

**GEOQUIMICA DE LOS YACIMIENTOS DE GAS ASOCIADO A CARBON EN LA
CUENCA DE BOGOTA**

**YENY MILANYELA CORTES PUENTES
MIGUEL FERNANDO JIMENEZ JACOME**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2007**

**GEOQUIMICA DE LOS YACIMIENTOS DE GAS ASOCIADO A CARBON EN
LA CUENCA DE BOGOTA**

YENY MILANYELA CORTES PUENTES

MIGUEL FERNANDO JIMENEZ JACOME

Proyecto de Grado para optar el titulo de Geólogo

Director

MARIO GARCIA GONZALEZ, PhD.

Profesor Titular

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA**

2007

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo de grado, agradecen:

A la Universidad Industrial de Santander, por permitirnos crecer académica y personalmente.

A la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander y su personal docente, por contribuir exitosamente con nuestra formación profesional.

Al grupo de Investigación en Geología de Hidrocarburos y Carbones de la escuela de Geología, por brindarnos la oportunidad de iniciar el ejercicio de nuestra profesión en uno de sus proyectos.

A COLCIENCIAS, por la realización y financiación de este proyecto de investigación (proyecto 1102-06-17634 RC 325-2005).

Al Doctor Mario García González, por brindarnos su asesoría, confianza y amistad a lo largo de nuestra carrera, y especialmente durante la realización de este trabajo de grado.

A Dios que me ha acompañado, inspirado y ayudado en este camino.

A mi madre que con su constante dedicación ha hecho que este sueño se haga realidad.

A esos dos angelitos en el cielo que siempre me acompañan y me reconfortan para seguir adelante.

A Jessica y Leonardo que me han servido de ejemplo a seguir. A Wandda.

A mis familiares, amigos y compañeros, en especial a Henry David por su compañía incondicional.

A Mauricio por su ayuda constante en estos últimos años.

MILANYELA

A mi mamá y a mi papá quienes siempre me acompañaron durante este proceso.

A Icio y a la nena por su apoyo incondicional.

A Tita que ha estado conmigo todo este tiempo.

A mis compañeros quienes alegraron mi estancia en la universidad.

Y a mis amigos que me quieren por lo que soy, Milanyela, Fab y Julio.

MIGUEL

CONTENIDO

RESUMEN

ABSTRACT

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Pág.

INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	3
2. ANTECEDENTES	4
3. LOCALIZACION AREA DE ESTUDIO	7
4. MARCO GEOLOGICO Y ESTRATIGRAFICO	10
4.1. MARCO GEOLOGICO REGIONAL	10
4.2. EVOLUCION TECTONICA	12
4.3. GEOLOGIA ESTRUCTURAL	16
4.4. ESTRATIGRAFIA DE LA SABANA DE BOGOTA	19
4.5. TIPO DE CUENCA	31
4.6. DISCORDANCIAS	31
5. ESTRATIGRAFIA DE LA FORMACION GUADUAS	33
6. CARACTERISTICAS DE LOS YACIMIENTOS DE GAC	38
7. METODOLOGIA	49
8. RESULTADOS	68
8.1. NOMENCLATURA ESTRATIGRAFICA	68
8.2. CORTE GEOLOGICO BALANCEADO	70
8.3. ANALISIS DE CARBONES	71
8.4. MODELAMIENTO GEOQUIMICO	91

9. DISCUSION DE RESULTADOS	102
10. CONCLUSIONES	113
REFERENCIAS CITADAS	114
ANEXOS	118

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. Diferentes nomenclaturas de las unidades litoestratigráficas del Cretácico Superior.	20
TABLA 2. Diferentes nomenclaturas equivalentes a unidades litoestratigráficas del Cenozoico.	21
TABLA 3. Corresponde a datos preestablecidos, K corresponde a la conductividad térmica, ρ_c corresponde a la densidad.	66
TABLA 4. Resultados de correlación estratigráfica para el área del Triunfo	68
TABLA 5. Resultados de correlación estratigráfica para el área de Montecristo	69
TABLA 6. Resultados de correlación estratigráfica para el área de lenguazaque	69
TABLA 7. Resultados de proximales sección Triunfo.	71
TABLA 8. Resultado de proximales sección Montecristo	71
TABLA 9. Resultado de proximales sección Lenguazaque	72
TABLA 10. Contenidos de Azufre y TOC para el área de Montecristo	72
TABLA 11. Resultados de Ro Para la sección de Montecristo	74
TABLA 12. Resultados de Ro para la sección del Triunfo	74
TABLA 13. Resultados de Ro para la sección del Triunfo	74
TABLA 14. Variación de Ro con profundidad para la sección del Triunfo	75
TABLA 15. Variación de Ro con respecto a la profundidad para la sección Montecristo	76

TABLA 16. Variación de Ro con respecto a la profundidad para la sección Lenguazaque	77
TABLA 17. Datos de presión y temperatura para canisters	78
TABLA 18 Datos de los canisters para la sección Triunfo	78
TABLA 19. Datos de los canisters para la sección de Montecristo.	78
TABLA 20. Datos de los canisters para el área de Lenguazaque.	79
TABLA 21. Volúmenes totales registrados por las muestras de carbón sometidas a degasificación.	79
TABLA 22. Contenido de gases para la sección de Triunfo, el contenido esta en ppm.	81
TABLA 23. Contenido de gases para la sección de Montecristo, el contenido de gases se encuentra en ppm	81
TABLA 24. Contenido de gases para la sección de Lenguazaque, el contenido de gases se encuentra en ppm	81
TABLA 25. Variación de %Ro y % de materia volátil con relación a la profundidad en el área del Triunfo.	82
TABLA 26. Variación de gases C1- C5 en profundidad en la sección del Triunfo	83
TABLA 27. Variación de % Ro y % de Materia volátil con relación a la profundidad de los mantos en la sección de Montecristo.	84
TABLA 28. Variación de gases C1- C5 en profundidad en la sección de Montecristo.	85
TABLA 29. Variación de % Ro y % de materia volátil con relación a la profundidad de los mantos en la sección de Lenguazaque.	86
TABLA 30. Variación de gases C1- C5 en profundidad en la sección de Lenguazaque.	87
TABLA 31. Parámetros de análisis de adsorción manto 1 Sección Triunfo	89
TABLA 32. Parámetros de análisis de adsorción manto 12 Sección Triunfo	89

TABLA 33. Parámetros de análisis de adsorción manto 19 Sección Triunfo	90
TABLA 34. Datos usados para el diagrama de soterramiento decompactado y para el modelamiento total para el centro del sinclinal.	92
TABLA 35. Parámetros de porosidad y permeabilidad para las Formaciones. De la cuenca de Bogota.	92
TABLA 36. Datos usados para el diagrama de soterramiento decompactado y para el modelamiento total para el centro del sinclinal.	97

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. Mapa de localización geográfica del área de trabajo.	7
FIGURA 2. Mapa geológico del sinclinal Checua – Lenguazaque.	9
FIGURA 3. Evolución tectónica sugerida para la Cordillera Oriental desde el Mesozoico.	15
FIGURA 4. Correlación Estratigráfica de los mantos de carbón presentes en las secciones de Lenguazaque, El Triunfo y Montecristo	37
FIGURA 5. Producción de agua y metano en un yacimiento de GAC	40
FIGURA 6. Cantidades de gas generado durante la carbonificación.	42
FIGURA 7. Estimación de la cantidad de gases generados en cada una de las fases de maduración del carbón.	43
FIGURA 8. A. Diagrama Van Krevelen el cual muestra la composición química en los diferentes tipos de kerogeno (I, II, III y IV) e Ilustración de la cantidad y tiempo de los productos generados en el proceso de carbonificación.	44
FIGURA 9. Matriz de Carbón que incluye cantidades de agua y gas	47
FIGURA 10. Mapa geológico de la zona, con las tres áreas de estudio.	51
FIGURA 11. Proceso de carga de la muestra en los canisters.	61
FIGURA 12. Acople de los sensores a los canister.	62

FIGURA 13. Variación de la porosidad en función de la profundidad, tabla de valores estándar para porosidades iniciales de cada litología	65
FIGURA 14. Volumen de gas emitido Vs espesor acumulado para la sección de Montecristo	80
FIGURA 15. Volumen de gas emitido Vs espesor acumulado para la sección del Triunfo	80
FIGURA 16. Curva de adsorción isotérmica para el manto 1.	88
FIGURA 17. Curva de adsorción isotérmica para el manto 12 en la sección del Triunfo	89
FIGURA 18. Curva de adsorción isotérmica para el manto 19, sección el Triunfo	90
FIGURA 19. Diagrama de Soterramiento decompactado para el centro del Sinclinal de Checua Lenguazaque	93
FIGURA 20. A. Variabilidad de la conductividad térmica por edades para cada formación en relación con la profundidad. B. variabilidad de la temperatura para cada Formación, teniendo en cuenta la edad y la profundidad.	94
FIGURA 21. Diagrama de Tiempo vs Temperatura para el centro del Sinclinal	94
FIGURA 22. Madurez en %Ro en relación con la profundidad y edad de las formaciones del centro del Sinclinal Checua Lenguazaque	95
FIGURA 23. Rangos de madurez alcanzados por las Formaciones en el centro del sinclinal Checua Lenguazaque.	96
FIGURA 24. Diagrama de Soterramiento decompactado para el flanco del Sinclinal de Checua Lenguazaque	98
FIGURA 25 A. Variabilidad de la conductividad térmica por edades para cada formación en relación con la profundidad. B. variabilidad de la temperatura para cada Formación, teniendo en cuenta la edad y la profundidad	98

FIGURA 26. Diagrama de Tiempo vs Temperatura para el flanco del Sinclinal	99
FIGURA 27. Madurez en %Ro en relación con la profundidad y edad de las formaciones del flanco del Sinclinal Checua Lenguazaque	100
FIGURA 28. Rangos de madurez alcanzados por las Formaciones en el centro del sinclinal Checua Lenguazaque.	101

LISTA DE FOTOGRAFIAS

	Pág.
FOTO 1. Superficie expuesta del carbón, sobre esta se realiza el muestreo de canal, corresponde al manto 12 en la sección de Montecristo	41
FOTO 2. Adición de agua en el proceso de muestreo de carbones para degasificación.	43
FOTO 3. Resultado de prueba para determinar contenido de cenizas	46

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Columnas estratigráficas

ANEXO 2. Mapa geológico

ANEXO 3. Corte geológico

ANEXO 4. Estadísticas de reflectancia de vitrinita

ANEXO 5. Degasificación de mantos

ANEXO 6. Fotomicrografías

TITULO: GEOQUIMICA DE LOS YACIMIENTOS DE GAS ASOCIADO A CARBON EN LA CUENCA DE BOGOTA*

AUTOR(ES): Cortés P. Yeny, Jiménez J. Miguel **

PALABRAS CLAVES: Metano, Carbón, Estratigrafía, Hidrocarburos, Maduración, Formación Guaduas

DESCRIPCION:

La cuenca de Bogotá presenta un excelente potencial de Gas Asociado a Carbón (GAC). El presente trabajo reporta los resultados del estudio de las características geoquímicas de los gases asociados a mantos de carbón de la Formación Guaduas. Los resultados indican que la composición geoquímica de los gases de GAC, presentan un control estratigráfico en donde la concentración de los gases metano a butano (C1 a C4) aumenta hacia la base de la secuencia estratigráfica de la Formación Guaduas, mientras que la tendencia del n-pentano (C5) aumenta de base a techo.

De otra parte, el contenido de los gases de GAC esta dominado por el metano seguido del pentano, los gases C2 a C4 se encuentran en menor proporción que el n-pentano. Las relativas altas concentraciones de n-pentano son indicativas del potencial de generación de hidrocarburos condensados a partir de mantos de carbón de la Formación Guaduas

La madurez termal de la Formación Guaduas aumenta hacia la base tanto en centro como en los flancos del Sinclinal Checua – Lenguaque, como lo indican los datos de Ro medidos en muestras y los resultados del modelamiento geoquímico.

La relación directa entre el aumento de la reflectancia de la vitrinita, el contenido de gases y la posición estratigráfica indican que el proceso de generación de hidrocarburos tuvo lugar antes de la orogenia andina. —

—*Tesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología, Mario García González, Ph. D., Profesor titular de Geología

TITLE: GEOCHEMISTRY OF COALBED-METHANE RESERVOIRS IN THE BOGOTA BASIN*

AUTHOR(S): Cortes P. Yeny, Jimenez J. Miguel **

Key words: Methane, Coal, stratigraphy, hydrocarbons, maturation, Guaduas Formation.

DESCRIPTION:

The Bogotá basin presents excellent coal bed methane potential; the present study reports the geochemical characteristics of the coal gases. Results indicate a relationship between the gas composition and the stratigraphy of the coal seams, where the gas composition shows a progressive increasing trend from top to base of the Guaduas formation. On the other hand the n-pentane shows a trend that increase upward of the formation.

The gas composition is dominated by Methane followed by n-pentane, the C₂ –C₄ gases are in a lower proportion than the other gases... The relative high concentration of n-pentane is indicative of the high condensate generation potential of the Guaduas coal seams.

Ro measurement and geochemical modeling results indicate a thermal maturation trend increasing from top to base; this trend is observed both at the center and flanks of the Checua-lenguazaque syncline.

The relationship among vitrinite reflectance, gas content and stratigraphic position indicate that the main gas generation pulse took place before the Miocene Pliocene Andean orogeny. —

—*Thesis

** Faculty of engineering's Physicochemistrys, Escuela de Geología, Mario García González, Ph. D., Geology's Titular professor

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante los últimos 10 años la producción de Gas asociado a mantos de carbón (GAC) se ha incrementado rápidamente en diferentes partes del mundo, es así como las reservas de gas no convencional han adquirido gran importancia en el sector hidrocarburífero global.

En Países como Colombia, este tipo de recursos se ha estudiado en las cuencas del Cesar-Ranchería y en la Sabana de Bogotá.

Estudios adelantados previamente en diferentes cuencas colombianas han arrojado resultados interesantes, como por ejemplo, el realizado por García-González (2001) en la cuenca de Bogotá, el cuál muestra un elevado potencial de yacimientos de GAC, equivalente a 6 TCF.

El sinclinal Checua-Lenguazaque corresponde a la estructura con mayor potencial de GAC con 1.25 TCF. Este potencial fue evaluado teniendo en cuenta la madurez termal de la cuenca y de los carbones, las reservas de carbón, el contenido de gas medido mediante pruebas de degasificación y los resultados del modelamiento geoquímico de dichos yacimientos.

A pesar de los resultados satisfactorios obtenidos anteriormente, se hace necesario reevaluar ciertos aspectos de vital importancia en el estudio de yacimientos de GAC del sinclinal Checua-Lenguazaque; de esta forma surgen interrogantes como: 1. Origen de gases (Termogénico y/o bacteriogénico), 2. Relación entre la posición estratigráfica de los mantos de carbón y su contenido y

composición de gases, 3. Implicaciones estructurales que afectan el contenido y/o composición de los gases en áreas geográficamente separadas, pero estratigráficamente correlacionables a lo largo del sinclinal, y 4. Potencial de generación de gas y su relación con respecto a la posición estratigráfica y ambiente de depósito de cada uno de los mantos.

El tratamiento de estos parámetros permitirá precisar las principales características de los gases de los yacimientos de GAC en la cuenca de la Sabana de Bogotá, para de esta forma disminuir el riesgo de exploración a las compañías que inicien la búsqueda de yacimientos de gas en el sinclinal Checua-Lenguazaque.

La implementación de nuevas tecnologías del gas, tales como el gas natural vehicular y la licuefacción del gas metano, pronostica un aumento considerable en el consumo de gas, lo cual otorga mayor importancia a los recursos energéticos no convencionales, como por ejemplo, los yacimientos de GAC.

INTRODUCCIÓN

En la región de Ubaté en la cuenca de la Sabana de Bogotá se encuentran uno de los principales distritos mineros de carbón del país con carbones coquizables, esta región también se caracteriza por la presencia de gas grisú o gas metano en las minas subterráneas de carbón. El reporte continuo de explosiones en las minas del área del sinclinal Checua-Lenguazaque indica que esta región presenta un elevado contenido de metano en relación con otros distritos mineros del país

Existen tres tipos de gases tóxicos en las minas de carbón: 1) gas grisú consistente en metano y otros gases de hidrocarburos, 2) gases asfixiantes consistentes en dióxido de carbono y monóxido de carbono y 3) gases irritantes consistentes en gases de azufre como H_2S , HS , H_2SO_4 .

Los estudios anteriores realizados abarcan tres aspectos que son: 1) El potencial de generación de gas por parte de los mantos de carbón (Valenzuela 2002), y 2) El volumen de gas asociado a carbón en la región antes mencionada, (Diez y Páez, 2000) y 3) la historia de generación de gas durante el proceso de maduración termal (Diez y Páez, 2000).

El propósito de este estudio fue el de investigar la relación existente entre las características geoquímicas de los gases asociados a mantos de carbón y la posición estratigráfica de los mismos; también se investigó la relación entre la geoquímica de los gases y el rango de maduración termal de los diferentes mantos de carbón.

Adicional a lo anterior se adelantó un modelamiento geoquímico (en una dimensión) en dos pozos virtuales localizados en el eje y el flanco del sinclinal Checua-Lenguazaque con el fin de explicar la generación de gas partir de mantos de carbón en relación a el tiempo geológico y la profundidad de los mantos de carbón.

Los resultados de esta investigación buscan reducir el riesgo de la exploración de gas en la sabana de Bogotá.

1. OBJETIVOS

El objetivo central del presente proyecto consiste en investigar la relación entre el potencial de generación de gases asociados a mantos de carbón, la composición de los gases y la posición estratigráfica de los diferentes mantos.

- Adelantar el muestreo de carbones provenientes de minas subterráneas, para someterlos al proceso de degasificación.
- Realizar análisis proximales, reflectancia de vitrinita (R_o), carbono orgánico total (TOC) y azufre (S) a los carbones de la formación Guaduas.
- Realizar la cromatografía de gases para determinar la composición química de los gases recuperados durante las pruebas de degasificación.
- Realizar ensayos de adsorción isotérmica de los carbones de la formación Guaduas, para conseguir resultados que permitan obtener la capacidad de retención de gas de los carbones a diferentes rangos.
- Realizar el modelamiento geoquímico 1D, empleando el método cinético de Tissot y Welte (1984), con el fin de delimitar el tope de la ventana de generación de gas termogénico en la estructura del sinclinal Checua-Lenguazaque.

2. ANTECEDENTES

Diversos estudios geológicos y mineros se han realizado en esta zona dada la presencia de cantidades económicamente explotables de carbones bituminosos de alto rango.

Bueno, L.; Moreno M. (2005), Estratigrafía, petrografía y geoquímica de la ocurrencia de carbones coquizables del a Formación Guaduas en la cuenca de Bogota

Valenzuela (2002), El potencial de generación de gas y petróleo de los carbones, Colombia.

García González (2001), Gas asociado a mantos de carbón en el altiplano cundiboyacense. Informe final proyecto de investigación 1102-06539-97

Diez y Páez (1999), Gas asociado a mantos de carbón de la Formación Guaduas en el sinclinal Checua – Lenguazaque. Colombia.

Rueda y Velez (1999), Patrones de fracturamiento en la Formación Guaduas, sinclinal Checua – Lenguazaque y su relación con los yacimientos de gas asociado a mantos de carbón.

Sarmiento (1992), Estratigrafía y medios de depósito de la Formación Guaduas. Bol. Geológico. Vol. 32, No 1. Ingeominas. Bogotá.

Perez et al. (1987), Caracterización de carbones Colombianos zona Checua – Lenguazaque. Bol. Geológico No 2. Vol. 28, Ingeominas, Bogotá.

Reino y Rojas (1981), petrografía de carbones de la parte septentrional de la cuenca Checua – Lenguazaque, trabajo final. Universidad Nacional, departamento de geociencias. Bogotá.

Laverde (1979), divide la Formación Guaduas en ocho nuevos conjuntos litológicos.

