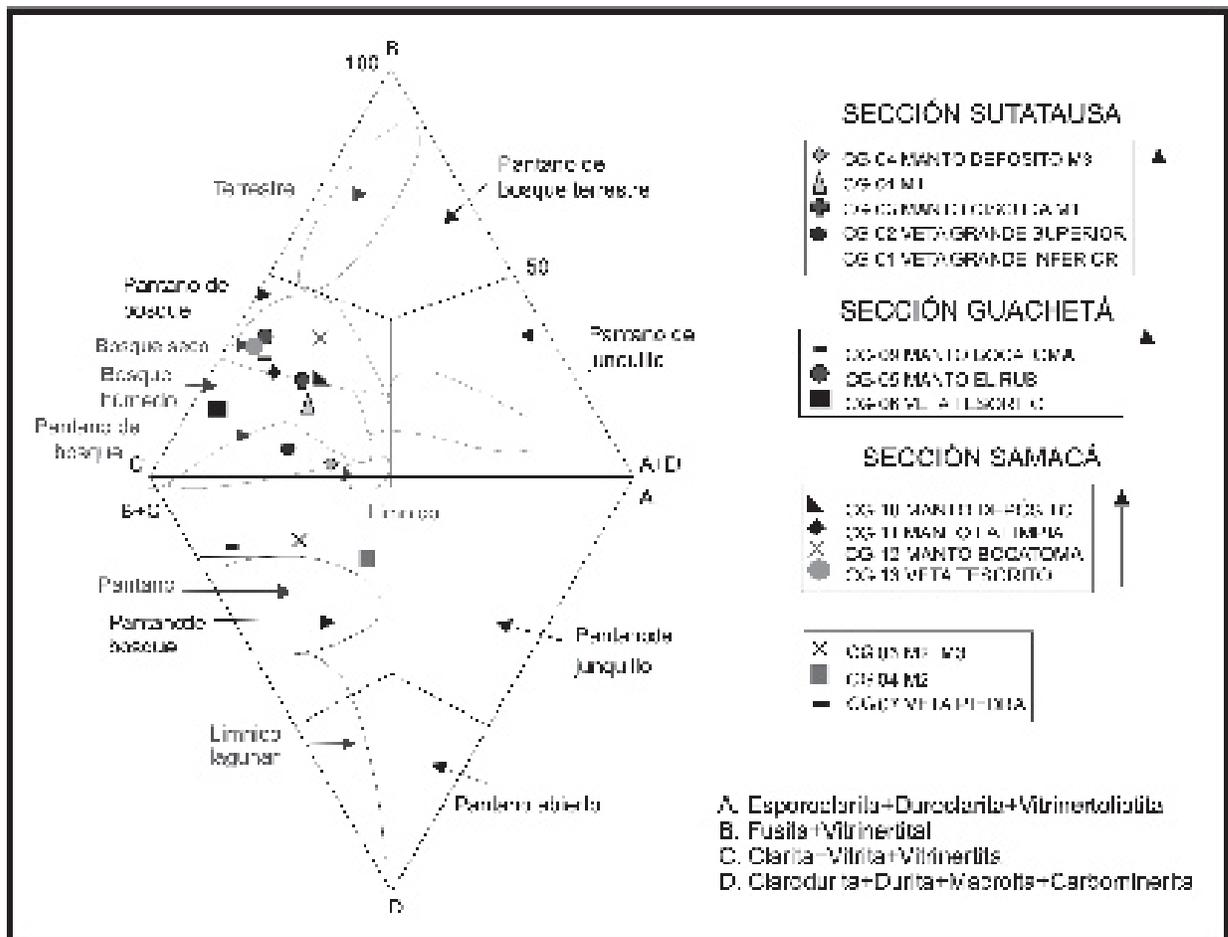


Fig. 13. Facies de los carbones de las tres secciones de la Formación Guaduas como resultado de la composición de microlitotipos según el Diagrama de Hacquebard & Donaldson (1969) modificado por Marchioni (1980) y Nicolas et al. (1998) (en Singh & Singh 2000).

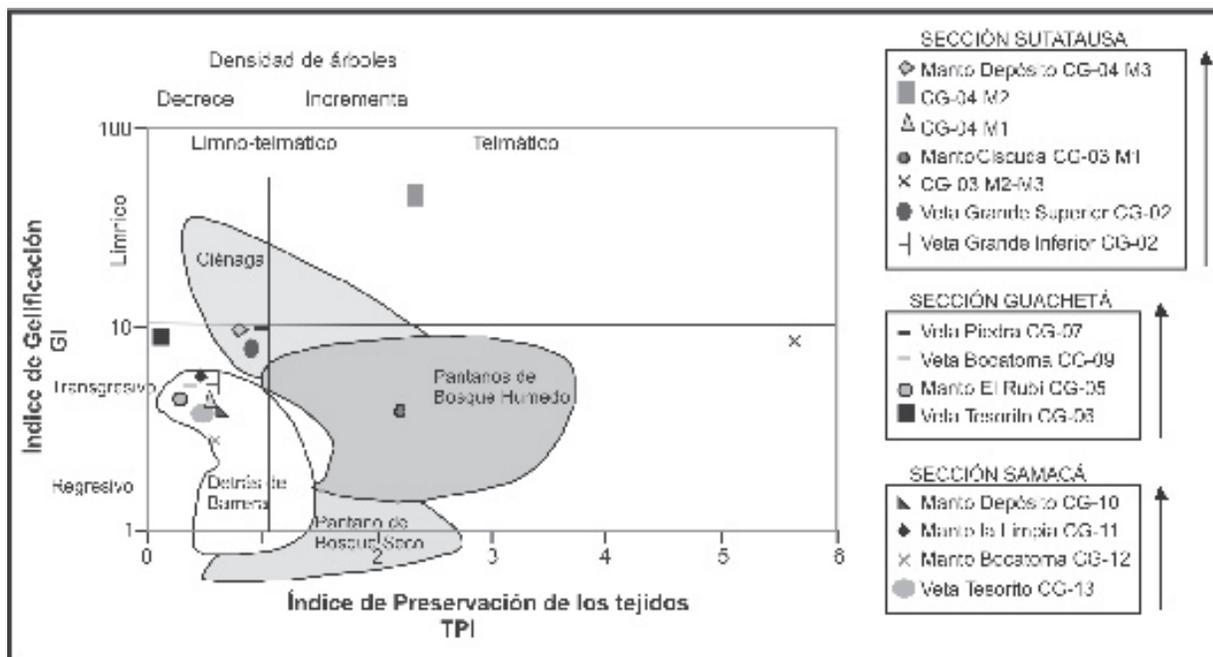


Fig. 14. Facies de los carbones de la Formación Guaduas obtenidas a partir de los Índices petrográficos TPI y GI propuestos por Diessel (1986) y modificado por Alves (1996).

de aguas subterráneas de acuerdo con la composición maceral (Fig. 15).

Índice de Vegetación - VI. Determina los macerales contrastantes de afinidad boscosa con los de afinidad herbácea y acuática marginal distribuida en las turberas (Calder et al. 1991; en Jiménez et al. 1999).

$$VI = \frac{(\text{Telinita} + \text{Telocolinita} + \text{Fusinita} + \text{Semifusinita} + \text{Esclerotinita} + \text{Resinita})}{(\text{Desmocolinita} + \text{Inertodetrinita} + \text{Alginita} + \text{Liptodetrinita} + \text{Cutinita})}$$

Índice de Aguas Subterráneas - GWI. Este índice establece el contraste de macerales fuertemente gelificados con los que no lo son (Calder et al. 1991; en Jiménez et al. 1999), indicando el nivel relativo del agua en la turbera o pantano.

$$GWI = \frac{\text{Gelinita} + \text{Corpocolinita} + \text{Materia mineral} + \text{Vitrodetrinita}}{\text{Telinita} + \text{Telecolinita} + \text{Desmocolinita}}$$

Las turberas o pantanos que dieron origen a los carbones de la Formación Guaduas se formaron bajo condiciones tanto ombrotroficas (levantada, de domos o de ciénagas altas) como oligotroficas (agua lluvia). Los valores bajos de VI en la mayoría de los mantos indican un dominio de plantas herbáceas, sin embargo en los mantos de la sección de Sutatausa (La Ciscuda y

El Depósito) se encuentran valores mayores a 1 lo que indica un predominio de plantas boscosas que alcanzan a ser influenciadas por condiciones mesotroficas.