Empresa Nacional ADARD de investigación minera (1978), estudio de prefactibilidad para la explotación de carbones coquizables en los bloques I y II, borde occidental del sinclinal de Checua – Lenguazaque.

Herrera y Mateus (1977), realizaron un censo minero en el sinclinal Checua – Lenguazaque.

Blanco, Romero y Uribe (1977), Clasificación internacional de los carbones de Checua – Lenguazaque. Inf. 1726 Ingeominas Bogotá.

Nigrinis (1975), establece una nueva división de la Formación. Guaduas que facilita la definición de niveles productivos y no productivos.

De Porta (1974), Confirmó Las dataciones del estudio palinológico realizado por Van Der Hammen en 1957 con base en las presencia de fósiles.

MacLaughlin, D., Arce (1969), Realiza el Mapa Geológico del cuadrángulo K-11, Escala 1:100.000. Ingeominas Bogotá

Radelli (1967), Sugiere para la Formación Guaduas la categoría de grupo.

Molina (1963), realizó el primer estudio económico del área, llevando a cabo un análisis de los carbones de la Sabana de Bogotá.

Van Der Hammen (1957), Realizó el primer estudio palinológico de la Formación Guaduas y le asignó edad Maestrichtiano a Paleoceno.

Sheibe (1933), designa Guaduas como la sucesión de sedimentos que contiene mantos de carbón en la Sabana de Bogotá.

Hubach (1931), define inicialmente la Formación Guaduas como una secuencia sedimentaria infrayacida por Grupo Guadalupe y suprayacidas por las Areniscas Del Cacho.

El primero en publicar un estudio detallado del área fue Hettner (1892) quien reconoció el piso Guaduas como una sucesión arcillosa con carbones.

3. LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra localizada en el departamento de Cundinamarca, al Noreste de la ciudad de Bogotá, aproximadamente a 80 Km de esta, comprendiendo los municipios de Ubaté, Tausa, Sutatausa, Cucunubá y Lenguazaque, referenciados en las planchas IGAC del año 2002: 209-II-A-1, 209-II-A-3, 209-I-B-4, 209-I-D-2, 209-II-C-1,

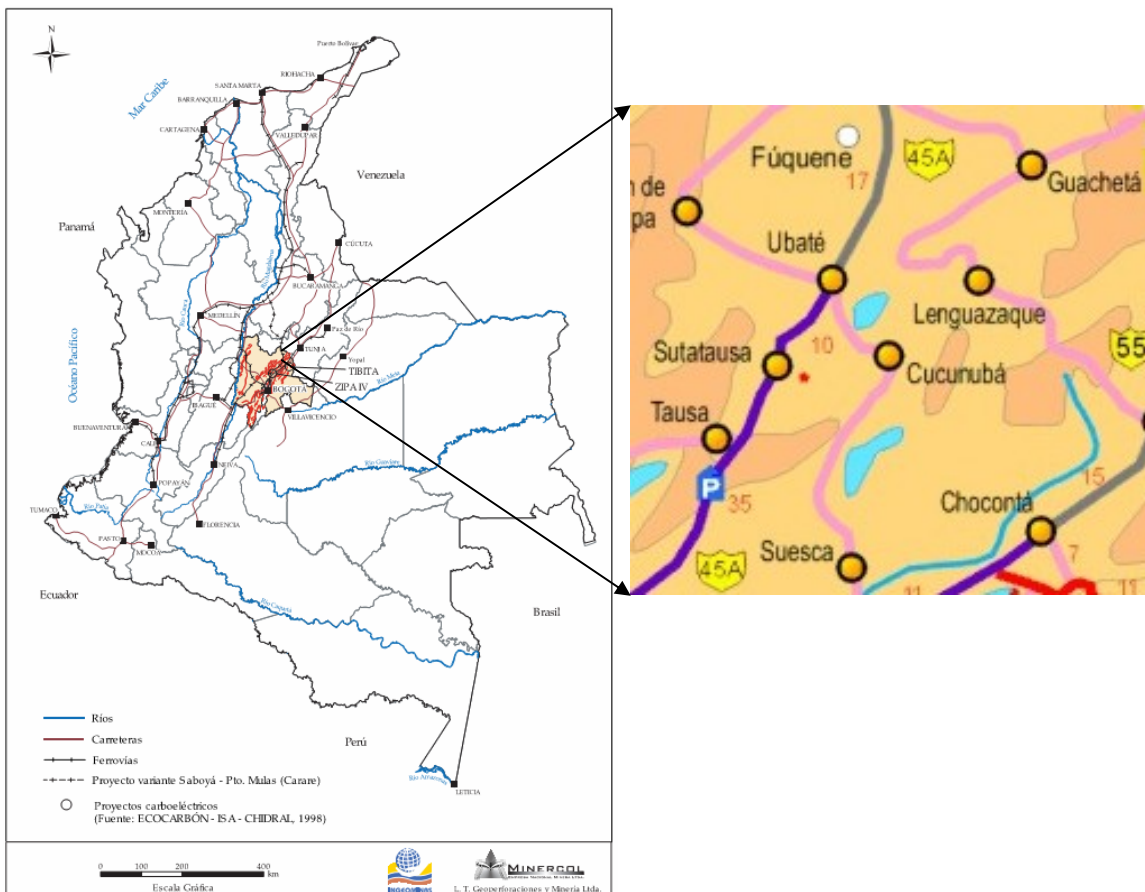


FIGURA 1. Mapa de localización geográfica del área de trabajo. (Tomado de Acosta y Ulloa, 2003)

La principal vía de acceso es la carretera pavimentada que comunica a Ubaté con Bogotá y así mismo comunica a Ubaté con Chiquinquirá, A partir de estas es posible tomar vías alternas que conducen a las distintas zonas mineras tales como la vía Ubaté – Cucunubá, carreteras en menor estado de conservación llevan a algunos distritos mineros, las principales vías son aquellas que comunican Cucunubá, Tausa y Sutatausa.

Geológicamente el área se enmarca dentro del flanco noroccidental del sinclinal Checua – Lenguazaque, el cual corresponde a una estructura asimétrica de rumbo Noreste – Suroeste, dirección predominante en todas las estructuras que comprenden la zona. A nivel de superficie el sinclinal presenta las formaciones Chipáque, Arenisca Dura, Plaeners, Arenisca de Labor y Tierna, Guaduas, Cacho y Bogotá. Los mantos de carbón se encuentran en la sección estratigráfica de la formación Guaduas, siendo la de mayor importancia para el desarrollo de la investigación.

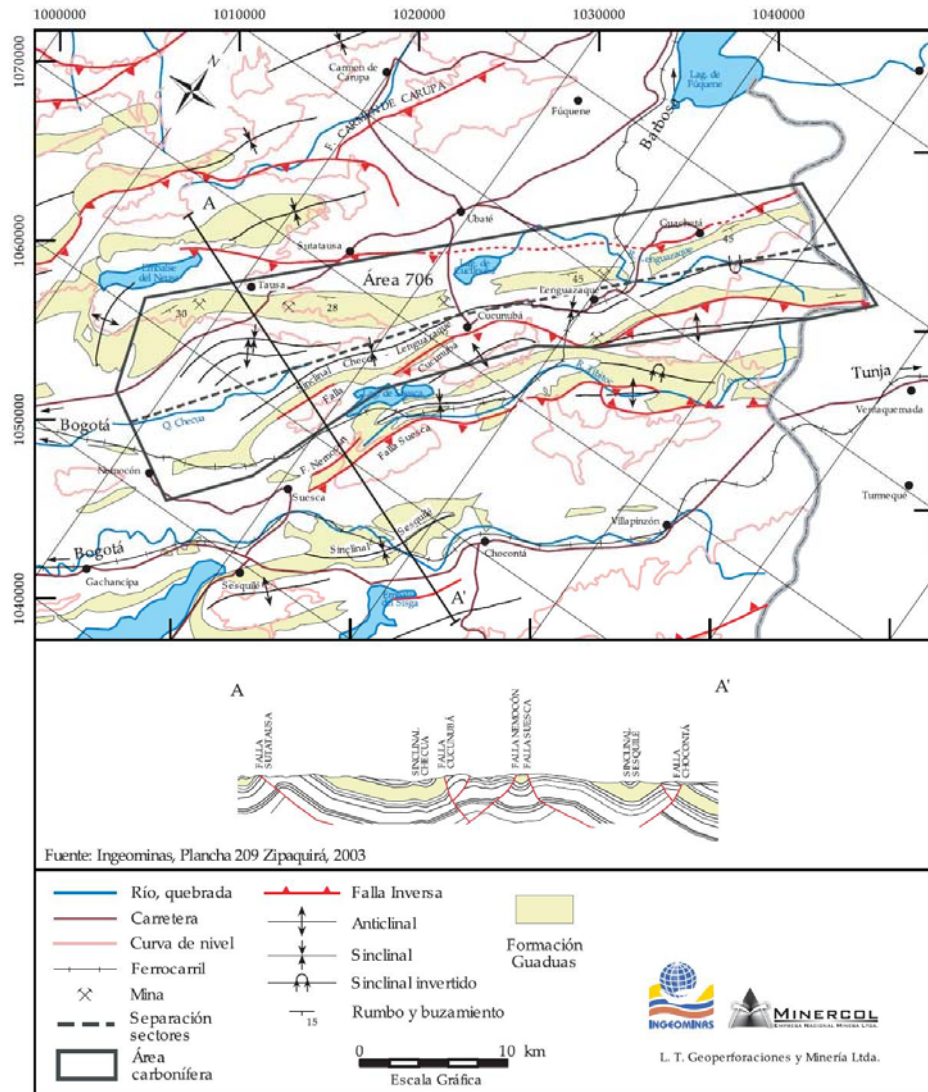


FIGURA 2. Mapa geológico del sinclinal Checua – Lenguazaque. (Tomado de El carbón Colombiano, recursos, reservas y calidad, INGEOMINAS, 2004)

4. MARCO GEOLÓGICO Y ESTRATIGRAFICO

4.1. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El área de estudio se encuentra dentro de la parte central de la porción Norte de la cordillera Oriental, limitada al Oeste con la cuenca del Valle Medio Del Magdalena y al Este con la cuenca de los Llanos Orientales, las cuales fueron formadas en respuesta a márgenes tectónicos convergentes durante el Cretácico Tardío y Cenozoico. Esta región presenta grandes controles tectónicos sobre la acomodación de las cuencas sedimentarias, asociado a grandes orogenias.

La apertura del acortamiento de la litosfera, episodio de formación del rift y fallamiento, depositó durante el Jurásico y Cretácico temprano más de 5 km de sedimentos acumulados en la cuenca de Bogotá. (Etayo-Serna et al., 1983).

El basamento está constituido de plutones calco-alcalinios de edad Mesozoico y Cenozoico que intruyeron antiguos complejos metamórficos de la cordillera Oriental (Etayo-Serna et al., 1983) como resultado del acortamiento de la litosfera durante el Mesozoico.

Principales sub-cuencas tipo rift persistieron durante el Cretácico, como es el ejemplo de la cuenca de la sabana de Bogotá, la cual se encuentra localizada hoy entre Bogotá y el anticlinorio de Villeta. (Sarmiento, 1989). En este mismo periodo se dio extensión que generó intrusiones basálticas por adelgazamiento de la corteza, por ende se inició una rápida subsidencia termal.

A nivel general se tiene que la sedimentación en la cuenca se dio durante el periodo que abarca el Cretácico Superior al Paleógeno, durante este tiempo se registró tres secuencias principales:

Primera secuencia: Durante el Cretácico Superior al Paleoceno inferior se depositaron sedimentos correspondientes al Grupo Guadalupe y a la Formación Guaduas, los cuales corresponden a sedimentos superficiales que registraron retiro del mar en esta región (Fabre, 1983 b; Sarmiento, 1994).

Segunda Secuencia: Esta se deposita en forma discordante sobre la anterior, consiste en depósitos de sedimentos de edad Paleógeno Superior a Eoceno Inferior; en la parte basal de esta secuencia se presentan arenas fluviales (Cuervo & Ramirez, 1985; Acosta & Beltrán, 1987), aquí se establecieron condiciones no marinas en el área de la sabana De Bogotá, pero la influencia marina incrementa cerca del Norte. (Gómez E. et al., 2005), régimen en el cual se depositó la Formación Bogotá.

Tercera Secuencia: Se deposita discordante sobre la anterior secuencia, esta secuencia se da durante el Eoceno medio a Oligoceno, se depositan arenas fluviales de la Formación Regadera, son depósitos transicionales hacia el tope con foraminíferos y hierro oolítico de las Formaciones Usme y Concentración, Las cuales registraron renovada influencia marina.

En el Cretácico Tardío – Terciario, la exhumación de la Cordillera estuvo vinculada a la evolución del margen Oeste activo de Sur América. Debido la oblicua acreción durante el Cretácico Tardío de la Cordillera Occidental, se generó hacia el Oeste propagación del levantamiento de la Cordillera Central (Cambpbell, 1968; Etayo-Serna et al.,1983). Deformación compresional e inversión tectónica de grabens Mesozoicos en la Cordillera Oriental fueron iniciados y continuados a través del Cenozoico (Julivert, 1963; Gomez, 2001).

4.2. EVOLUCIÓN TECTÓNICA

La historia de la cuenca esta estrechamente relacionada con la evolución de los Andes Colombianos, enfatizando este estudio en la Cordillera Oriental, las deformaciones de esta zona son el resultado de una compleja interacción entre las placas Nazca y Caribe con la placa de Sur América. El esquema evolutivo definido por Toro J. et al. (2002) se divide en cinco megaperiodos que resumen de buena forma los eventos principales.

1. Estado Extensional

Durante el Mesozoico y Paleógeno se da un debilitamiento de la litosfera resultado del estiramiento del área en la que actualmente se encuentra la Cordillera Oriental. (Etayo-Serna et al., 1983).

Este estiramiento se dio durante el Triásico-Jurásico mediante esfuerzos Tensional/Transtensional probablemente relacionado al rompimiento de la Pangea y a la extensión del backarc lo cual produjo acortamiento de la litosfera y generó rift cercanos, repetidos eventos produjeron esta reducción. Esta deformación extensional se concentró al Este en un sistema de arcos continentales causado por la subducción de la litosfera Pacífica sobre el margen Occidental de Sur América, debido a esto se generaron en el Cretácico Temprano un sistema de cuencas asimétricas tipo rift, lo cual incrementó el flujo de calor en el área.

A su vez en este estado para el Cretácico Temprano se inicia una rápida subsidencia en la cuenca.

2. Estado De Subsidencia Termal

Una vez la actividad del rifting finaliza, la rata de la subsidencia iniciada en el estado anterior disminuye en la cuenca de Bogotá desde el Albiano hasta el

Paleoceno haciendo que las isothermas del manto disminuyan y de esta manera la litosfera retorna a su equilibrio termal. (Fabre, 1987)

Durante el Turoniano la cuenca alcanzó su máxima extensión. Durante este periodo varias rocas reservorio de Sur América fueron depositadas como shales marinos anoxicos de la Formación Chipaque (Ambientes cretácicos deltaícos, prevalecen durante este periodo facies continentales)

3. Primer Estado Compresional

Este estado compresional/Transpresional se da durante el Paleógeno, relacionado con la colisión de Suramérica con Placa Oceánica. Hay evidencia de deformación compresional concentrada en la cordillera Central, pero este estado es posible extrapolarlo a la formación de la Cordillera Oriental, teniendo en cuenta estudios de Guillande, (1988); Sarmiento, (1989) y Cheilletz, (1994), los cuales realizan datación de Ar/Ar en sistemas de venas de esmeraldas sugiriendo que este acortamiento afectó de igual forma la cuenca de Bogotá.

4. Estado Pre-Andino (Cuenca Foreland)

Durante el Cretácico Tardío-Terciario Temprano la placa Caribe empezó a moverse desde el Este de Sur América (Burke et al., 1984) y fue eventualmente subducida a lo largo del margen Norte de Colombia (Penninton, 1981; Tabeada et al., 2000). Adicionalmente un terreno oceánico fue acrecionado al margen continental dando lugar a la cordillera Occidental de Colombia (Mc Court et al., 1984), como resultado de la interacción de estos límites de placa se da deformación transpresional y compresional y el inicio de la inversión de la cuenca de Bogotá.

Durante este estado algunas estructuras generadas en los estados anteriores relevaban su desarrollo como resultado de la inversión de fallas normales en el Mesozoico (Sarmiento, 2002).

5. Estado De Deformación Andina

En este estado se dio el mayor acortamiento y formación de altos topográficos que hoy en día se ven representados en la Cordillera Oriental, los cuales empezaron durante el Mioceno Tardío como respuesta de la acreción del arco de Panamá-Baudó con el margen Oeste de Colombia (Duque, 1990; Kellog & Vega, 1995; Tabeada et al., 2000).

La delgada corteza de la cuenca de Bogotá fue una zona de debilidad en la placa de Sur América, en el cretácico inferior la cuenca fue invertida por reactivación de antiguas fallas normales.(Cottella et al., 1990; Cooper et al., 1995).

El pulso más intenso de levantamiento empezó hace 12.9 Ma. (Dengo & Covey, 1993)

Fabre (1983 a, b) registró intenso plegamiento durante el Mioceno y el mayor levantamiento durante el Plioceno y Cuaternario

En general en este estado se dio la mayor inversión de la cuenca, el mayor levantamiento de la Cordillera Oriental y el mayor acortamiento. Los depósitos que resultaron de este levantamiento rellenaron la cuenca de los Llanos.

La figura 3 ilustra la evolución de la cordillera Oriental desde el Mesozoico.

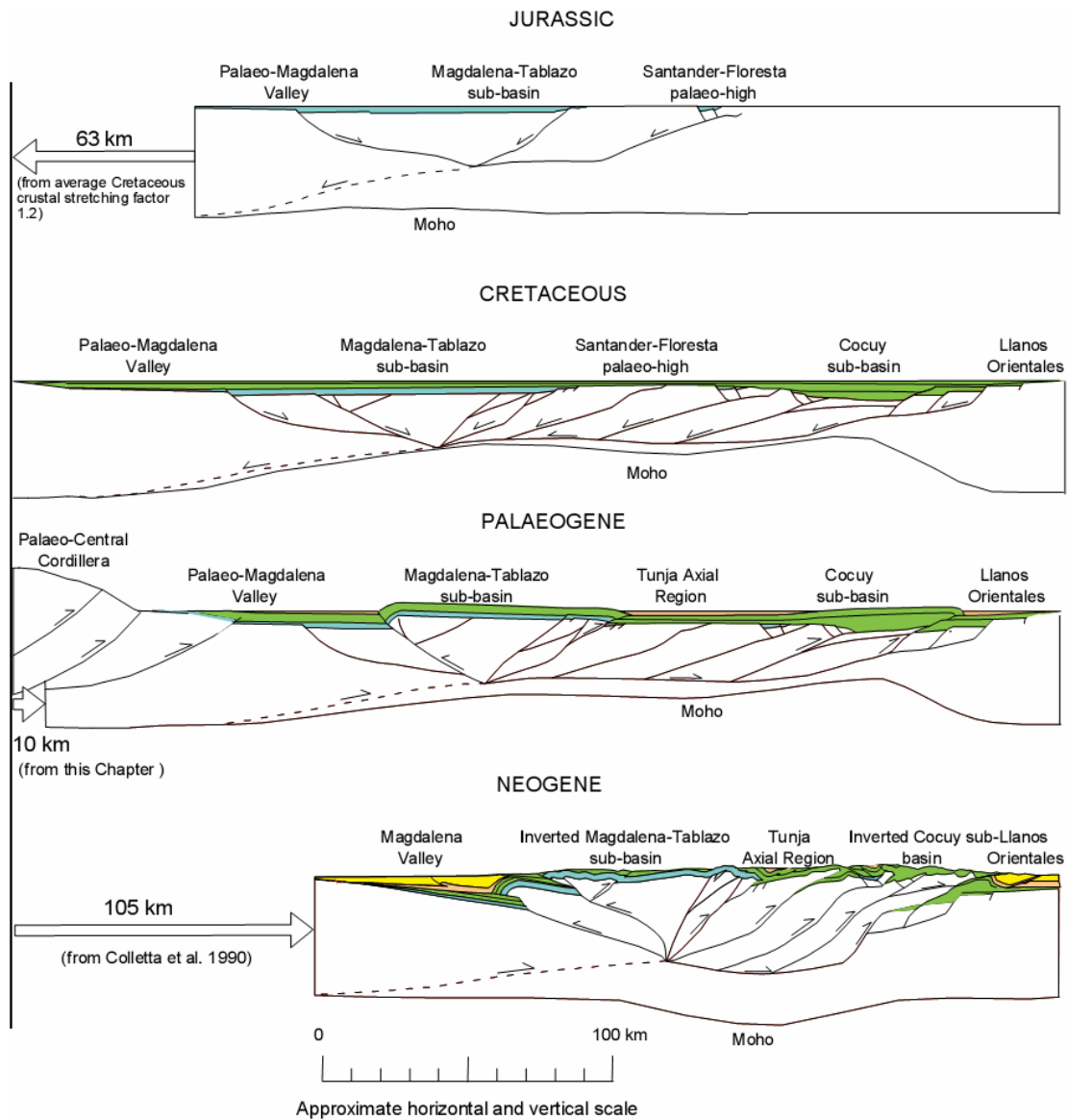


FIGURA 3. Evolución tectónica sugerida para la Cordillera Oriental desde el Mesozoico. Los modelos flexurales indican una inversión de la cuenca en el Mesozoico y generación de topografía locales el Cretácico, el acortamiento del Paleógeno y Neógeno se estimó teniendo en cuenta modelos cinemáticos. (Tomado de Colletta et al., 1990)

4.3. GEOLOGIA ESTRUCTURAL

La cuenca de Bogotá fue controlada por fallas normales mediante esfuerzos tensionales/transtensionales durante el Jurásico Temprano asociadas a la falla de Boyacá, como resultado del proceso de estas fallas se dio lugar a una cuenca tipo rift rellanada continuamente con alternancia de depósitos marinos y continentales, el material depositado durante el Jurásico y Cretácico temprano presenta grandes espesores, evidenciando el anterior proceso.