#### Diagramas Ternarios

Mukhopadhyay (1986, en Singh & Singh 2000) desarrolla un diagrama ternario (Fig. 16) basado en la asociación maceral de la siguiente manera:

A = Vitrinita (telinita + colinita) + Exinita terrestre (indica de manera general buena preservación en los tejidos originales)

B = Vitrodetrinita + Liptodetrinita + Gelocolinita (define mayor maceración, actividad bacteriana incrementando la anoxicidad).

C = Inertinita (señala condiciones secas).

Con base en el análisis de este tipo de diagramas se puede concluir que el material precursor de los carbones analizados es de bosque de pantano desarrollado en un ambiente ligeramente óxido a anóxico con buena preservación de los tejidos.

Singh & Singh (1996) desarrollan igualmente un diagrama ternario (Fig. 17) teniendo en cuenta los grupos

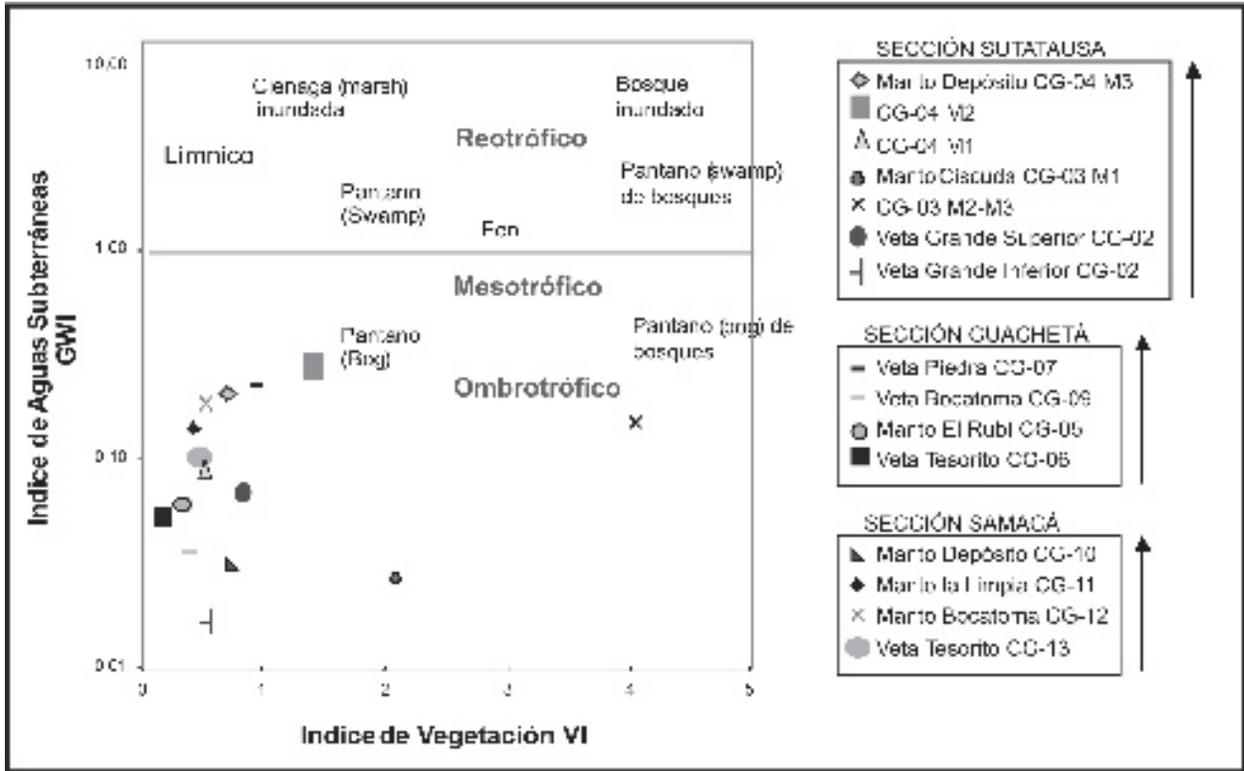


Fig. 15. Diagrama de paleoambientes de la turbera que formó los carbones analizados de la Formación Guaduas según los índices petrográficos GWI y VI (Calder et al. 1993 en Singh & Singh 2000).

macerales y materia mineral. El análisis indica que en los carbones analizados predominan los macerales del grupo de la Vitrinita y Exinita, lo cual resulta de un ambiente pantanoso donde hay alternancia de condiciones óxicas y anóxicas e intermitente moderada a alta inundación.

**MODELO SEDIMENTARIO DE LOS MANTOS DE CARBÓN DE LA FORMACIÓN GUADUAS**

Los carbones de la Formación Guaduas representan facies características de ambientes parálidos (expuestos a incursiones marinas) en condiciones telmáticas (terrestres) a límnicas (subacuáticas). Se desarrollan en "lagunas costeras" o depresiones con un intercambio temporal o permanente con aguas marinas y están protegidos del mar por algún tipo de barrera.

Al analizar los mantos de carbón de sur a norte dentro de los horizontes carboníferos se observan variaciones en la vegetación dentro del pantano:

El Horizonte Carbonífero 1 es predominantemente de bosques secos, excepto en Veta Milagro o Tesorito de

la sección de Guachetá, que se encuentra en bosques húmedos más cercanos a la línea de costa y por lo tanto más influenciado por aguas saladas (Fig. 18).

El Horizonte carbonífero 2 se analizó con dos mantos localizados en su parte inferior y superior; hacia la base se observa un bosque de pantano en el manto de la Sección de Samacá y bosques secos en lo correspondiente a las secciones de Guachetá y Samacá, mientras hacia su parte superior hay un dominio de bosques secos a lo largo de todo el horizonte, indicando fuerte oxigenación y frecuente invasión en áreas pantanosas restringidas (Fig. 18).

El Horizonte Carbonífero 3 se desarrolla en zonas bajas de pantanos costeros variando de bosques de pantano a bosques secos caracterizados por un predominio de minerales arcillosos en su composición mineral (Fig. 18).

**CONCLUSIONES**

Se comprobó la utilidad de la petrografía del carbón, ya que permitió reconocer las condiciones de formación