La deformación terciaria que da lugar a la inversión de grabens genera pliegues amplios dentro de una estructura formada por inclinaciones invertidas de alto ángulo que involucran basamento, con buzamientos Noroeste y Sureste respecto a los sistemas de fallas normales de Soapagá y La Salina. La vergencia bipolar Noroeste – Suroeste se da como efecto de barrera a ambos lados del Graben (Fajardo, 1998).

La formación tanto del bloque yacente de la falla de Soapagá como del bloque colgante de fallas normales con buzamientos Noroeste suprayacieron el sistema de fallas de cabalgamiento de Guaicaramo (Fajardo, 1998).

En la sabana son comunes los pliegues Fold Bend Fold, no obstante, el sinclinal Checua Lenguaque presenta una estructura de despegue (Detachment), debido a la presencia de sal y capas gruesas de shales. (Fajardo, 1998).

En general la Cordillera Oriental incrementa su espesor de Sur a Norte. Las estructuras tienen tendencias NNW, de igual forma presenta fracturas en dirección NW, las cuales fueron formadas durante el Mioceno Medio en la Orogenia intra Terciaria.

Los rasgos estructurales que conforman la sabana de Bogotá se caracterizan por tener anticlinales estrechos y simétricos separados por sinclinales amplios asimétricos en forma de cubeta, esta asimetría se acentúa más de N a S.

Los fallamientos dominan la cuenca, en donde se observan sus labios W hundidos, los cuales están bien individualizados y se presentan hacia el Sur como accidentes tectónicos no asociados a pliegues, aunque hacia el Norte las estructuras pueden evolucionar y las fallas encontrarse en relación con flancos de pliegues. Así mismo, también hay presencia de inversiones las cuales son mas frecuentes en los flancos W de los anticlinales, a estas inversiones se les ha dado diferentes orígenes, siendo la gravedad la más característica. (Julivert 1962).

Comúnmente en la Sabana de Bogotá no es posible definir contacto entre Guadalupe y Guaduas debido a las inversiones de los flancos.

La mayoría de los pliegues evidencian, a partir de la asimetría, vergencia hacia los bordes de la Cordillera Oriental. La cuenca se caracteriza por presentar cabalgamientos con rumbo NNE-SSW, cabalgamientos menores de vergencia oriental, fallas de transferencia de rumbo WE.

Como principales estructuras se tienen:

El Sinclinal de Checua-Lenguazaque, de rumbo N35°E, el cual fue generado durante la orogenia intraterciaria que causó el levantamiento y plegamiento de la Cordillera Oriental en la región Andina. Este sinclinal presenta su flanco oriental mas inclinado que el occidental, en el sector de Montecristo se presentan buzamientos que varían de 10 a 35 °, en el área del Triunfo se tienen buzamientos de 17 a 25° y en el área de Lenguazaque se tienen altos buzamientos los cuales son mayores de 50°, alcanzando los 65 grados. Los buzamientos de los estratos del flanco oriental son más fuertes llegando hasta 85°, siendo frecuentes las inversiones por gravedad.

El área comprendida entre los dos flancos no es constante, presentando variabilidad a lo largo de todo el sinclinal, llegando a tener 3.5 Km en el sector de Cucunubá, mientras que al sur de Tausa llega a tener hasta 12.0 Km. (Perez F. et al., 1987)

Sinclinal Suesca – Albarracín: Dirección NNE SSW, es una estructura simétrica, con charnelas amplias y planas, en el núcleo afloran rocas de la formación Cacho y Guaduas.

Anticlinal De Suesca: Estructura asimétrica, con cabeceo en sus dos extremos. El flanco oriental presenta un rumbo constante, excepto en la parte sur en donde se presentan cambios en el rumbo.

Falla De Chocontá: Falla de tipo inverso con vergencia oriental.

Falla De Teatinos: Falla inversa con vergencia Oriental, hace parte de una ramificación de la falla de Chocontá, esta falla afecta de Norte a Sur al sinclinal de Checua – Lenguazaque, lo que da como resultado inversiones en el flanco oriental.

Anticlinal De Nemocon: Estructura asimétrica, con buzamientos que varían de moderados a altos, presenta inversiones en el sector Sur de su flanco Oriental. Este anticlinal se encuentra afectado por una falla antitética a la falla de Gachaneca. La dirección es N50E (Godoy y Rocha, 1993). Esta estructura se comporta como un pliegue que cabalga hacia el Este por efecto de la falla Teatinos que afecta a la estructura y da como resultado a un sinclinal muy apretado.

Se presentan frecuentes inversiones en su núcleo, hacia el Norte este anticlinal alcanza los 10 Km.

Anticlinal De Tausa: Estructura simétrica que presenta inversiones en algunos sectores, presenta un rumbo de 45° en dirección NE, en su núcleo presenta a la formación Chipaque y constituye una estructura de aproximadamente 60 Km.

4.4. ESTRATIGRAFIA DE LA SABANA DE BOGOTÁ

La sabana de Bogota consta de sedimentos Cretácicos y Terciarios situados por encima de los 2500 m de altitud. La secuencia inicia con el Grupo Cáqueza y finaliza con la Formación Tilatá.

A lo largo de sinclinal Checua – Lenguazaque la secuencia inicia con la Formación Chipaque y finaliza con la Formación Bogotá (Tabla 1 y 2). Debido a que el grupo Cáqueza no aflora en la Sabana de Bogotá, en los estudios previos realizados a lo largo del área no ha sido tomado en cuenta, esto explica la ausencia de información estratigráfica y geoquímica de esta unidad. Para el correcto desarrollo del presente trabajo se hizo necesario consultar la información disponible en las publicaciones realizadas sobre el cinturón esmeraldífero Oriental.

TABLA 1. Diferentes nomenclaturas de las unidades litoestratigráficas del Cretácico Superior. (Tomado de Acosta y Ulloa, 2001)

Hubach (1957)		Ujueta (1961)		Renzoni (1962 - 1968)		Julivert (1963)		Pérez y Salazar (1978)			
Fm. Guaduas		Fm. Guaduas		Fm. Guaduas		fm. Guaduas		Fm. Guaduas			
Formación de Guadalupe	Conjunto Superior	Arenisca Tierna	Grupo Guadalupe Fm. Guadalupe Superior	Arenisca Tierna	Grupo Guadalupe	Formación Labor y Tierna	Formación Guadalupe	Arenisca Tierna	Grupo Guadalupe	Formación Tierna	
		Arenisca de Labor y Plaeners		Nivel de Areniscas de Labor				Fm. Plaeners		Arenisca de Labor	Formación Arenisca de Labor
		Arenisca Dura		Nivel de Plaeners				Formación Arenisca Dura		Nivel de Plaeners	Formación Plaeners
	Conjunto Inferior	Arenisca Dura		Miembro del Raizal (Arenisca Dura)	Formación Arenisca Dura						
Formación de Villeta		Villeta		Formación Chipaque (Villeta)		Villeta		Villeta			

TABLA 2. Diferentes nomenclaturas equivalentes a unidades litoestratigráficas del Cenozoico. (Tomado de Acosta y Ulloa, 2001)

Hubach (1957)		Van Der Hammen (1957)		Julivert (1963)	
Formación de Tilata		Formación de Tilata		Formación Tilatá	
Formación de Usme		Formación de Usme	Conjunto Superior	Formación Usme	Nivel de areniscas
			Conjunto Medio		Nivel lutítico
	Arenisca de La Regadera		Conjunto Inferior Arenisca de La Regadera	Arenisca de La Regadera	
Formación Bogotá	Conjunto Superior	Formación Bogotá	Parte Superior	Formación Bogotá	zona con arenitas con estratificación cruzada
	Conjunto Medio		arenisca de Lenguazaque		
	Arenisca del Cacho (Conjunto Inferior)		Parte Inferior		
Formación de Guaduas	Conjunto Superior	Formación Guaduas	Superior	Formación Guaduas	Arenisca Lajosa
	Conjunto Medio		Medio		Arenisca La Guía
	Conjunto Inferior		Inferior		
Formación de Guadalupe		Formación de Guadalupe		Formación de Guadalupe	

Grupo Caquezá

Edad: Berriasiano- Valanginiano (142-132 Ma.).

Espesor: 3785 metros.

Este grupo presenta tres formaciones, que en orden ascendente corresponden a: Calizas del Guavio, Lutitas de Macanal y Areniscas de Las Juntas (Ulloa y Rodríguez, 1979).

Formación Calizas del Guavio, de edad

Jurásico superior – Berriasiano superior (Ulloa y Rodríguez, 1979).

Unidad descrita por Guerra (1972) y definida formalmente por Ulloa y Rodríguez (1979) para designar un conjunto de conglomerados, lutitas y calizas que afloran en el extremo suroccidental del cuadrángulo K12 (Guateque).

Está representado de base a techo por los siguientes miembros:

- *Miembro Conglomerado de Miralindo* con un espesor aproximado de 500 m (Compuesta por conglomerados de matriz arenosa, con cantos de arenitas, cuarcitas y filitas)
- *Miembro Lutitas de Miralindo*, con un espesor entre 30 y 80 metros (Compuesta por lodolitas negras), las cuales se encuentran concordante sobre el Conglomerado de Miralindo en algunos sectores, mientras que en otros se encuentra discordante sobre el grupo Farallones.
- *Miembro Caliza de Malacara* con un espesor de 320 metros (En la sección tipo tiene: 80 m de Calizas grises claras con intercalaciones de lutitas, 225 m de Lutitas negras y limolitas con lentejones de caliza y 15 m de calizas grises oscuras).
- *Miembro Lutitas de Las Mercedes* con un espesor de 250 m en su localidad tipo, (Esta conformada por: lodolitas y limolitas negras fosilíferas, con lentejones de calizas).
- *Miembro Caliza de Las Mercedes* con 120 metros de espesor (Conformado por calizas micríticas de color gris oscuro con intercalaciones de arenitas cuarzosas de grano medio y lutitas de color negro).

Formación Lutitas de Macanal:

De edad Titoniano - Berriasiano (?) - Valanginiano (Ulloa y Rodríguez, 1979), con un espesor aproximado de 2935 metros en su localidad tipo (Cañón del río Batá, entre las quebradas El Volador y La Esmeralda) (Etayo et al, 1983).

Está representada por lodolitas negras micáceas, compactas, ligeramente calcáreas, con láminas de yeso y localmente fosilíferas; en la parte intermedia contiene intercalaciones de estratos gruesos de arenitas cuarzosas de grano fino y de color gris oscuro. Según Ulloa y Rodríguez (1979), la unidad esta compuesta por cuatro miembros, que de base a techo corresponden con: 760 m de lutitas

negras, compactas; 145 m de areniscas cuarzosas, con intercalaciones de lutitas negras fosilíferas; 1350 metros de lutitas grises oscuras; y 680 metros de lutitas negras, con intercalaciones de areniscas grises claras.

Formación Areniscas de Las Juntas:

Ulloa y Rodríguez (1979), proponen este nombre para denominar dos niveles arenosos separados por un nivel lutítico, la unidad se divide en tres miembros que de base a techo corresponden a: 145 m de areniscas cuarzosas, grises amarillentas, de grano fino, con delgadas intercalaciones de lutitas negras; 295 m de lutitas con nódulos arenosos paralelos a la estratificación e intercalaciones de areniscas cuarzosas, gris clara de grano fino; y un miembro superior constituido por 100 m de areniscas cuarzosas, grises claras, grano fino, con delgadas intercalaciones de lutitas negras, 100 m de lutitas negras micáceas con delgadas intercalaciones de arenisca cuarzosa, blancas de grano fino, 100 metros de arenisca blanca cuarzosa amarillenta de grano fino, con delgadas intercalaciones de lutitas negras y 170 m de alternancia de lutitas negras y areniscas cuarzosas, grises claras de grano fino. Con un espesor aproximado de 850 metros.

Formación Fomequé

Edad: Barremiano tardío (113 Ma.).

Espesor: 1000 m.

Denominada por Hubach 1931b, 1945, 1951, 1957, caracterizada por una serie de esquistos piritosos, caliza cristalina y arenisca cuarcitita. Esta unidad esta conformada por una alternancia de lutitas negras (con yeso, pirita y otros depósitos evaporíticos que aumentan de base a tope) calizas fosilíferas, areniscas calcáreas y areniscas.

En estratos inferiores se presenta reemplazamiento de Bioesparita y Biomicrita.

Formación Une

Edad: Albiano-Cenomaniano (106.2 - 96.2 Ma.)

Espesor: 950m.

Establecida por Hubach 1957 para representar un conjunto de areniscas.

Más adelante Campbell & Bûrgl (1965), identifican un importante cuerpo de lodolitas que separa a la formación Une en dos unidades de arenas inferiores y superiores, así mismo sitúan la base de la formación en el límite Aptiano – Albiano, y el tope en el límite Albiano – Cenomaniano. Debido a la separación de los cuerpos arenosos esta unidad a nivel topográfico se caracteriza por grandes escarpes, lo cual permite su diferenciación con las formaciones Fomequé y Chipaque. A nivel general esta conformada por areniscas de grano fino a medio, presenta bioturbación y marcas de oleaje.

Formación Chipáque

Edad: Huroniano – Coniaciano – Santoniano (90- 85 Ma.)

Espesor: 1200m.

Nombre usado por Hubach (1931) para denominar la parte alta del Grupo Villeta, Renzoni 1962 redefine la formación Chipaque hasta la base de la Formación Areniscas Duras, incluyendo en ella el conjunto inferior del grupo Guadalupe.

Esta constituida por lutitas negras con intercalaciones esporádicas de calizas hacia el tope, presentan intercalaciones de areniscas cuarzosas, grises claras a oscuras, de grano fino estratificadas en bancos que varían de 1 a 3 metros de

espesor y esporádicamente carbón. En el área de Tibana – Chinavita la unidad alcanza espesores de 520 metros, mientras que en otros sitios el espesor varía y puede alcanzar los 350 metros.

Depositada bajo un régimen marino de aguas poco profundas y circulación restringida.

Grupo Guadalupe

Edad: Santoniano-Maastrichtiano Temprano (84.6- 70 Ma.).

Espesor: 900 m.

En general esta formación está constituida por cuarzoarenitas predominantes hacia la base y el tope, en la parte media se caracteriza por la presencia de liditas. A nivel geomorfológico presenta escarpes pronunciados hacia el techo y hacia la base que la diferencia de las formaciones infra y suprayacentes.

Según Pérez y Salazar (1978) está integrado por cuatro formaciones que de base a techo corresponde a: Arenisca Dura, Plaeners, Arenisca de Labor y Arenisca Tierna.

En el área de la Sabana de Bogotá en algunos sitios no se encuentra claro el contacto de las arenas de Labor y Tierna con Guaduas debido a que se trata de un contacto erosivo, sin embargo en la sección trabajada el contacto es neto.

Formación Arenisca Dura:

Constituida por una sucesión de potentes bancos de areniscas con intercalaciones de limolitas, lodolitas, liditas y arcillolitas de colores claros y en capas finas, la predominancia de las arenas forma una topografía con escarpes y crestas, con un espesor de 320 metros en el área de estudio. Esta formación presenta en detalle

hacia la base intercalaciones lutíticas de colores claro a oscuro, en la parte media, arenas uniformes y hacia el tope intercalaciones de lutitas silíceas claras.

Julivert (1961) designa un límite superior neto por inexistencia de grandes bancos de arena en Plaeners, según Bûrgl (1955, 1959b) el límite superior coincide con un potente nivel de lutitas azuladas que tienen foraminíferos del género Siphogenerinoides los cuales establecen un límite Campaniense Maestrichtiense. El límite inferior es concordante y transicional sobre la Formación Chipaque.

Ambiente de depositación fue marino somero a sublitoral.

Formación Plaeners:

Reposa concordantemente sobre la Formación Areniscas Duras en contacto marcado, subyace a la Formación Arenisca de Labor, concordantemente, consta de arcillolitas ligeramente lodosas, lodolitas silíceas, liditas o porcelanitas, que constituyen un 60% de la sucesión. El ambiente de formación corresponde a llanuras de lodos formadas por corrientes de marea que transportan sedimentos finos sobre la costa y los deposita en las partes más someras, donde las corrientes son débiles.

En el área de estudio presenta un espesor de 470 metros

Formación Arenisca de Labor:

Hubach (1957a) considera a labor como una intercalación de areniscas dentro de plaeners debido a las intercalaciones de niveles silíceos entre los bancos de arena.

Consta de areniscas cuarzosas, de grano fino, blancas, compactas, estratificada en bancos de 1 a 1.5 metros de espesor. Presenta tendencia granocreciente,

texturalmente son inmaduras a submaduras. Los límites superior e inferior son netos. El ambiente de sedimentación según Pérez y Salazar (1978) guarda estrecha relación con el dado para las Arenisca Duras y Plaeners, aunque con características de predominio de sedimentación de canales.

Miembro Arenisca Tierna: Se separa de Labor por entre 15 y 30 m de lutitas o capas silíceas. Consta de areniscas cuarzosas de grano grueso a muy grueso en potentes bancos separados por finos paquetes oscuros de lodolitas, limolitas y arcillolitas interestratificadas. Presenta estratificación cruzada, con bioturbación generalmente perpendicular a la estratificación, el límite superior es gradacional con las areniscas de grano muy fino intercaladas con arcillolitas de la formación Guaduas. Según Etayo (1964) la edad es Maestrichtiano inferior, la misma para labor.

Esta unidad aflora en menor cantidad ya que en el límite Guadalupe – Guaduas suelen faltar niveles tanto para Guadalupe como para Guaduas. Julivert (1963a) observa lo anterior en todos los flancos inversos de los pliegues, rasgo que es característico a lo largo de toda la Sabana por tanto en la mayoría de flancos no se encuentra Tierna como parte de la secuencia.