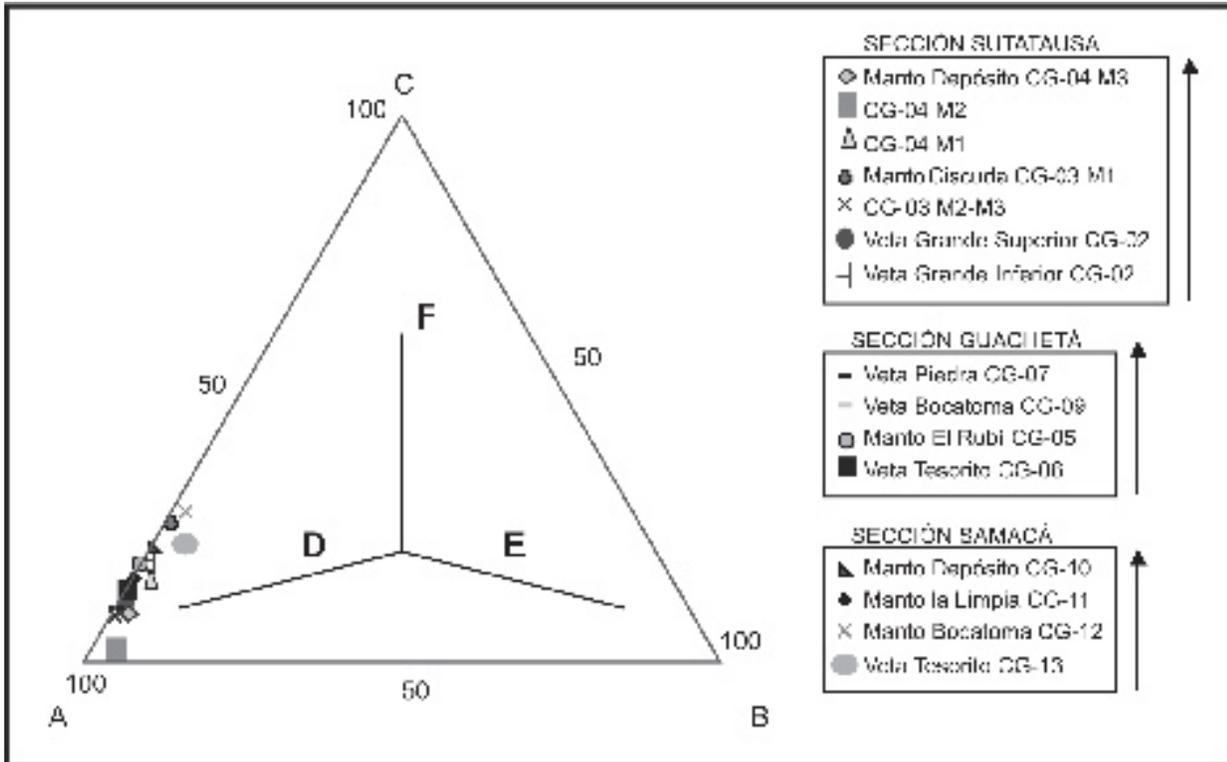


Fig. 16. Facies de los carbones analizados de la Formación Guaduas de acuerdo con la composición maceral (Mukhopadhyay 1986 en Singh & Singh 2000).