El espesor de Arenisca Tierna y Areniscas de Labor en el área e estudio es de aproximadamente 660 metros

Formación Guaduas:

Edad: Maestrichtiano-Paleoceno temprano (70-62.4 Ma.).

Espesor: Sarmiento (1994) le asigna un espesor de 1076m, sin embargo en el área de estudio se tienen espesores aproximados de 1450 m.

Esta formación la infrayacen la Formación Guadalupe y la suprayacen la Formación Cacho. Según Van Der Hammen (1957) a partir de análisis palinológicos le ha asignado una edad Maestrichtiano - Paleoceno.

Según Hubach (1957) Guaduas se divide en Guaduas Inferior, Guaduas Medio y Guaduas Superior; Guaduas inferior está constituida por limolitas y arcillolitas situados entre Arenisca Tierna y el nivel de Arenisca La Guía, contiene algunos niveles de carbón; Guaduas Medio contiene principalmente mantos de carbón intercalados con arcillolitas y algunos estratos de arenas; finalmente Guaduas Superior compuesta por arcillolitas abigarradas, rojizas y violáceas con ocurrencias locales de carbón y areniscas de grano grueso.

La Formación Guaduas presenta variaciones en las condiciones faciales, siendo estas más continentales hacia el Este y Norte de la cuenca, también presenta cambios en el espesor. Según Laverde (1979) La Formación se depositó bajo un régimen de flujo alternadamente en ambiente supralitoral, litoral y sublitoral. Sarmiento (1994) le asigna un espesor de 1076 metros e identifica 9 segmentos teniendo en cuenta características morfológicas.

Formación Cacho

Edad: Paleoceno temprano-Tardío (60.9-57.9 Ma.).

Espesor: 150m.

Campbell (1962) cambió el miembro basal de la formación Bogotá a Formación Cacho. Esta formación está constituida por una secuencia de areniscas cuarzosas blanco – amarillentas, de grano grueso conglomerático con estratificación cruzada y grado de diagénesis variable, con intercalaciones de lentes de arcillolitas. Su espesor varía de 80 a 120 metros. Ambiente de depositación se ha asociado a depósitos fluviales de canales.

Formación Bogota

Edad: Paleoceno Tardío-Eoceno Medio (57.9-47 Ma.).

Espesor: 150 m.

Hubach (1957) la describe como un conjunto de arcillas y areniscas, limitada en su parte inferior por el tope de la formación Cacho.

Esta formación presenta semejanzas con la formación Guaduas, con la diferencia que en esta no hay capas de carbón, es posible diferenciarlas por las pobres intercalaciones de arenisca que esta presenta. A nivel general esta conformada por dos miembros, el inferior presenta arcillolitas amarillentas y rojizas con intercalaciones de areniscas cuarzosas, la parte superior por otra parte presenta arcillolitas rojizas con pobres intercalaciones de areniscas.

Esta unidad se depositó en un ambiente lagunar cercano a la costa.

Formación Regadera

Edad: Eoceno Medio- tardío (47-33.7 Ma.).

Espesor: 400m.

Hubach 1957 la definió inicialmente como parte basal de la formación Usme. Posteriormente Julivert 1969 (De Porta, 1974) la elevó al rango de formación debido a su espesor y su individualidad.

Esta constituida por un conjunto de areniscas de grano medio y grueso, dentro de estas hay presencia de guijos muy bien redondeadas e intercaladas con arcillolitas grises.

El contacto con la formación Bogotá es neto en el área, sin embargo se han identificado discordancias angulares entre estas dos formaciones en otras localidades. El contacto superior (formación Usme) es discordante en muchos puntos, sin embargo en algunos sitios parece ser concordante. Las anteriores variaciones se dan debido a que el diastrofismo va teniendo lugar en forma continua, por consiguiente mientras la sedimentación no se interrumpa se registran discordancias progresivas, pero en puntos en los cuales ha habido interrupción local de la sedimentación y consiguiente erosión, se registra discordancia angular (Julivert, 1969)

Formación Usme

Edad: Eoceno Tardío- Oligoceno Tardío (33.7-23.8 m.a.).

Espesor: 500 m.

Definida por Hubach (1957) y redefinida por Julivert (1963) (De Porta, 1974).

De base a techo esta constituida por arcillolitas con intercalaciones de arena de grano fino y areniscas cuarzosas de grano grueso y conglomerados finos.

Hubach (1963) divide la formación en dos niveles, el inferior con un espesor de 50m, predominantemente lutítico con pequeñas intercalaciones de areniscas de grano fino las cuales se hacen mas abundantes hacia la parte alta, y un nivel superior de unos 75 m de espesor, conformado principalmente por areniscas cuarzosas de grano grueso y conglomerados de grano fino.

El contacto inferior con la formación Bogotá es discordante.

Formación Tilatá

Edad: Plioceno Superior – Pleistoceno (4-1.8 m.a.).

Espesor: 100m.

Corresponde a una secuencia sedimentaria post levantamiento cordillerano. En este levantamiento Plio-Mioceno la cordillera Oriental se convierte en un positivo limitando la sedimentación a zonas deprimidas.

Esta formación se caracteriza por tener aproximadamente 100 metros de espesor, compuesta por una alternancia de gravas, arenas y capas arenó-gravosas que se hallan en estratos horizontales.

4.5. TIPO DE CUENCA

La cuenca está asociada a márgenes compresivos asociados al levantamiento de la Cordillera Oriental, es así como se reconoce una cuenca ubicada entre arcos compresionales (Cordillera Oriental y Central) y esta corresponde a una cuenca de tipo Retroarc, sobre la cuenca de Retro Arco se encuentran los sedimentos de la Sabana de Bogotá.

Dickinson (1974b) propuso que el término “retroarco” se usa para describir cuencas tipo “Foreland” formadas entre arcos compresionales.

4.6. DISCORDANCIAS

El grupo Cáqueza se encuentra descansando discordantemente sobre unidades Jurásicas.

Los límites: Une-Chipaque, Bogotá-regadera son discordantes.

Cacho se encuentra discordante sobre Guaduas en algunas secciones mientras que en otras es un contacto de tipo concordante.

Entre Tilatá y Usme hay un hiato al cual se le determinó una edad de 20 millones de años.

5. ESTRATIGRAFIA DE LA FORMACION GUADUAS

El trabajo paralelo desarrollado por Rincón y Rocha (2007), consistió en caracterizar a detalle la estratigrafía de la Formación Guaduas a lo largo de todo el sinclinal Checua – Lenguazaque.

Los resultados obtenidos en dicho trabajo permiten obtener importantes conclusiones estratigráficas, estructurales y sedimentológicas que se resumen a continuación.

Las 3 áreas trabajadas en el presente trabajo (El triunfo, Lenguazaque y Montecristo) pueden ser correlacionadas estratigráficamente gracias a la interpretación de las columnas levantadas por Rincón y Rocha (2007) ver figura 4. Para esta correlación se establecieron segmentos teniendo en cuenta las características o propiedades de las diferentes litologías que componen los estratos y morfología que coinciden con sus características genéticas.

Los segmentos iniciales (1, 2,3 y 4) propuestos por Rincón y Rocha (2007) hacen referencia a los llamados mantos inferiores, en donde se agrupan numerosas cintas y algunos mantos de espesores considerables que en su totalidad corresponden a carbones coquizables, que según las secciones estratigráficas evaluadas, corresponden a los mantos inferiores, y que finalizan en una potente capa de arenas fácilmente reconocible en todas las áreas de trabajo, conocida como Arenisca de la Guía. En contacto con la Arenisca de la Guía aparece el primero de varios sistemas de arenas de canal que se observan a lo largo de todo el sinclinal. Estos mantos inferiores son de gran importancia para la minería de la

región ya que aportan la totalidad de Coque que se produce en este distrito minero.

Los siguientes segmentos (5,6 y 7) corresponden a los denominados mantos medios, en estos mantos se encuentran a lo largo de las tres secciones trabajadas los mantos más potentes y continuos lateralmente. Estos mantos constituyen el nivel en el cual los carbones disminuyen sus características coquizables e inician la secuencia de carbones térmicos. Algunos autores así como mineros de la región denominan los carbones de estos segmentos como carbones Coquizantes. Estos carbones están suprayacidos por un segundo sistema de arenas de canal, que a su vez esta en contacto ondulado con un paquete espeso de lodolitas y arcillolitas abigarradas.

Continuando con los segmentos (8, 9,10 y 11), se encuentra el paquete de mantos de carbón térmico o mantos superiores que corresponden al último nivel estratigráfico en el cual se realiza minería. La parte inferior de este paquete (segmento 8) muestra la aparición de Shales carbonosos y mantos de carbón, que en algunas ocasiones se encuentran intercalados, como en el caso del manto 7 Bancos. Estos mantos son los que constituyen los carbones explotables de menor calidad en el área, y se encuentran infrayaciendo un tercer sistema de arenas de canal que aunque mas delgado que los dos anteriores, presenta orientación similar.

Finalmente en este paquete, aparecen las últimas cintas de carbón de la Formación Guaduas, que no son explotadas y están suprayacidas por un nivel potente de arenas tabulares.

Los segmentos (12 a 15) constituyen la parte superior de la Formación Guaduas y no presentan mantos o cintas de carbón. Algunas apariciones de láminas y delgadas capas de shale carbonoso constituyen la mayor acumulación de materia orgánica. Litológicamente, este paquete esta dominado por la alternancia de

lodolitas y arcillolitas de tonalidades rojizas y amarillentas, con capas de espesor variable de arenas cuarzosas y esporádicos lentes de carbón.

El modelo propuesto por Rincón y Rocha plantea un relativo ascenso del nivel del mar evidenciando al inicio de la Formación Guaduas por una secuencia progradante, que acumuló sedimentos finos y los primeros mantos de carbón, lo cual es sustentado por los resultados de los análisis proximales y de azufre llevados a cabo a las muestras de las diferentes áreas, que indican una fuerte influencia de ambientes marinos someros. Los mantos inferiores o coquizables fueron formados durante esta fase conocida como Middle Highstand System Track. La formación de carbones disminuye durante la fase posterior (Late Highstand System Track) y posteriormente durante un aumento del nivel del mar, se depositan las Areniscas de la Guía.

Continuando este ascenso se depositan una serie de cintas de carbón. Este proceso se detiene cuando la dinámica sufre una conversión y un descenso del nivel del mar produce erosión del canal formado inicialmente. A continuación durante un ascenso estos canales comienzan a sedimentarse con sedimentos aluviales.

Durante este ascenso, se llega a un punto de acumulación de carbones de espesores variables, lateralmente continuos y con buena preservación, correspondientes a los mantos medios, que a lo largo de las 3 secciones trabajadas son de fácil reconocimiento y sirvieron de referencia para la correlación de las columnas estratigráficas levantadas en el trabajo de Rincón y Rocha, evidenciando además un aumento del nivel del mar y un avance de la línea de costa.

El prolongado y continuo ascenso del nivel del mar da lugar a un incremento del espacio de acomodación en el que se generan canales, dada las elevadas tasas de sedimentación que en el área se registraban.

Una transgresión en este punto es el factor principal de la inexistencia de carbones hacia el tope del paquete de mantos medios, dado que un rápido aumento del nivel del mar impide la conservación de materia orgánica.

En este punto, las condiciones cambian y se asemejan nuevamente a las presentadas durante el inicio de la depositación en la formación Guaduas, dando lugar a mantos continuos y de espesores intermedios. Es así como se formó el paquete de mantos superiores, que presenta características térmicas y no coquizables como en el anterior caso. Esto se puede explicar mediante el análisis de reflectancia de vitrinita.

Un posterior descenso relativo del nivel del mar permite la formación de los canales que suprayacen estos carbones.

Un último ascenso, prolongado y continuo produce inicialmente la generación de pequeñas capas de carbón que poco a poco van desapareciendo hasta crear grandes espacios de acomodación en los que debido a la reaparición de altas tasas de sedimentación se acumulan canales.

En el tope de la Formación Guaduas predomina el ambiente fluvial, como consecuencia de la acreción definitiva de la cordillera occidental lo cual transformó drásticamente los ambientes de marino a continental.

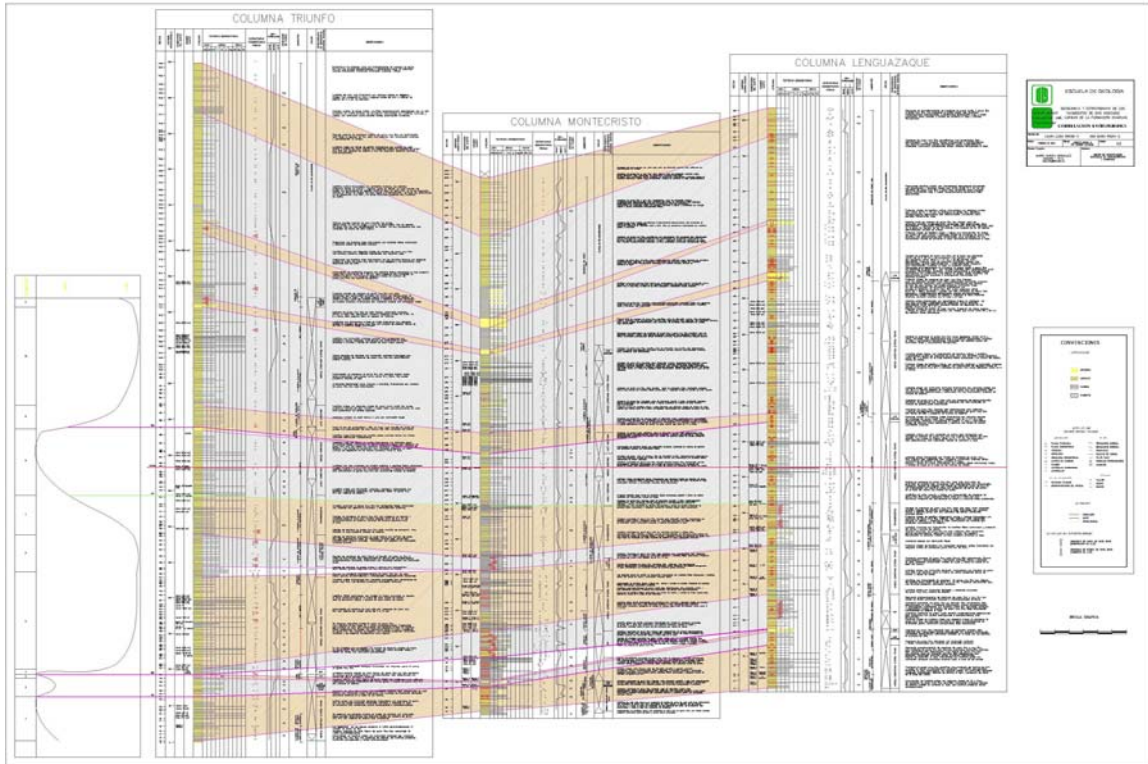


FIGURA 4. Correlación Estratigráfica de los mantos de carbón presentes en las secciones de Lenguaque, El Triunfo y Montecristo. Tomado de Rincón & Rocha (2007)

6. CARACTERIATICAS DE YACIMIENTOS DE GAS ASOCIADO A CARBON (GAC)

El carbón es una de las mayores fuentes de energía a nivel mundial, no solo por la cantidad de metros cúbicos extraídos anualmente, sino también por las reservas de gas que este puede tener asociado en un yacimiento típico. El gas se produce como resultado del proceso que se presenta a partir de la turba y que finaliza con el carbón, así como la materia orgánica es convertida progresivamente en carbón, se va generando al mismo tiempo grandes cantidades de gas, el cual es almacenado en la matriz del carbón.

El gas que se encuentra en mayor proporción es metano en este tipo de yacimientos, es por esta razón que comúnmente se les llama "Coalbed methane", sin embargo se encuentran pequeñas cantidades de otros gases en la matriz del carbón como resultado de diversos procesos físicos y químicos.

Inicialmente se tiene depositación de material orgánico, este debido a la condición anóxica del medio se transforma en turba, la cual experimenta incremento de calor y presión ocasionado por el enterramiento de la turba cuando material mas joven se sobrepone, por lo cual se generan cambios físicos y químicos en el material.

La formación de carbón a partir de la turba es producto del anterior proceso, con lo cual se liberan agua y volátiles (Nitrógeno y dióxido de carbono) de la materia orgánica, incrementando de esta forma la concentración de carbón, esta transformación es un proceso gradual de maduración.

A lo largo de todo el proceso las características físicas y químicas del carbón cambian, incrementando en cada estado el rango de maduración del mismo. Este rango comúnmente es medido como reflectancia de vitrinita, la cual constituye el maceral más abundante en la mayoría de los carbones, debido a que el proceso de carbonificación se detiene en cualquier momento, dependiendo de las condiciones geológicas, hoy en día se puede determinar el rango del carbón en un área característica.

De los procesos de enterramiento y maduración, cantidades de agua, CO₂, metano, y otros gases son expulsados. Físicamente, el material pierde porosidad por los cambios de madurez y compactación.

El gas asociado a mantos de carbón se presenta principalmente en tres estados: Gas libre, gas disuelto en el agua del carbón y gas adsorbido en la superficie sólida del carbón.

Algunos tipos de materia orgánica permiten producir más gas que otros.

El metano generado tiene dos caminos: migración (hacia rocas reservorio adyacentes o hacia la superficie) o quedarse atrapado en el carbón mismo, siendo esta última en donde se encuentran la mayoría de yacimientos debido a los procesos de absorción o adsorción con los microporos del carbón.

El gas molecular se encuentra adherido a la superficie del carbón almacenándose en su estructura interna. Algunos gases almacenados en las fracturas o diaclasas del carbón, o disueltos en el agua atrapada en dichas fracturas. Este entrapamiento se da en parte por la presión de agua y el debilitamiento de los enlaces covalentes por medio de las fuerzas de Van de Waals.

El proceso de extracción de gas inicia con una alta producción de agua, una vez la presión hidrostática disminuye inicia la producción de gas natural. En la figura 5 se muestra los productos de un yacimiento a lo largo del tiempo.

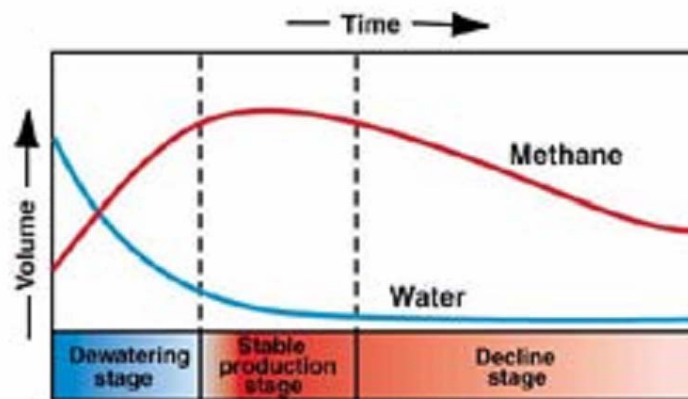


FIGURA 5. Producción de agua y metano en un yacimiento de GAC. Tomado de García González 2001

Generación De GAC

El gas asociado a mantos de carbón es producido a partir de dos fuentes: Biogénica y Termogénica. El gas biogénico es aquel que se produce a partir de la acción de las bacterias que existen en el carbón, estas bacterias son las que ayudan a la descomposición de la materia orgánica vegetal en los pantanos y generan principalmente gas metano. Las condiciones adecuadas para generar grandes cantidades de gas biogénico son: un ambiente anoxico, bajas concentraciones de sulfatos, bajas temperaturas, abundante materia orgánica, altos valores de pH y adecuado espacio (Rice y Claypool, 1981).

El gas biogénico se considera que se forma en las etapas iniciales del proceso de carbonificación, cuando el rango del carbón es bajo (R_o menores de 0.5), su generación y acumulación se debe a la rápida sedimentación, no obstante lo anterior no indica que en estados avanzados del carbón no sea posible la

producción de gas biogénico, cuando el agua fluye en el material genera condiciones favorables para la acumulación de bacterias y por consiguientes generación de gas biogénico. La rata con la cual se produce gas metano es manipulada por la temperatura, presión, presencia de oxígeno y otros factores ambientales.