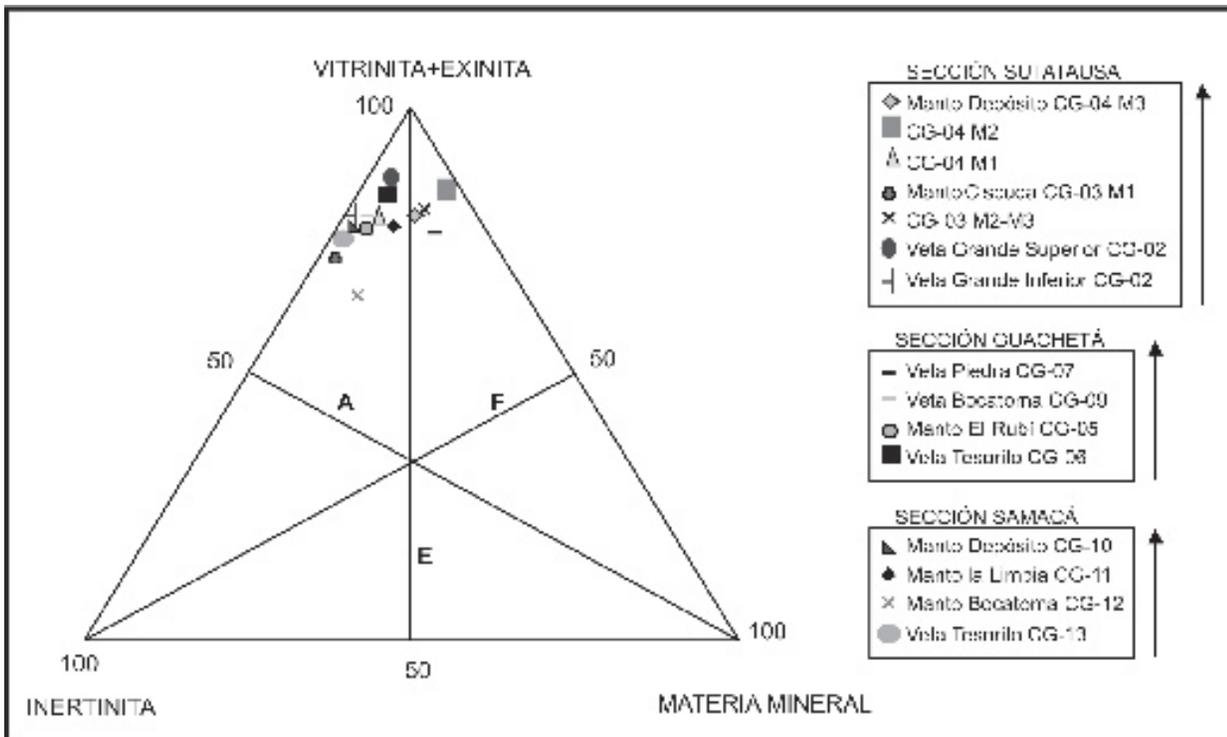


Fig. 17. Condiciones deposicionales de los carbones analizados de la Formación Guaduas de acuerdo con el contenido maceral y materia mineral (Singh & Singh 1996; en Singh & Singh 2000).