Cuando la temperatura del carbón alcanza cerca de 50 °C, debido al enterramiento y aumento de presión, y con suficiente cantidad de tiempo, la mayoría del gas biogénico ha sido generado. Para este mismo tiempo cerca de dos terceras partes de la humedad ha sido expulsada y el carbón ha alcanzado el rango de subbituminoso. (Rightmire, 1984).

Después que el carbón ha excedido los 50 °C, se inicia la generación de gas termogénico, la cual se da como consecuencia del alto gradiente geotérmico y del excesivo enterramiento, es así como se genera dióxido de carbono, nitrógeno, metano, propano, butano y agua. Para este punto la cantidad de carbón o materia volátil rica en hidrógeno y oxígeno ha incrementado haciendo que el carbón alcance rangos de bituminosos (R_o mayores de 0.6). (Rightmire, 1984) Ver figura 6.

Después que la temperatura ha excedido los 99 °C, la producción de dióxido de carbono incrementa con una pequeña producción de metano. En carbones de altos rangos con altos contenidos de volátiles, cuando la temperatura esta cerca de los 121 °C la producción de dióxido de carbono es mayor que la producción de metano.

La máxima generación de metano en carbones bituminosos ocurre a una temperatura de 149 °C aproximadamente. (Rightmire, 1984).

Según García 1993, la generación de GAC se da en dos etapas principalmente: Entre R_o de 0.8 y 1.7%, como producto de la degradación termal del petróleo y

cuándo R_o es mayor de 1.7% se genera metano y gas seco resultado de altas temperaturas y altas presiones.

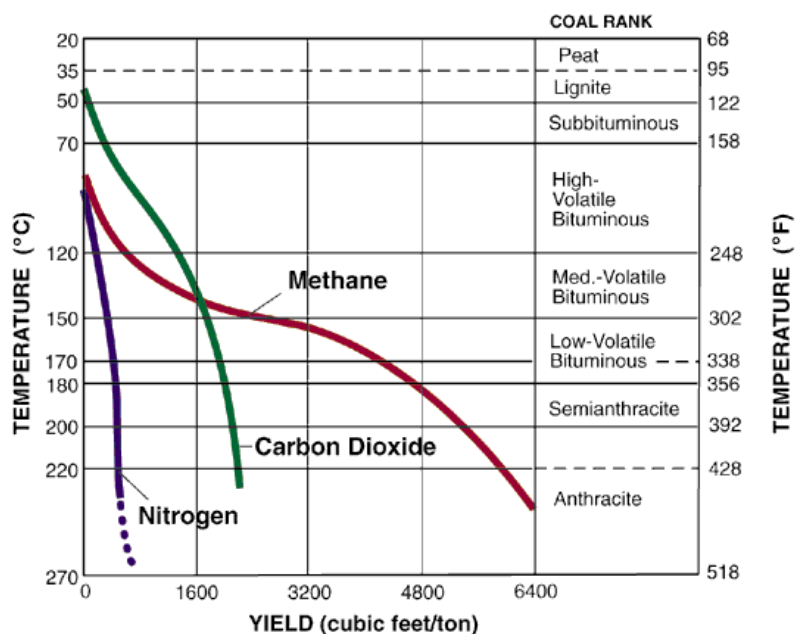


FIGURA 6. Cantidades de gas generado durante la carbonificación. Modificado de rightmire (1984).

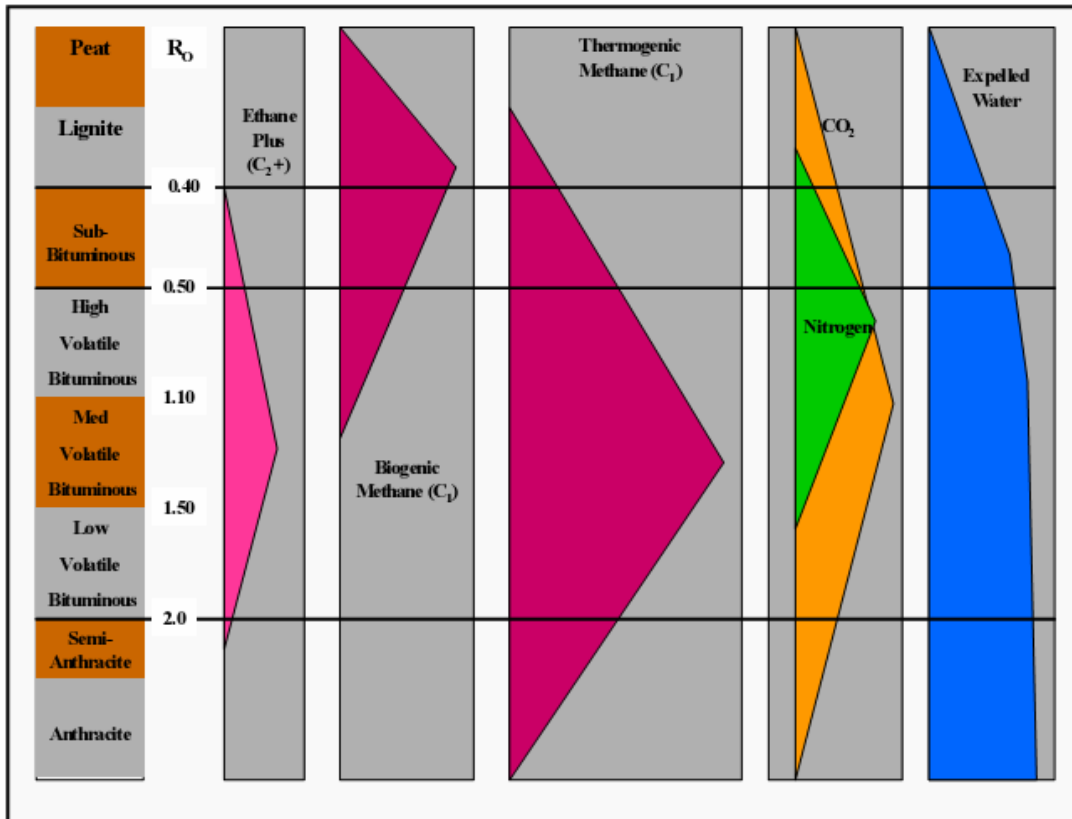


FIGURA 7. Estimación de la cantidad de gases generados en cada una de las fases de maduración del carbón. (Tomado de ground water protection)

La cantidad de volátiles expulsados pueden ser estimados usando la composición química de los carbones (C-H-O) la cual varía para diferentes tipos de kerógeno (Juntgen y Karweil, 1966). Usando este análisis se reconocen cuatro tipos de kerógeno, los cuales son ploteados en el diagrama de krevelen según los radios atómicos de sus compuestos. (Figura 8a).

Estos cuatro tipos de kerógeno se relacionan con el mayor contenido de macéras en cada uno de ellos, liptinita (I-II), vitrinita (III), e inertinita (IV)

Kerógeno I: Procede de transformación de lípidos y de algas y se considera formado en ambientes lacustres. Es muy rico en H y pobre en O.

Kerógeno II: Es una mezcla entre KI y KIII, con valores intermedios entre ambos de H y O y que procede de restos de organismos vegetales y animales marinos. Por estar relacionado con ambientes marinos, es el más rico en S.

Kerógeno III: Procede de transformación de restos vegetales transportados desde el continente a zonas marinas. Es rico en O y el pobre en H. Ausencia de S.

Kerógeno IV: Procede de la materia orgánica oxidada

La liptinita y la vitrinita generan mayores contenidos de metano, la inertita tiene un limitado potencial de generación y la fusinita presenta acumulación en sus poros.

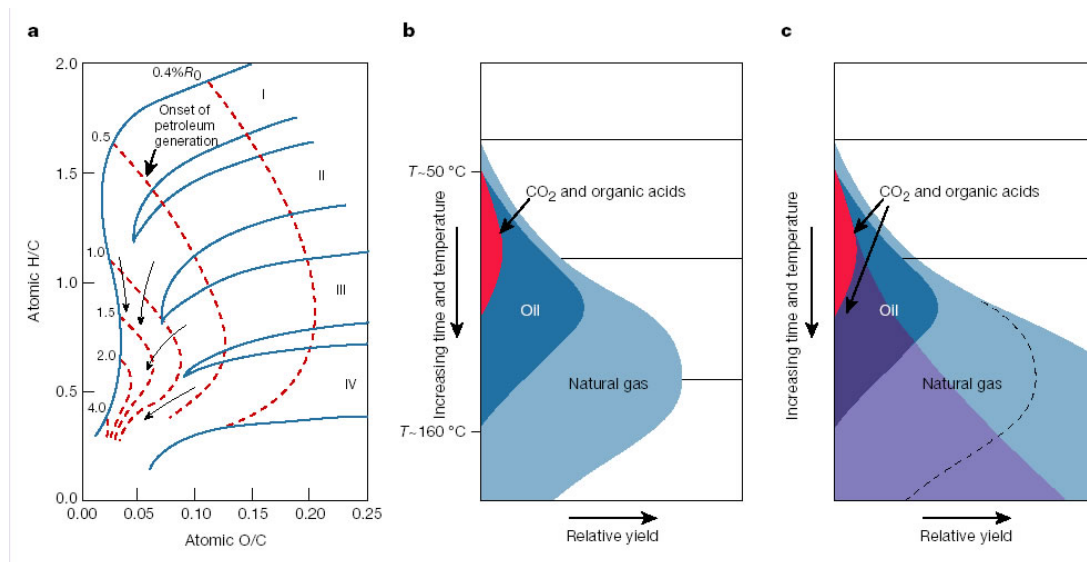


FIGURA 8. A. Diagrama Van Krevelen el cual muestra la composición química en los diferentes tipos de kerogeno (I, II, III y IV). Los niveles de maduración termal son indicados por medio de isocoras de R_o . **B.** Modelo tradicional de la medida y tiempo de los productos generados en el proceso de carbonificación, la forma de la figura esta contrastada por la isocoras de maduración de la figura A. **C.** Ilustración de la cantidad y tiempo de los productos generados en el proceso de carbonificación si el agua y los minerales son permitidos para la formación de compuestos tales como dióxido de carbono y ácidos carboxílicos. (Modificado por Seewald, 2003)

CARACTERISTICAS DE LOS GASES ASOCIADOS A MANTOS DE CARBON

Anteriormente se habló de dos tipos de gas en un yacimiento GAC, gas biogénico y gas termogénico. Para determinar el tipo de gas en un yacimiento se examina el

isótopo $\delta^{13}\text{C}$. La profundidad relativa cambia la composición isotópica de la molécula de gas.

Inicialmente el gas es controlado por el rango, la composición y la profundidad/temperatura del carbón asociado. Controles posteriores permiten determinar la composición del gas.

El gas biogénico consiste principalmente de metano. La presencia de gases pesados con gas biogénico en carbones, marcan el final de la generación de gas biogénico y el inicio de generación de aceite pesado.

El gas biogénico está restringido a bajas profundidades, temperaturas menores de 50°C y este puede ocurrir en carbones de todos los rangos. El gas biogénico presenta una composición isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ en un rango de -55 a -90 partes por mil.

Por otra parte, los gases termogénico se caracterizan por presentar hidrocarburos pesados sobre el rango intermedio de carbones bituminosos altos en volátiles y medios en volátiles (R_o mayor de 0.6%) y enriquecimiento del isótopo $\delta^{13}\text{C}$ (Valores mayores de -55 partes por mil).

Otro factor que afecta la composición de los gases son las bajas profundidades, en donde los microorganismos pueden actuar. La actividad microbiana puede afectar en dos formas la composición de los gases: mezcla de gas Termogénico generado en estados avanzados con gas biogénico generado por microorganismos, y acción de bacterias aeróbicas las cuales destruyen los componentes del gas seco, resultando en un gas rico en metano. (Rice, DD and Claypool, GE., 1981)

El dióxido de carbón puede tener diferentes orígenes, por descarboxilación termal o devolatilización del carbón en su mayoría, en otros casos se tiene por

destrucción termal de carbonatos, degradación bacteriana, entre otros. (Rice, DD and Claypool, GE., 1981)

ALMACENAMIENTO DE GASES

Los yacimientos de GAC constituyen reservorios de gas no convencionales, debido a las cantidades de gas y la manera en la cual este es almacenado. En reservorios convencionales el gas en areniscas o carbonatos se encuentra libre o disuelto, mientras que en GAC un 98% del gas se encuentra absorbido (Rice, DD and Claypool, GE., 1981). El gas absorbido se encuentra en capas monomoléculares sobre la superficie interna del carbón el gas disuelto y libre se encuentra en las fracturas y poros, además de agua (Fig 9), debido a que el carbón es un sólido microporoso, este presenta una gran superficie de área y por tanto tiene una alta capacidad para almacenar gas, mucho mas que las areniscas o rocas convencionales en el almacenamiento.

Debido a que la absorción de gas esta demarcada por la molécula misma, se tiene que a medida que el rango del carbón es mayor, el contenido de gas será más alto.

En general se puede decir que los mantos de carbón son fuente del gas y reservorio del mismo.

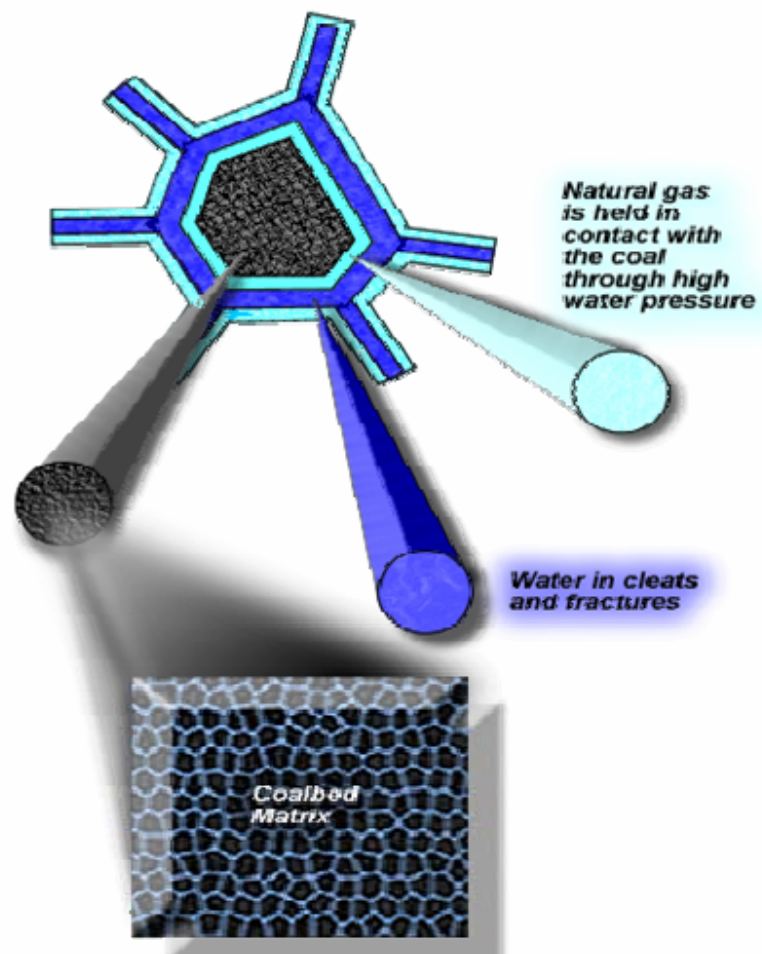


FIGURA 9. Matriz de Carbón que incluye cantidades de agua y gas. Tomado de Rice, DD and Claypool, GE., 1981

FACTORES GEOLÓGICOS QUE CONTROLAN LA OCURRENCIA DE GAC

Como se dijo anteriormente los mantos de carbón son a la vez fuente de gas y reservorio del mismo.

La identificación de mantos de carbón con un alto potencial de generación y acumulación de metano requiere la evaluación de los siguientes parámetros (García-González, 2001):

- Fuente de generación de metano

- Reservorio, el cual en la mayoría de las veces esta constituido por los mantos mismos, estos deben ser permeables.
- Capa sello la cual generalmente consiste de shales en contacto con los mantos de carbón. Otro mecanismo que impide la fuga o expulsión de gas es la presión hidrostática en los mantos, los cuales usualmente están saturados de agua y gas.
- Trampa, la cual puede ser de tipo estructural, estratigráfica o una combinación de las anteriores. En estas trampas es el flujo hidrodinámico es el factor principal de retención de gas.

Los yacimientos de GAC presentan una profundidad somera, la cual fluctúa entre 200 y 2000 metros (García-González, 2001). La estructura típica de estos yacimientos es un sinclinal donde se presentan los mantos de carbón interestratificados con areniscas y shales. La presión hidrostática es un factor importante que retiene el gas en los mantos, el agua se infiltra por los flancos del anticlinal.

7. METODOLOGIA

La metodología llevada a cabo para completar esta investigación, comprende las siguientes etapas:

DOCUMENTACION

Durante esta fase se recopiló la mayor cantidad de bibliografía relacionada al tema y al área objeto de estudio, esta recopilación constituyó principalmente proyectos de grado realizados, artículos, estudios elaborados en otras cuencas y todo el marco teórico concerniente a los yacimientos de gas asociado a carbón. Además de esto se programó el trabajo a desarrollar en las salidas a campo y la capacitación en el manejo de equipos necesarios tanto en campo como el laboratorio.

MUESTREO DE CARBONES

Esta etapa constó de cuatro salidas dentro de las cuales se realizó:

1. Reconocimiento a detalle del área de trabajo, durante el cuál se hizo especial énfasis en la identificación de las unidades estratigráficas que componen la sección del sinclinal Checua-Lenguazaque, posterior a este trabajo se enfocó el estudio en la Formación Guaduas debido al contenido de carbón y gas que esta presenta.
2. Muestreo de carbones en la sección de Montecristo (cada una de estas secciones se explicará mas adelante) y prueba del funcionamiento de los equipos de degasificación (Canisters).
3. Muestreo de gases en la sección de Montecristo y muestreo de carbones en la sección del Triunfo.

4. Muestreo de gas en la sección del Triunfo y de gas y carbón en la sección de Lenguazaque.

Una vez se va a llevar a cabo el muestreo, se realiza una correlación estratigráfica de cada mina visitada teniendo en cuenta el estudio realizado por Rincón y Rocha (2007). Los parámetros usados para la correlación fue la ubicación de cada bocamina en un mapa geológico a detalle, también se tuvo en cuenta las características de cada manto a muestrear.

Se tomaron muestras *In situ*, siguiendo los siguientes parámetros:

Para la toma de muestras se seleccionaron minas cuyos frentes de explotación se encontraban en producción, con el fin de relacionar estos análisis de carbón con el contenido de gas presente, es necesario que la muestra se encuentre fresca.

El muestreo se realizó en el flanco Occidental del sinclinal Checua-Lenguazaque debido a que en este flanco hay mayor ocurrencia de gas que en el flanco Oriental, de esta manera se abarco la parte del sinclinal que se encuentra mas hacia el Sur, la parte media y una sección mas hacia el Norte, lo cual otorgará datos que permitan analizar la influencia de gas de Sur a Norte.

A nivel general se dividió la zona en tres secciones, Triunfo, Montecristo y Lenguazaque, haciendo referencia a los mantos ubicados en la parte Sur, media y Norte del sinclinal respectivamente (Figura 10)

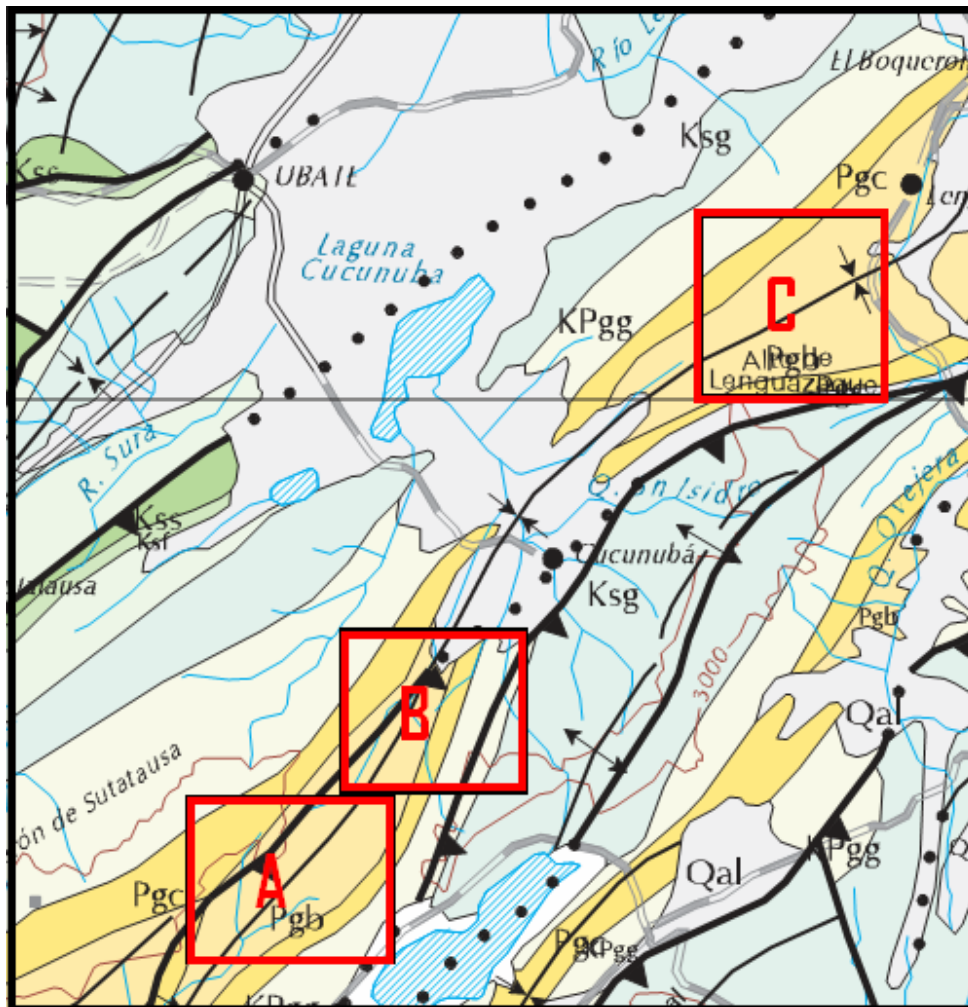


FIGURA 10. Mapa geológico de la zona, con las tres secciones de estudio. A corresponde a la sección del Triunfo, B corresponde a la sección de Montecristo y C a la sección de Lenguazaque. Tomado de Acosta & Ulloa (2003)

En la fase de campo se visitaron 12 minas en el Triunfo en la cual se obtuvieron 12 muestras, 10 minas en Lenguazaque en la que se obtuvieron 12 muestras y 11 minas en Montecristo donde se obtuvieron 16 muestras para un total de 40 muestras.

La metodología usada en la toma de estas muestras inicia con el descenso por los inclinados por los cuales se tiene acceso a cada uno de los frentes de explotación de las minas, una vez seleccionado el lugar de muestreo se procede a despejar el manto, eliminando una delgada capa de carbón de aproximadamente 10 cm, el

método usado en el muestreo fue el de canal, buscando representatividad en cada una de las muestras.

Una vez se tiene expuesta una parte fresca del manto (foto 1), se procesa a limpiar el piso, retirando fragmentos de estériles y de carbón picado con anterioridad, luego se extiende una fibra en el suelo con el fin de aislar el carbón que caerá cuando se este en proceso de realizar el canal.

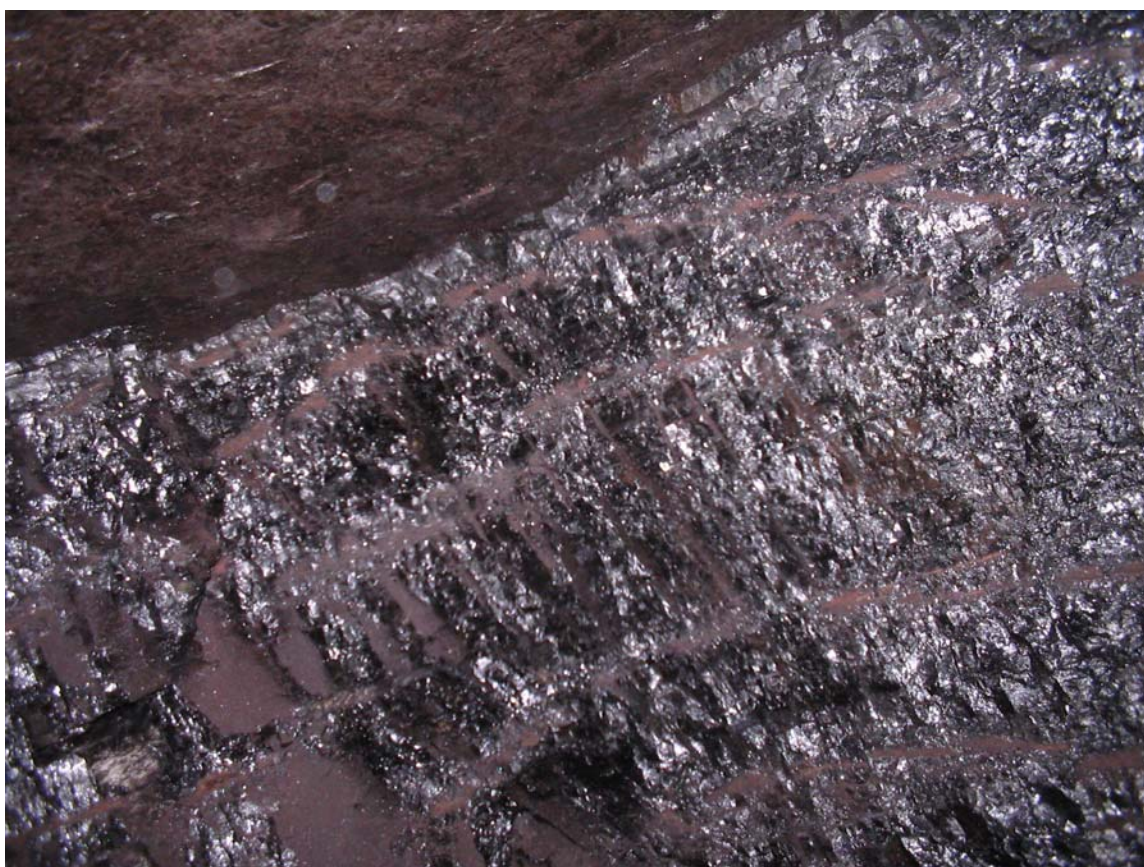


FOTO 1. Superficie expuesta del carbón, sobre esta se realiza el muestreo de canal, corresponde al manto 12 en la sección de Montecristo

Se recolecta una muestra de aproximadamente 20 Kg obtenida a partir de un canal perpendicular a la estratificación con dimensiones de alrededor de 25 cm de profundidad, 40 cm de ancho y la altura depende del espesor de cada uno de los mantos a muestrear. Una vez picada la totalidad de la muestra, se mezcla sobre la fibra y se selecciona con el fin de aislar partículas estériles que puedan contaminar

el carbón y alterar el resultado de los ensayos de laboratorio; se procede a realizar una serie de cuarteos hasta obtener la cantidad de muestra requerida (Aproximadamente 2Kg).

Las muestras obtenidas son empacadas en bolsas de polietileno, selladas en el mismo frente para evitar que sufra posteriores alteraciones, estas muestras son referenciadas inmediatamente teniendo en cuenta el nombre de la mina, el nombre del manto (según las compañías mineras), las coordenadas X, Y y Z obtenidas mediante GPS en la boca de la mina y el área minera definida inicialmente en este trabajo.

Cada una de las muestras obtenidas se amarran al estudio estratigráfico a detalle de la formación Guaduas realizado por Rincón & Rocha (2007).

Degasificación De Muestras De Carbón

Los análisis de degasificación de las muestras de carbón se efectuó empleando canisters los cuales fueron diseñados y construidos por el Centro Internacional de Física (CIF). Estos canisters registran en forma automática el volumen de gas liberado por las muestras de carbón (CIF, 2006)

.El propósito de este muestreo fue el de obtener muestras de carbón saturadas en gas. Igualmente el muestreo se realizó teniendo en cuenta la posición estratigráfica de los mantos de carbón (la cual se determinó en colaboración con Rincón y Rocha (2007)), los parámetros de los carbones y las condiciones a las cuales este se encuentra, además es necesario que el frente de la mina se encuentre activo al momento de muestrear. Se hace importante abarcar gran parte de la columna en cada una de las áreas, de esta manera las muestras colectadas corresponden en la columna estratigráfica a la parte inferior, media y superior de

cada sección, con el fin de determinar la variabilidad en profundidad del contenido de gas.

En total se colectaron 19 canisters de los cuales 8 corresponden a la sección del Triunfo, 7 a Lenguaque y 4 a Montecristo, el nombre y posición del manto se determinó teniendo en cuenta la nomenclatura establecida por Rincón & Rocha (2007).

Inicialmente se debe limpiar el frente, eliminando una capa de carbón de aproximadamente 30 cm de profundidad, una vez se tiene el frente limpio se procede rápidamente a picar cerca de 3 Kg de carbón, el cual es depositado en el canister, este finalmente se llena de agua mineral y se sella para evitar posteriores pérdidas de gas (foto 2), el anterior procedimiento debe ser llevado a cabo rápidamente para evitar grandes escape de volátiles.



FOTO 2. Adición de agua en el proceso de muestreo de carbones para degasificación.

En el momento de sellado del canister se deben tomar los datos de la hora a la cual este se selló, la temperatura ambiente, la presión atmosférica y la profundidad

a la cual fue tomada la muestra, lo anterior tiene como fin obtener una gráfica precisa de la cantidad de gas expulsado y de la cantidad de gas perdido durante el proceso de sellado.

ANÁLISIS DE CARBONES

Consistió en la realización de los siguientes análisis a las muestras de carbón:

- Proximales, Ro, TOC y S
- Ensayos de adsorción isotérmica.
- Pruebas de degasificación.

Además se realizaron las siguientes pruebas a las muestras de gas:

- Análisis por cromatografía de gases para determinar la composición química de los gases.

Se realizó conjuntamente un corte geológico balanceado usando el método kink de las diferentes estructuras que comprenden el área.

Se efectuó finalmente el modelamiento geoquímico de la cuenca

Para los análisis de carbones se parte de 2 Kg de muestra. A continuación se da un resumen de los métodos usados.

Análisis Proximales

Para los análisis proximales se siguen las normas ASTM, los resultados generan una aproximación que caracteriza los carbones térmicos y coquizables, siendo el principal método de evaluación de los rangos de carbón, que permite determinar el grado de madurez termal. Estos constituyen principalmente el cálculo de Humedad residual, Materia Volátil, Carbono fijo y contenido de cenizas. Estos resultados se expresan en porcentaje en peso.

Para el tratamiento de las muestras en el laboratorio, fue necesario iniciar con el proceso de macerado, el cual se le realizó a 200 gramos de cada muestra, y recuperando alrededor de 80 gramos retenidos en malla 120.

A continuación se describen cada uno de los procedimientos seguidos durante el desarrollo de estos análisis, siguiendo las normas ASTM.

- Humedad:

Todos los carbones, independientemente del rango de madurez, presentan un poco de agua. Debido a lo anterior se realiza una prueba para eliminar el contenido de H₂O presente en las muestras. Para ello se utilizó un gramo de muestra en un crisol sin tapa el cual se colocó en una estufa de secado con una temperatura entre 104° a 110°C durante una hora aproximadamente. Las diferencias de peso indican la humedad de cada muestra.

El contenido de humedad no afecta la absorción de metano en el carbón.

- Ceniza:

Su contenido representa la cantidad de impurezas en la muestra y el carbón efectivo disponible, con el cual se puede determinar la calidad del carbón, siendo el 12% el límite máximo permitido en carbones de buena calidad. (Durán et al., 1981). Para su determinación se utilizó un gramo de muestra en un crisol sin tapa el cual se colocó en un horno, calentándolo gradualmente hasta obtener una temperatura de 750 °C durante una hora (Foto 3). Las diferencias de peso indican el contenido de cenizas presentes en cada muestra.



FOTO 3. Resultado de prueba para determinar contenido de cenizas, la coloración indica aquellas muestras que tienen mayor cantidad de Azufre.

- **Materia Volátil:**

En esta prueba los volátiles son eliminados totalmente durante el proceso de carbonización. La materia volátil es indicativa en la predicción del grado de carbonización de los carbones, del rango coquizable e indicativo del grado de madurez termal.

El análisis de materia volátil se llevó a cabo en una mufla a una temperatura aproximadamente 900° C durante 7 minutos utilizando 1 gramo de muestra en un crisol con tapa.

Las diferencias de peso obtenidas indican la cantidad de materia que se quemó.

- **Carbono Fijo:**

El carbono fijo es el porcentaje que queda de restarle al 100% los porcentajes hallados de humedad, cenizas, y materia volátil según la ecuación:

$$\text{Carbono Fijo} = 100\% - (\% \text{ humedad}) - (\% \text{ cenizas}) - (\% \text{ materia volátil}).$$

Análisis Últimos

- Análisis de TOC y Azufre

Esta prueba fue realizada en el analizador de Carbono- Azufre LECO Modelo SC 144R el cual utiliza un horno de alta temperatura (hasta 1500°C) en una atmósfera oxidante. Los vapores de la combustión de la muestra son pasados a través de una celda de espectro Infrarrojo, que analiza la cantidad de CO₂ producido durante la combustión, al igual que el azufre presente.

El procesamiento de los datos de TOC y Azufre, fue realizado utilizando el software SC144R del analizador LECO. El instrumento se calibró empleando diferentes patrones de calibración para carbono y para azufre.

Reflectancia De Vitrinita

La reflectancia de vitrinita (%Ro), es un parámetro que indica la madurez termal del carbón, por medio de este se determina el rango de carbones los cuales pueden ir desde turba hasta antracita, de esta manera se pueden diferenciar carbones térmicos de coquizables y también indica la cantidad de gas que potencialmente puede haber generado y acumulado un carbón, debido a que para cada rango de carbón diferentes cantidades de metano, CO₂ y nitrógeno, entre otros, se ha generado.

Se elaboraron 40 secciones pulidas de diversas muestras de carbón obtenidas en algunos de los mantos de la Formación Guaduas en el área del sinclinal Checua-Lenguazaque. El procedimiento que se siguió se describe a continuación:

Trituración de una muestra representativa de aproximadamente 250 gramos que posteriormente se tamiza empleando la malla límite 20, del resultado de este proceso se pesan de 3 a 5 gramos y posteriormente se impregna con resinas

epóxicas, una vez las secciones se han endurecido, se lleva a cabo el pulido de la muestra impregnada, empleando una pulidora automática Wurtz.

Las medidas de Reflectancia de vitrinita (R_o) se obtuvieron mediante un microscopio fotómetro Zeiss Modelo MPM400 utilizando objetivos de inmersión en aceite y una fuente de luz blanca reflejada.

La calibración del instrumento se realizó empleando estándares de reflectancia de 0.54% y 1.71% con luz reflejada, cuya longitud de onda es de 546 nm.

Los datos fueron procesados mediante el software Photan, este mismo software se encarga del fotómetro.

El procedimiento y el equipo utilizado permiten garantizar los resultados obtenidos, dada la calidad y buen estado de los instrumentos, así como el método propuesto por las normas ASTM.

Se efectuaron 30 lecturas de R_o por sección, en las lecturas se debe tener cuidado de no tomar lecturas en otros tipo de macérales diferentes a la vitrinita, así mismo, estas deben estar sobre superficies bien pulidas. Es importante tener en cuenta la desviación estándar de los datos, la cual debe ser menor de 0,035

Degasificación

Una vez se van a llevar a cabo los análisis cualitativos del gas contenido en los carbones de los canisters, es necesario haber dejado degasificando los canisters un tiempo razonable, la determinación del tiempo depende de las propiedades a las cuales el carbón se encuentra en el momento del muestreo, ya sea su temperatura, la saturación de agua presente, entre otros.

Para almacenar los canisters se busca un lugar fresco y con temperatura constante. Desde el primer día de almacenaje se abre la válvula de seguridad para que permita la entrada del gas expulsado a la caja que mide la cantidad de gas y posteriormente se descargan los resultados a una base de datos, mediante el software CGMS 2.0, (2006), diseñado por el Centro Internacional de Física (CIF). Los datos deben ser descargados periódicamente. Para el presente trabajo se descargaron resultados durante dos meses y medio.

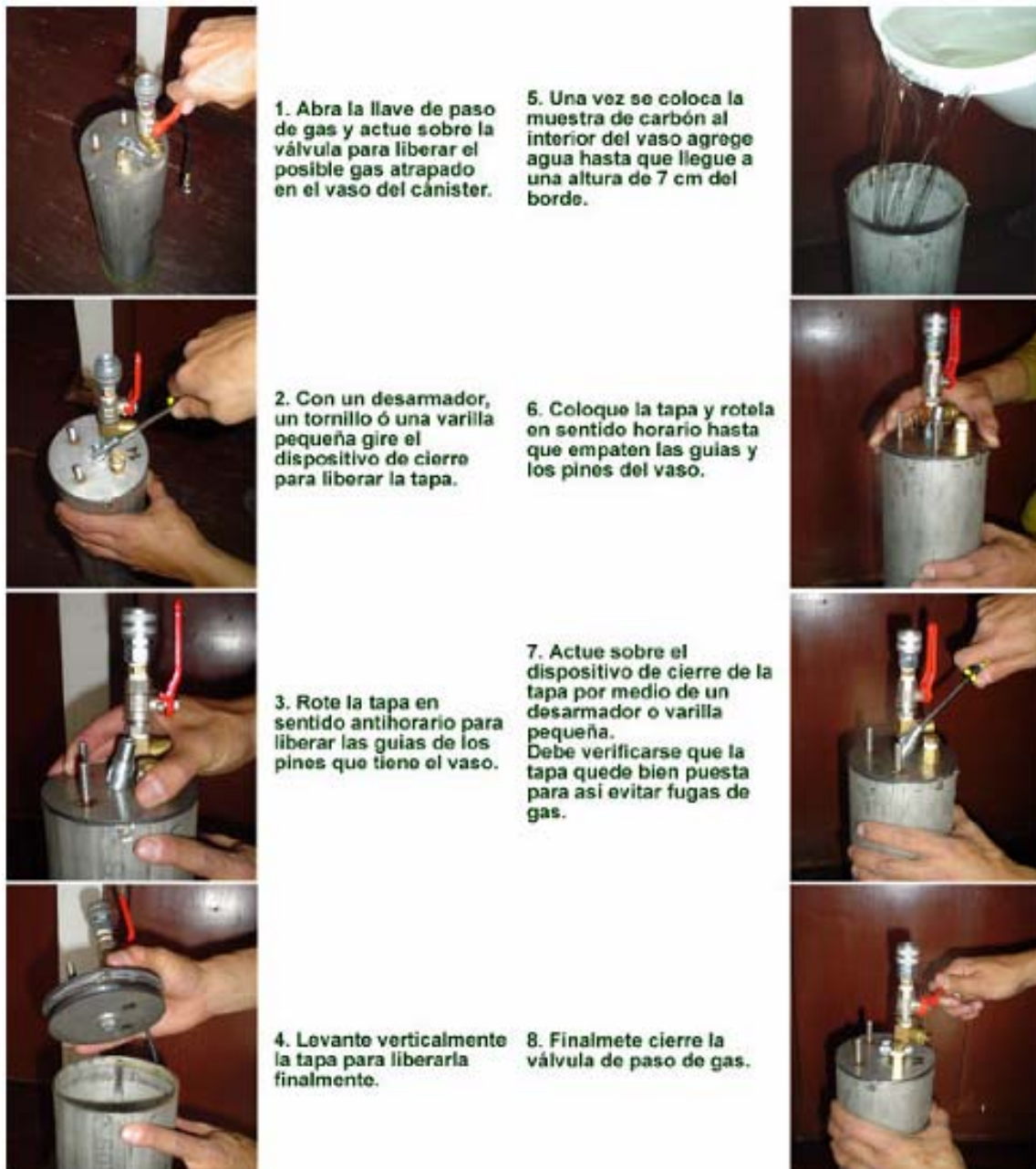


FIGURA 11. Proceso de carga de la muestra en los canisters. (Tomado de manual CGMS Centro Internacional de Física, 2006)