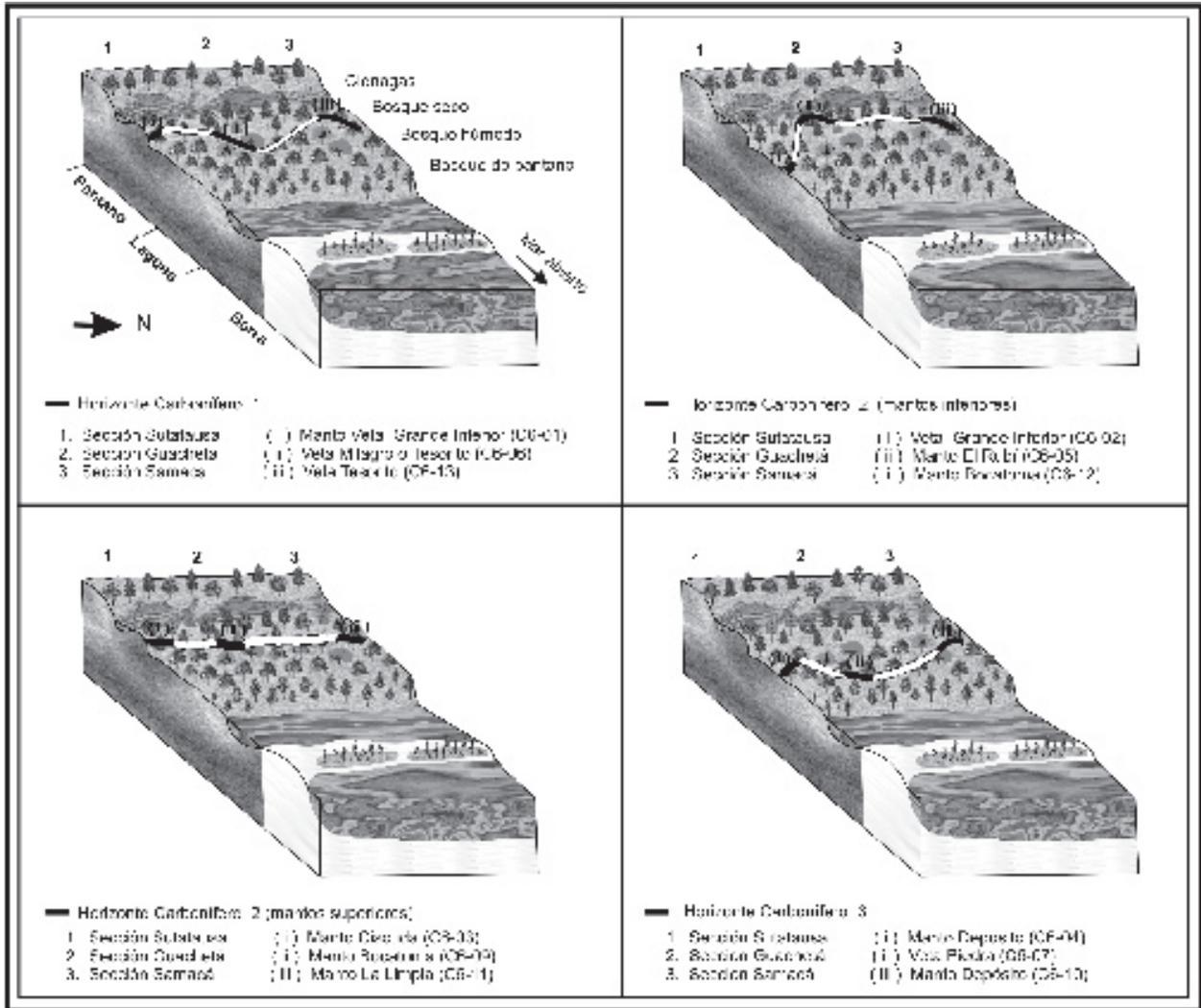


Fig. 18. Modelo deposicional de los horizontes carboníferos analizados de la Formación Guaduas (H1, H2 y H3)

de la turba en los carbones de la Formación Guaduas analizados, así como la identificación de cambios deposicionales a través de los horizontes carboníferos y secciones estratigráficas escogidas.

Se observó un incremento en la madurez termal (rango) de los carbones de la Formación Guaduas de acuerdo a la profundidad.

Los carbones de la Formación Guaduas representan facies típicas de ambientes transgresivos parálidos (telmáticos) a limnotelmáticos, detrás de barrera (GI y TPI) con influjo de aguas ricas en calcio que aceleran la descomposición de la materia orgánica y por lo tanto la humificación de los precursores de la vitrinita.

Los carbones de la Formación Guaduas se desarrollan en un sistema de pantanos de bosques húmedos y secos con intermitencia de moderadas a altas inundaciones y con dominio de plantas arborescentes y herbáceas bajo condiciones ligeramente óxicas a anóxicas.

Los valores de GWI y VI indican que la turbera se formó en un pantano bajo condiciones ombrotroficas (levantada, de domos o de ciénagas altas), alimentado por agua lluvia (oligotrófica), en climas húmedos. En la mayoría de los mantos se observa un dominio de plantas herbáceas; sin embargo, en los mantos de la sección de Sutatausa (La Ciscuda y El Depósito) las plantas boscosas son predominantes.

## AGRADECIMIENTOS

Se expresan sinceros agradecimientos a INGEOMINAS por el apoyo en tiempo e infraestructura para la realización del muestreo y análisis de laboratorio, de manera especial a la Química Gladys Valderrama, coordinadora del grupo de carbones y al Técnico Francisco Martínez.