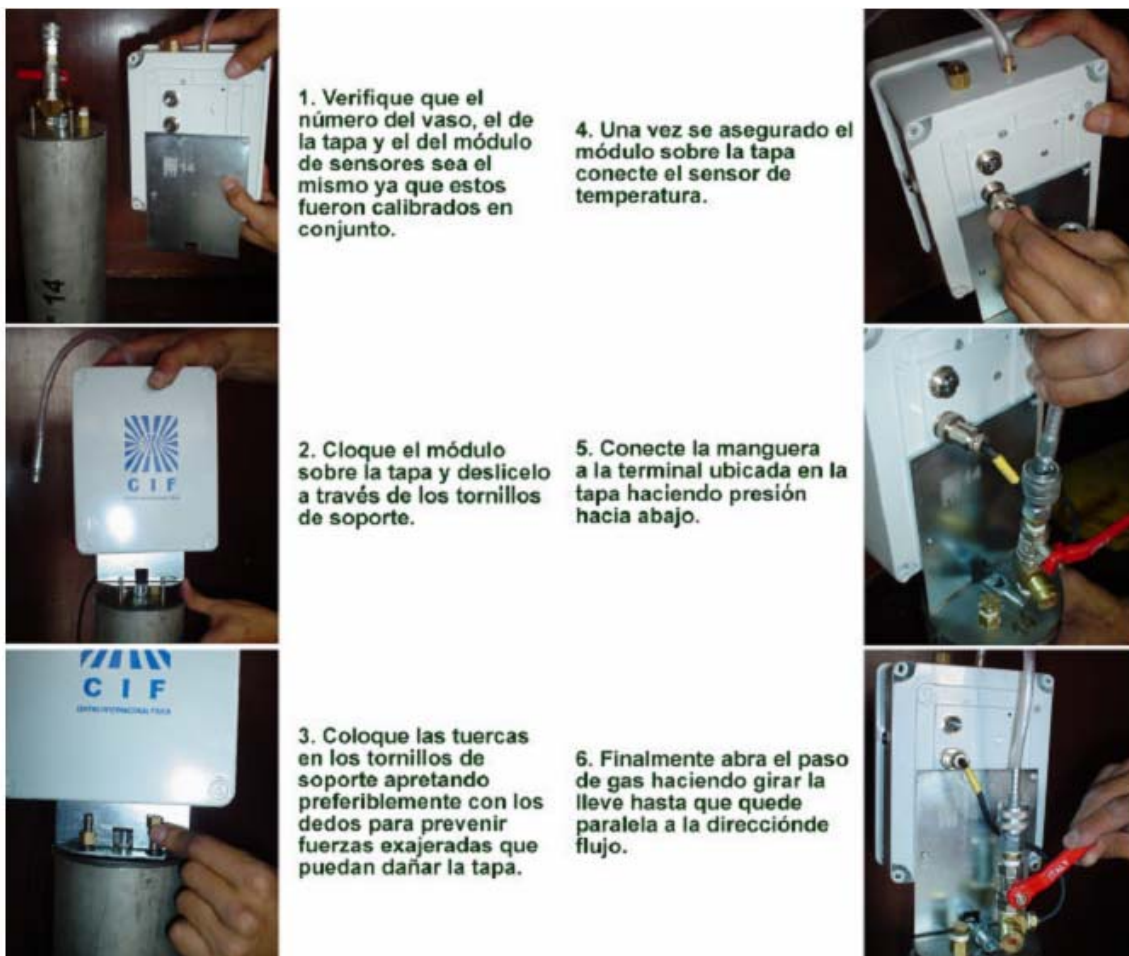


FIGURA 12. Acople de los sensores a los canisters. (Tomado de manual CGMS Centro Internacional de Física, 2006)

Análisis Cromatográfico De Gases

Con el fin de determinar los componentes de los gases expulsados por el carbón, se enviaron al laboratorio para análisis cromatográfico un total de 19 muestras, de las cuales 8 corresponden a la sección del Triunfo, 7 a Lenguaque y 4 a Montecristo.

En una cromatografía, la muestra que ha sido inyectada en la cabeza de una columna cromatográfica se volatiliza y por consiguiente los componentes son

fraccionados como consecuencia de la partición entre una fase gaseosa móvil y otra estacionaria (Gas inerte) mantenida en la columna.

Para la toma de muestras de gases se usó un contenedor al vacío, el cual fue llenado de gas por medio de la conexión de este con la válvula extractora de gas del canister mediante una aguja especial, tras el cambio de presión impulsa el gas hacia el recipiente.

La caracterización y cuantificación de los gases de hidrocarburos C1 a C5 obtenidos, se realizó en un cromatógrafo de gases Hewlett Packard modelo HP 6890 series GC System PLUS +, equipado con un detector de ionización de llama (FID) y un detector de conductividad térmica (TCD). Se utilizaron dos columnas capilares, HP 1 y HP PLOT-Q, los métodos usados analíticos seguidos son los establecidos por Hewlett Packard (1997)

Análisis De Adsorción Isotérmica

Las pruebas de adsorción isotérmica permiten determinar la capacidad de almacenamiento del carbón en función de la temperatura y la presión. La capacidad de adsorción de una muestra de carbón depende del rango del carbón, se tiene que para carbones de mayor rango, la capacidad de adsorción es mayor. Referencia (Kim, A y Douglas, L., 1973).

Los análisis se adelantaron en el laboratorio RMB, Canadá. Se seleccionaron tres muestras correspondientes a los mantos 1, 12 y 19 de la sección el triunfo.

Modelamiento Geoquímico

El modelamiento geoquímico se llevo a cabo para el eje del sinclinal Checua-Lenguazaque y para su flanco, con el fin de determinar la variación en cuanto a la madurez en estos dos puntos.

Historias De Subsistencia

Los diagramas de subsidencia otorgan información inicial de las profundidades que existían en la cuenca a lo largo del tiempo de depositación, para construir estos diagramas se tienen en cuenta las siguientes variables: las unidades con su respectiva edad que presenta la cuenca, las discordancias presentes, hiatos deposicionales, calculo de decompactación, entre otros.

Para llevar a cabo el modelamiento geoquímico se construyó un corte balanceado de la zona de estudio con el fin de determinar los espesores de cada unidad en el sinclinal Checua-Lenguazaque, no se tomó en cuenta espesores dados por otros autores debido a la falta de continuidad lateral de las formaciones, posteriormente se ubicó en un diagrama donde el eje x corresponde a el tiempo y el eje y corresponde a el espesor (espesor actual), y se procedió a determinar el espesor inicial cada unidad, para calcular el espesor inicial se calculó la decompactación, la cual se realizó teniendo en cuenta cálculos de porosidad establecidos en tablas para cada litología, para esto se tuvo en cuenta el diagrama de Van Hinte (1978), ver figura 13, donde muestra la variación del espesor de las unidades a través del tiempo de enterramiento teniendo en cuenta la porosidad.

$$T_0 = \frac{(1-\phi_N) T_N}{1-\phi_0}$$

Ecuación determinada a partir del diagrama de Van Hinte para determinar el espesor inicial (T_0) de una unidad, T_N corresponde al espesor final.

La tasa de decrecimiento de la porosidad durante enterramiento puede ser determinada empíricamente, a continuación se da una simple relación exponencial para el cambio de porosidad en las unidades:

$$\phi_N = \phi_0 \exp(-c z)$$

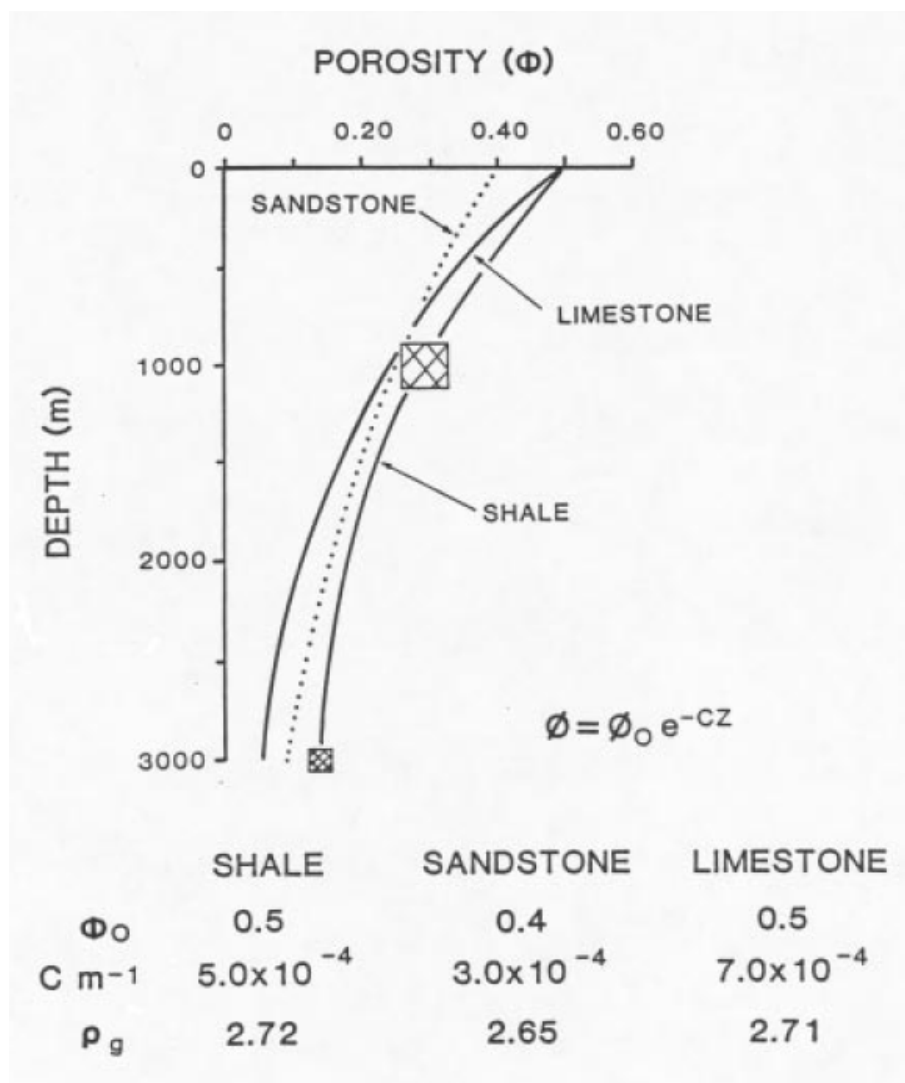


FIGURA 13. Variación de la porosidad en función de la profundidad, tabla de valores estándar para porosidades iniciales de cada litología. Tomado de Van Hinte (1978)

Diagramas De Tiempo Temperatura:

Para medir la temperatura en función del tiempo se usan dos métodos, uno teniendo en cuenta el gradiente geotérmico y el otro se basa en el flujo de calor,

este último es el que se va a usar para la construcción del diagrama ya que tiene en cuenta más variables, por lo tanto es más preciso.

TABLA 3. Corresponde a datos preestablecidos, K corresponde a la conductividad térmica, ρ_C corresponde a la densidad.

	K[mW/m-K]	ρ_C [g/cm ³]	ϕ_o	σ_c [bars]	A_T [nW/kg]
sand	4.4	2.76	0.39	1745	0.63
shale	1.5	2.76	0.35	1629	0.73
carbonate sand	2.9	2.72	0.47	814	0.15
carbonate mud	4.8	2.72	0.43	786	0.15
salt	5.4	2.16	0	10 ⁸	0

Los diagramas de Tiempo – Temperatura son graficados a partir de los datos obtenidos con la ecuación de Fourier en base a las historias de subsidencia decompactadas realizadas en el aparte anterior, la ecuación de Fourier es:

$$T_z \equiv T_0 + q \sum \frac{x}{\lambda}$$

En donde:

T_z es la temperatura del horizonte a calcular

T_0 es la temperatura superficial, la cual se estimó en 24.4 °C.

Q es el flujo de calor el cual se calculó en base a datos de temperaturas de fondo del pozo Suesca – 1, tratamiento que se llevó a cabo en trabajos de tesis anteriores y que dio como resultado un flujo de 63 mW/m².

X corresponde al espesor para cada formación, este se toma a partir de los espesores decompactados

λ Es la conductividad termica para cada litología la cual es posible obtener a partir de la ecuación de Brigaud y otros (1990): $\lambda_{roca} = (\lambda_{matriz})^{1-\phi} + (\lambda_{fluido})^{\phi}$

Donde λ_{matriz} corresponde a la conductividad que presenta cada formación dependiendo de la litología encontrada en ella, estos valores están preestablecidos en tablas generales, ejemplo ver tabla 3. λ_{fluido} es la conductividad del agua equivalente a 0.56 \approx 0.6 W/m/k; y ϕ es la porosidad calculada durante la decompactación.

Método Cinético

El método cinético (Razón de transformación, TR) según Tissot y Welte, (1984), cuantifica la cantidad de hidrocarburos generados por las reacciones químicas de transformación de kerógeno en gas. Esta cuantificación se lleva a cabo con un

modelo cinético de degradación térmica del kerógeno con incrementos de la temperatura a lo largo del tiempo.

Con el fin de llevar a cabo el método cinético se entran a analizar las dos ecuaciones de Arrhenius: $dC/dt = -kC^n$ y $K = Ae^{-E/RT}$ donde C es la concentración, t el tiempo, k la constante de la tasa de reacción, n el orden de la reacción, A el factor de frecuencia, E la energía de activación, R la constante de los gases (1.987 calorías/mol^aK) y T la temperatura absoluta en K.

La rata de transformación TR se define como la fracción de kerógeno transformado a petróleo o gas con relación al potencial genético de algún tipo específico de kerógeno y se calcula con la siguiente ecuación de Tissot y Welte (1984):

$$TR = \frac{C_i - \sum C_i}{C_o} + Y_o$$

Donde C_i es la fracción de la masa de kerógeno remanente en la reacción, $\sum C_i$ es el potencial genético o la masa de kerógeno transformada a hidrocarburos cuando la reacción esta completa; y Y_o es el aceite de origen bioquímico.

Según Tissot y Welte (1984) los valores de TR de 0.1 y 0.4 corresponden a los límites inferiores y superiores de la ventana de generación de petróleo.

INTERPRETACION DE RESULTADOS

Comprende la interpretación de datos obtenidos durante las fases anteriores y elaboración del informe final.

8. RESULTADOS

8.1. NOMENCLATURA ESTRATIGRÁFICA

En este trabajo, la nomenclatura usada corresponde a la propuesta por el estudio estratigráfico llevado a cabo en forma paralela por Rincón y Rocha (2007) en el cual se adoptó una nomenclatura unificada para los mantos de la Formación Guaduas. Los resultados de la nomenclatura se resumen en la tabla 4, 5 y 6, y están basados en la evaluación de las columnas levantadas en las secciones de Lenguazaque, Montecristo y El Triunfo (Figura 4). Los mantos muestreados corresponden a la parte baja, media y alta de la Formación Guaduas (Ver anexo 1)

TABLA 4. Resultados de nomenclatura estratigráfica para la sección del Triunfo

SECCIÓN TRIUNFO	
Nombre manto según la mina	Nombre Manto según estudio estratigráfico
Manto 1	Manto 1
Manto 2	Manto 2
Manto 3	Manto 3
Manto 4	Manto 5
Manto 5	Manto 7
Manto La Quinta	Manto 7
Manto Ciscuda	Manto 11
Manto Veta Chica	Manto 12
Manto Vidriosa	Manto 17
Manto Depósito	Manto 18
Manto 7 Bancos	Manto 19

TABLA 5. Resultados de nomenclatura estratigráfica para la sección de Montecristo

SECCIÓN MONTECRISTO	
Nombre manto según la mina	Nombre Manto según estudio estratigráfico
Manto 1	Manto 2
Manto 2	Manto 3
Manto 3	Manto 4
Manto 4	Manto 5
Manto 7	Manto 6
Veta 7	Manto 6
Veta 6	Manto 7
Veta 8	Manto 8
Manto La Quinta	Manto 8
Manto Veta Chica	Manto 9
Manto 8	Manto 9
Manto 9	Manto 10
Manto Ciscuda	Manto 10
Manto Vidriosa	Manto 12
Manto Depósito	Manto 13
Manto 7 Bancos	Manto 14

TABLA 6. Resultados de nomenclatura estratigráfica para la sección de lenguazaque

SECCIÓN LENGUAZAQUE	
Nombre manto según la mina	Nombre Manto según estudio estratigráfico
Manto Cisquera	Manto 1
Manto Cusque Sunche	Cinta 2
Manto Tesoro	Manto 2
Manto Tesorito	Manto 3
Manto Las quintas	Manto 6

Manto La 120	Manto 7
Manto Cajón 2	Manto 7
Manto Veta Chica	Manto 11
Manto Depósito	Manto 13
Manto Veta Grande	Manto 13
Manto 7 Bancos	Manto 15

8.2. CORTE GEOLÓGICO BALANCEADO

El corte geológico balanceado se realizó con el fin de determinar profundidades de los mantos de carbón contenidos en la formación Guaduas, datos necesarios para llevar a cabo los análisis de adsorción isotérmica.

También es usado para la formulación de los parámetros de espesores de Formaciones requeridos en el modelamiento geoquímico.

(Ver anexo 3)

8.3. ANALISIS DE CARBONES

Análisis Próximos

TABLA 7. Resultados de proximales sección Triunfo.

SECCION TRIUNFO				
Muestra	Humedad (% en peso)	Cenizas (% en peso)	Volátiles (% en peso)	Carbono Fijo (% en peso)
Manto 1	0,744	1,999	19,875	77,382
Manto 2	0,966	3,879	26,521	68,634
Manto 3	0,65	5,856	28,552	64,942
Manto 5	0,658	4,723	30,955	63,664
Manto 7	0,708	4,985	28,26	66,047
Manto 7	1,087	8,42	24,126	66,367
Manto 7	0,511	8,358	26,695	64,436
Manto 11	1,299	10,045	29,555	59,101
Manto 11	1,127	9,856	28,456	60,561
Manto 12	1,032	6,874	28,4	63,694
Manto 18	0,514	4,951	33,541	60,994
Manto 19	0,874	6,892	25,789	66,445

TABLA 8. Resultado de proximales sección Montecristo

SECCION MONTECRISTO				
Muestra	Humedad (% en peso)	Cenizas (% en peso)	Volátiles (% en peso)	Carbono Fijo (% en peso)
Manto 2	1,032	6,874	28,4	63,694
Manto 3	0,785	8,012	28,875	62,328
Manto 4	0,746	7,35	28,698	63,206
Manto 5	0,511	8,358	26,695	64,436
Manto 6	0,7	5,796	18,952	74,552
Manto 9	1,236	4,236	18,021	76,507
Manto 10	1,087	8,42	24,126	66,367
Manto 10	0,498	6,552	30,945	62,005
Manto 12	0,682	7,745	35,896	55,677
Manto 13	1,045	8,782	30,574	59,599
Manto 13	0,65	5,856	28,552	64,942
Manto 14	0,515	4,302	27,741	67,442
Manto 14	0,708	4,985	28,26	66,047
Manto 14	0,514	4,951	33,541	60,994
Manto 14	0,601	4,798	31	63,803

TABLA 9. Resultado de proximales sección Lenguazaque

SECCIÓN LENGUAZAQUE				
Muestra	Humedad (% en peso)	Cenizas (% en peso)	Volátiles (% en peso)	Carbono Fijo (% en peso)
Manto 1	0,789	5,986	37,778	55,447
Cinta 2	0,515	4,302	27,741	67,442
Manto 2	0,801	9,785	25,23	64,184
Manto 3	0,682	7,745	35,896	55,677
Manto 6	1,045	8,782	30,574	59,599
Manto 7	0,495	3,852	30,557	65,096
Manto 7	0,746	7,35	28,698	63,206
Manto 11	0,7	5,796	18,952	74,552
Manto 13	1,236	4,236	18,021	76,507
Manto 13	0,498	6,552	30,945	62,005
Manto 15	0,887	7,5	27,588	64,025
Manto 15	0,785	8,012	28,875	62,328

Análisis Últimos

TABLA 10. Contenidos de Azufre y TOC para el área de Montecristo

SECCION MONTECRISTO		
Manto	TOC (% en peso)	Azufre (% en peso)
Manto 2	32,39	0,2984
Manto 3	37,217	0,3001
Manto 4	39,317	0,3325
Manto 5	36,768	0,2988
Manto 6	34,042	0,3958
Manto 9	36,839	0,4725
Manto 10	33,866	1,1625
Manto 10	34,705	0,9879
Manto 12	33,914	0,6874
Manto 13	31,64	0,6785
Manto 13	33,267	0,6002
Manto 14	35,086	0,7552
Manto 14	36,594	0,7922
Manto 14	36,199	0,7654
Manto 14	33,575	0,6999

Reflectancia De Vitrinita (Ro)

Estas pruebas fueron realizadas teniendo presente la posición estratigráfica de los mantos muestreados, a lo largo de las 3 secciones donde se realizó recolección de carbones, Montecristo, Lenguazaque y El Triunfo.