A la doctora Isabel Suarez (INCAR- España) y al Geólogo Jorge Gómez (Ingeominas) por proporcionar los artículos y textos relacionados al tema de la Petrología del Carbón. También al geólogo Francisco Velandia por la colaboración en la revisión del manuscrito.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALVES, R.G. & ADEB M.V.B. (1996): Sequence stratigraphy and coal petrography applied to the Candiota Coal Field, Rio Grande do Sul, Brazil: A depositional model.- *International Journal of Coal Geology*, v. 30 (3), p. 231-248.
- ASTM STANDARDS (2000): Annual Book of ASTM Standards.- *Gaseous Fuels: Coal and Coke*.
- BLANCO, G.; ROMERO, E. & URIBE, C. (1977): Clasificación Internacional de los Carbones de Checua-Lenguazaque.- Informe 1726, Ingeominas, 17 p., Bogotá.
- BULLIT, N. E.; LALLIER, B. ; PRADIER, B. & NICOLAS, G. (2002): Coal petrographic genetic units in deltaic-plain deposits of the Campanian Mesa Verde Group (New Mexico, USA).- *International Journal of Coal Geology*, v. 51 (2), p. 93-110.
- DE PORTA, J. (1974): *Lexique Internationale Stratigraphique.- Amerique Latine*, Vol V, CNRS, Paris.
- ENCISO, H.; GUATAME, C.; GOMEZ, F. & ESCALLON, M. (1997): Manual de Métodos de Predicción de la Calidad del Coque.- Informe Ingeominas, 141 p., Bogotá.
- FALCON, R. M. & SNYMAN, C. P. (1986): An Introduction to Coal Petrology: Atlas of petrographic constituents in the bituminous coals of Southern Africa, 26 p.
- JIMÉNEZ A.; MARTINEZ-TARAZONA R. & SUÁREZ-RUIZ I. (1999): Paleoenvironmental conditions of Puertollano coals (Spain): petrological and geochemical study. *International Journal of Coal Geology*, v. 41 (3), p. 189-211.
- MASTALERZ M.; PADGETT L. & EBLE CORTLAND F. (2000): Block coals from Indiana: inferences on changing depositional environment.- *International Journal of Coal Geology*, v. 43 (1-4), p. 211-226.
- NOWAK, G.J. & NOWAK, A. G. (1999): Peat-forming environments of Westplain A coal seams from the Lower Silesian Coal Basin of SW Poland based on petrographic and palynologic data.- *International Journal of Coal Geology*, v. 40, p. 327-351.
- PEREZ, F.H.; VALDERRAMA, G.; BLANCO, G.; GONZÁLEZ, L. M. & GARCÍA, F. (1987): Caracterización de carbones colombianos. Zona Checua-Lenguazaque.- *Boletín Geológico*, No 28 (2), p. 1-218, Ingeominas, Bogotá.
- SARMIENTO, G. (1992a.): Estratigrafía y medios de depósito de la Formación Guaduas.- *Boletín Geológico*, No. 32 (1), p. 1-44, Bogotá.
- SARMIENTO, G. (1992b): Palinología de la Formación Guaduas (Estratigráfica y Sistemática).- *Boletín Geológico*, No 32 (2), p. 45-126, Bogotá.
- SARMIENTO, G. (1994): Visión Regional de la Formación Guaduas. En: *Estratigrafía, Palinología y Paleocología de la Formación Guaduas (Maastrichtiano - Paleoceno; Colombia)*. Cap. 4. *Boletín Geológico, Publicación Especial No 20*, p. 165-180. Ingeominas. Bogotá.
- SHAPIRO, N. & GRAY, R.J. (1960): Petrographic Classification Applicable to Coals of all Ranks.- *Proc. III. Min. Inst.* 68th year, p 83- 97.
- SINGH M. P. & SINGH A. K. (2000): Petrographic characteristics and depositional conditions of eocene coals of platform basins, Meghalaya, India.- *International Journal of Coal Geology*. v. 42 (4), p. 315-356.
- STACH, E.; MACKOWSKY, M.; TEICHMULLER, M.; TAYLOR, G.; CHANDRA, D. & TAICHMULLER, R. (1982): *Coal Petrology*.- 518 p., Gebruder Borntraeger, Berlin- Stuttgart.
- TAYLOR, G.; TEICHMULLER, M.; DAVIS, A.; DIESSEL, C.; LITTKER, R. & ROBERT, P. (1998): *Organic Petrology*.- 704 p., Gebruder Borntraeger, Berlin- Stuttgart.
- URIBE, C.A. (1986): Introducción a la tecnología del carbón. Origen, composición, propiedades y clasificación.- Informe No 1980, Ingeominas, Bogotá.
- VAN DER HAMMEN, TH. (1958): Estratigrafía del Terciario y Maastrichtiano continentales y Tectogénesis de los Andes Colombianos.- *Boletín Geológico, Serv. Geol. Nal.*, 4 (1-3), p. 67- 128, Bogotá.
- VESSEY S.J. & BUSTIN R.M.(2000): Sedimentology of the coal-bearing Mist Mountain Formation, Line Creek, Southern Canadian Cordillera: relationships to coal quality.- *International Journal of Coal Geology*, v. 42 (2-3), p. 129-158.

Manuscrito recibido, Julio de 2004, aceptado; Octubre de 2004