Con base en los resultados de las lecturas de Ro se realizaron las siguientes medidas estadísticas que incluyen:

- Elaboración de un histograma de frecuencia.
- Cálculo del promedio.
- Cálculo de la desviación estándar.
- Valores máximos y mínimos.

Este procedimiento se realizó siguiendo la norma ASTM 274.

Se realizaron los siguientes histogramas que muestran las tendencias en cuanto a la reflectancia de vitrinita de las diferentes muestras, estos se elaboraron tomando clases o intervalos de valor de reflectancia de vitrinita en el eje x, caracterizados como:

- Intervalo 1: 0.4 – 0.49 % de Ro
- Intervalo 2: 0.5 – 0.59 % de Ro
- Intervalo 3: 0.6 – 0.69 % de Ro
- Intervalo 4: 0.7 – 0.79 % de Ro
- Intervalo 5: 0.8 – 0.89 % de Ro
- Intervalo 6: 0.9 – 0.99 % de Ro
- Intervalo 7: 1.00 – 1.09 % de Ro

Y tomando el eje y como la frecuencia. (Ver anexo 4)

Sección Montecristo

TABLA 11. Resultados de Ro Para la sección de Montecristo

Manto	2	3	4	5	?	6	9	10
Promedio	0,704	0,744	0,72	0,669	0,719	0,691	0,659	0,691
Maximo	0,767	0,78	0,762	0,723	0,759	0,739	0,733	0,747
Minimo	0,631	0,694	0,652	0,603	0,649	0,654	0,601	0,633
Desviación Estandar	0,036	0,03	0,034	0,036	0,035	0,026	0,035	0,033
Manto	10	12	13	13	14	14	14	14
Promedio	0,681	0,547	0,618	0,601	0,803	0,605	0,589	0,579
Maximo	0,742	0,605	0,703	0,645	0,88	0,547	0,635	0,631
Minimo	0,62	0,489	0,567	0,538	0,736	0,663	0,543	0,541
Desviación Estandar	0,032	0,035	0,031	0,3	0,3	0,032	0,022	0,026

Sección Triunfo

TABLA 12. Resultados de Ro para la sección del Triunfo

Manto	1	2	3	5	7	7
Promedio	0,767	0,836	0,698	0,86	0,705	0,737
Maximo	0,822	0,889	0,758	0,918	0,771	0,802
Minimo	0,697	0,786	0,644	0,809	0,658	0,686
Desviación Estandar	0,033	0,027	0,3	0,028	0,033	0,031
Manto	7	11	11	12	18	19
Promedio	0,736	0,713	0,747	0,559	0,558	0,545
Maximo	0,787	0,774	0,801	0,664	0,625	0,581
Minimo	0,658	0,646	0,708	0,511	0,505	0,497
Desviación Estandar	0,033	0,032	0,023	0,036	0,033	0,022

Sección Lenguaque

TABLA 13. Resultados de Ro para la sección del Triunfo

Manto	1	Cinta 2	2	3	6	7
Promedio	0,893	0,946	0,887	0,902	0,802	0,705
Maximo	0,971	1,01	0,948	0,975	0,867	0,751
Minimo	0,842	0,891	0,835	0,854	0,748	0,645
Desviación Estandar	0,034	0,3	0,035	0,034	0,034	0,026
Manto	7	11	13	13	15	15
Promedio	0,741	0,559	0,662	0,684	0,502	0,694
Maximo	0,809	0,664	0,738	0,737	0,548	0,74
Minimo	0,707	0,511	0,613	0,619	0,463	0,652
Desviación Estandar	0,036	0,036	0,032	0,033	0,02	0,023

Con el fin de observar la variación de Ro a lo largo de la columna estratigráfica, se plotearon los datos de Ro en una gráfica donde el eje y corresponde a la profundidad de la muestra y el eje x corresponde al valor de Ro. Ver tablas 14, 15 y 16.

TABLA 14. Variación de Ro con profundidad para la sección del Triunfo

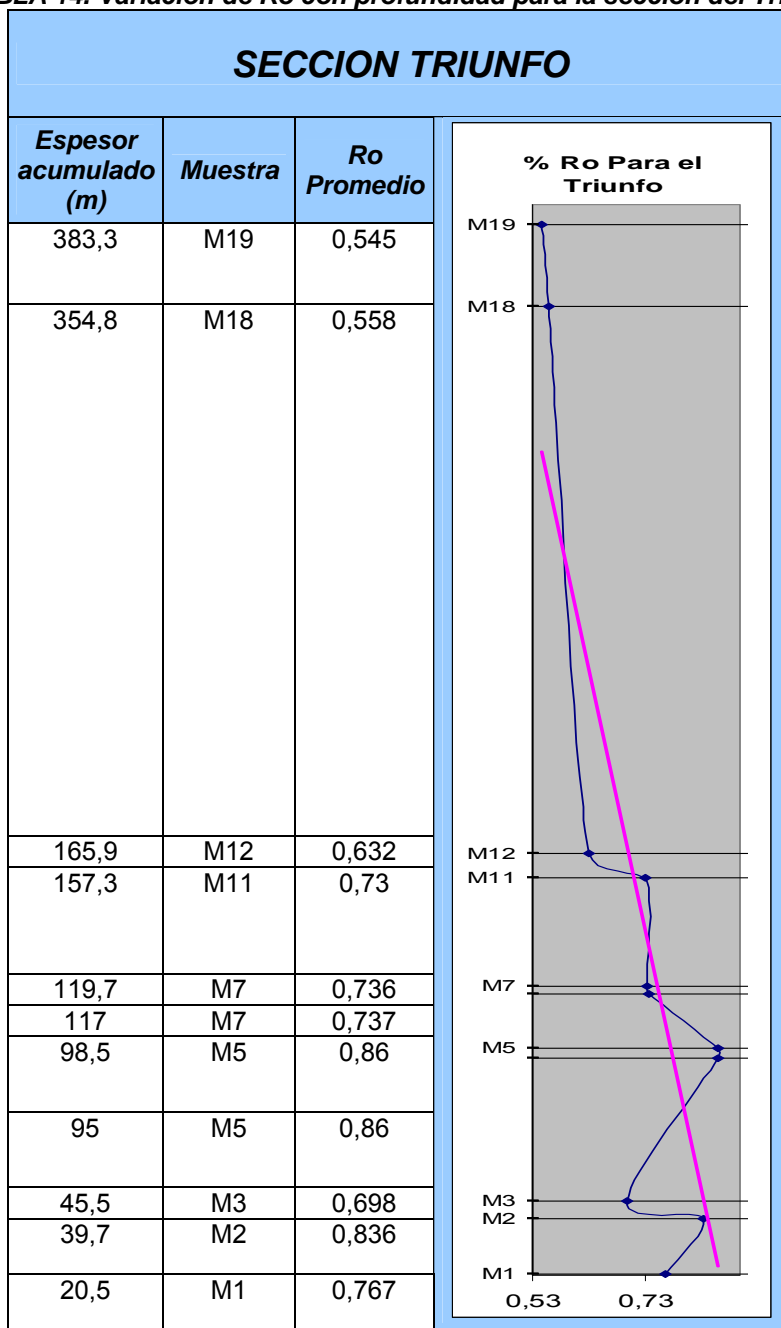


TABLA 15. Variación de Ro con respecto a la profundidad para la sección Montecristo

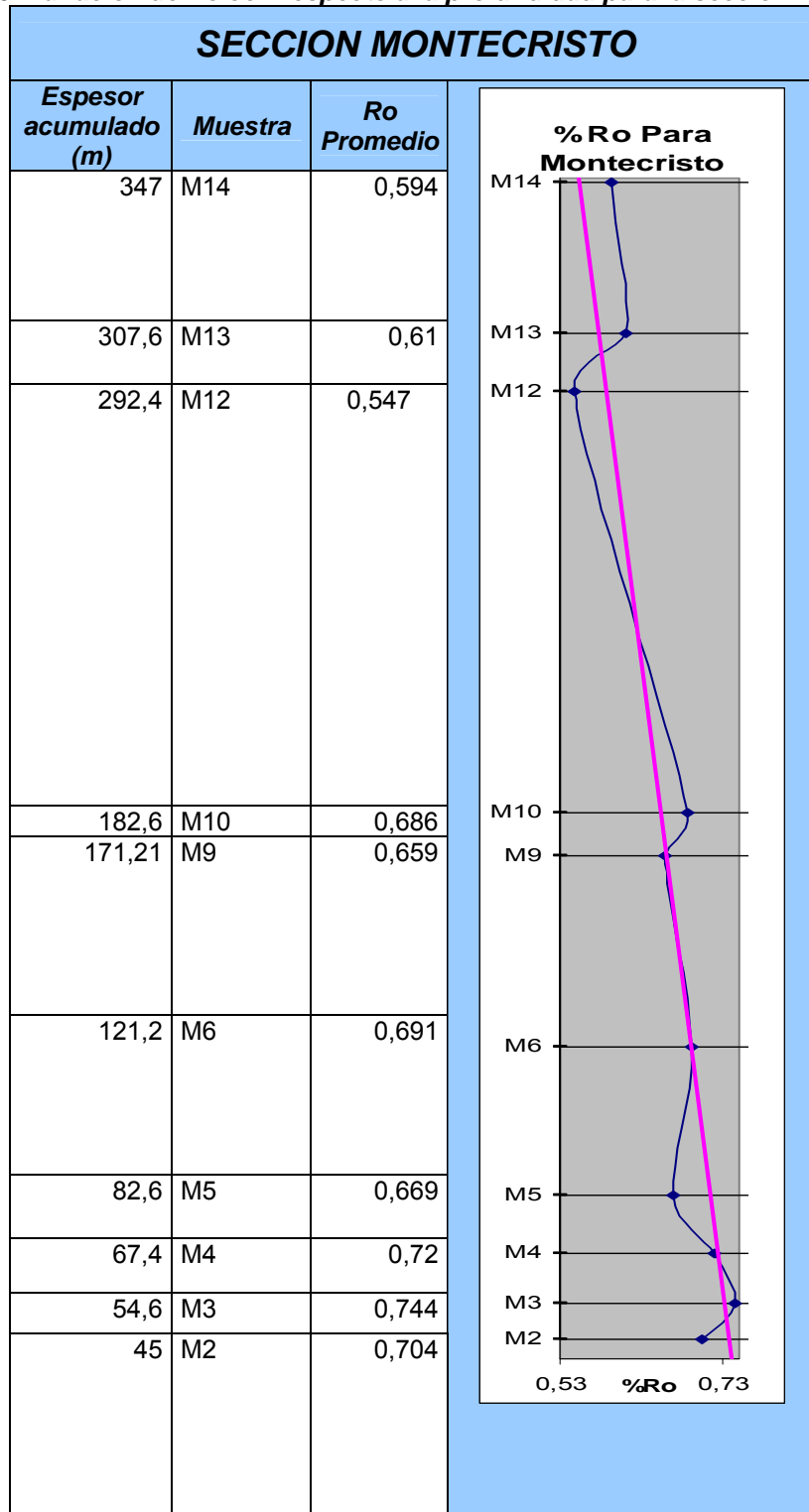
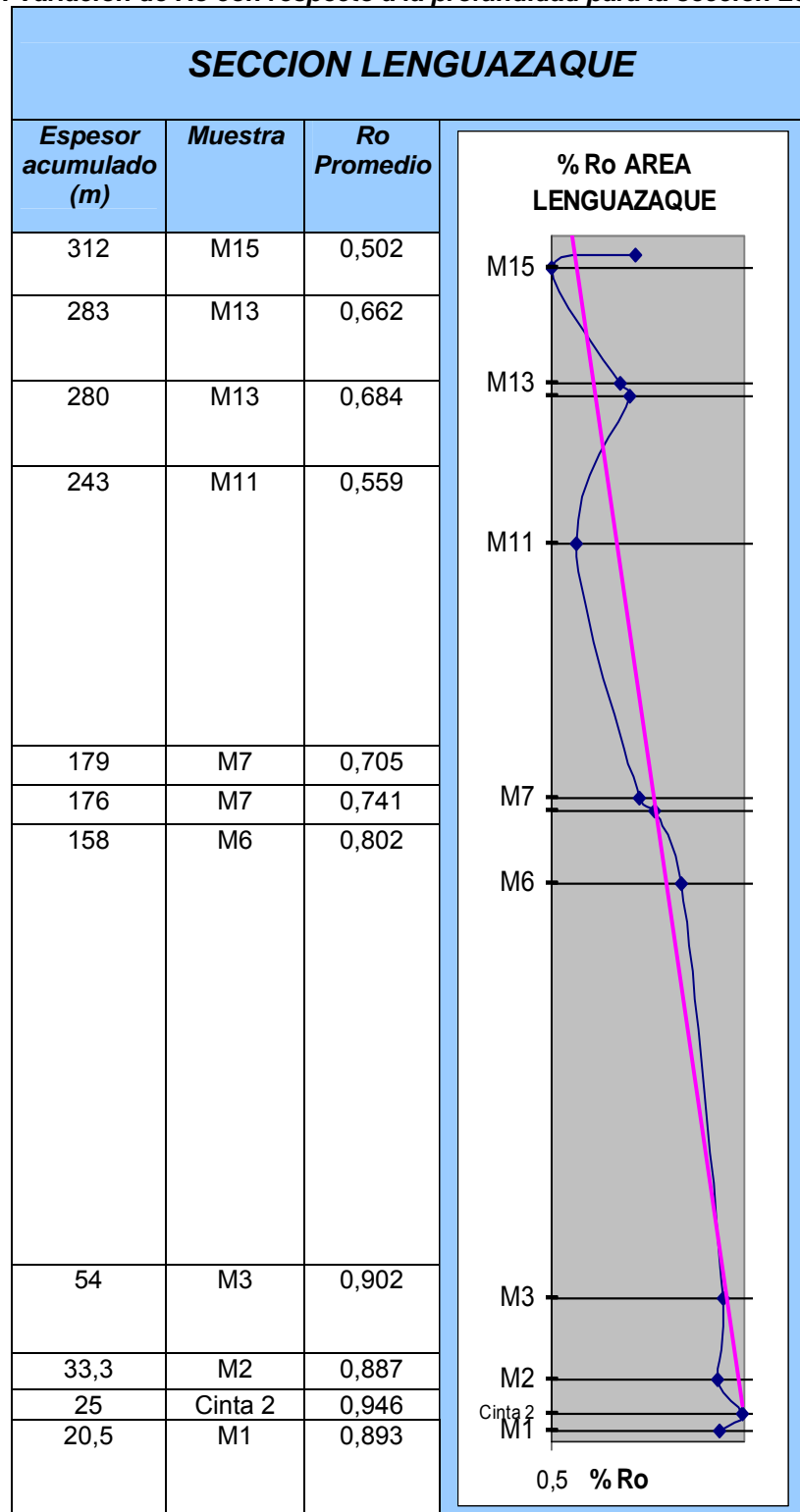


TABLA 16. Variación de Ro con respecto a la profundidad para la sección Lenguazaque



Degasificación De Muestras

Los datos que sirven como parámetros al momento de procesar los gráficos son las presiones y las temperaturas donde se tomaron las muestras y donde se abrieron las válvulas para empezar a cuantificar el gas.

TABLA 17. Datos de presión y temperatura para canisters

UBICACIÓN	PRESIONES (Kbar)	TEMPERATURAS (°C)
UBATE	752	18°C
BUCARAMANGA	904	24°C

Las tablas 18, 19 y 20 muestran la ubicación y profundidad de los mantos en los cuales se llevó a cabo el proceso de degasificación.

TABLA 18 Datos de los canisters para la sección Triunfo

SECCIÓN TRIUNFO						
Número Canister	Nombre Manto	Nombre de la mina	COORDENADAS			PROFUNDIDAD (m)
			X	Y	Z	
4	19	La Toma	1026893	1067762	2908	44,5
11	18	La Toma	1026904	1067818	2934	73,1
5	12	La esperanza	1025254	1067664	2936	154,4
1	11	La esperanza	1025295	1067706	2925	204,3
8	7	La esperanza	1025254	1067664	2936	181,6
2	7	Penagos	1024824	1067353	2881	93,5
14	5	Penagos	1024731	1067402	2881	184,1
45	5	Penagos	1024731	1067402	2881	184,1

TABLA 19. Datos de los canisters para la sección de Montecristo.

SECCION MONTECRISTO						
Número Canister	Nombre Manto	Nombre de la mina	COORDENADAS			PROFUNDIDAD (m)
			X	Y	Z	
41	9	Montecristo	1030520	1070506	2674	143,4
44	6	Montecristo	1030384	1070506	2674	176,8
43	3	Montecristo	1030277	1070767	2678	193,9
42	2	Montecristo	1030277	1070767	2678	145,4

TABLA 20. Datos de los canisters para el área de Lenguazaque.

LENGUAZAQUE						
Número Canister	Nombre Manto	Nombre de la mina	COORDENADAS			PROFUNDIDAD (m)
			X	Y	Z	
12	15	Indeterminada	1035098	1076135	2787	109,601551
3	13	Luis Chiquita	1039878	1080417	2656	157,602151
9	11	Indeterminada	1034395	1075670	2728	76,6044443
10	7	Cajón 2	1039744	1080767	2591	181,261557
13	3	Cajón	1039390	1080658	2630	70,9209678

Los datos encontrados para canisters se resumen en la tabla 21,

TABLA 21. Volúmenes totales registrados por las muestras de carbón sometidas a degasificación.

Sección	Manto	Volumen Total (cm³)	Espesor Acumulado (m)
Montecristo	2	3149,62	42
Montecristo	3	292,4	54,6
Montecristo	6	249,91	121,2
Montecristo	9	66,42	171,21
Triunfo	5	1436,39	95
Triunfo	5	352,25	95
Triunfo	12	3432,2	165,9
Triunfo	18	292,4	354,8
Triunfo	19	584,3	383,3
Lenguazaque	13	240,58	283

Las figuras 14 y 15 exponen las cantidades y tendencias de emisión de gas por parte de las muestras sometidas las pruebas de degasificación en las secciones de Montecristo y el Triunfo. Debido a que en la sección de Lenguazaque solo uno de los mantos muestreados arrojó contenidos de satisfactorios de gas, no se realizan gráficos estadísticos.

El software diseñado por el Centro Internacional de Física, genera unas gráficas de la variación lineal de la cantidad de gas expulsado con respecto al tiempo. (Ver anexo 5).

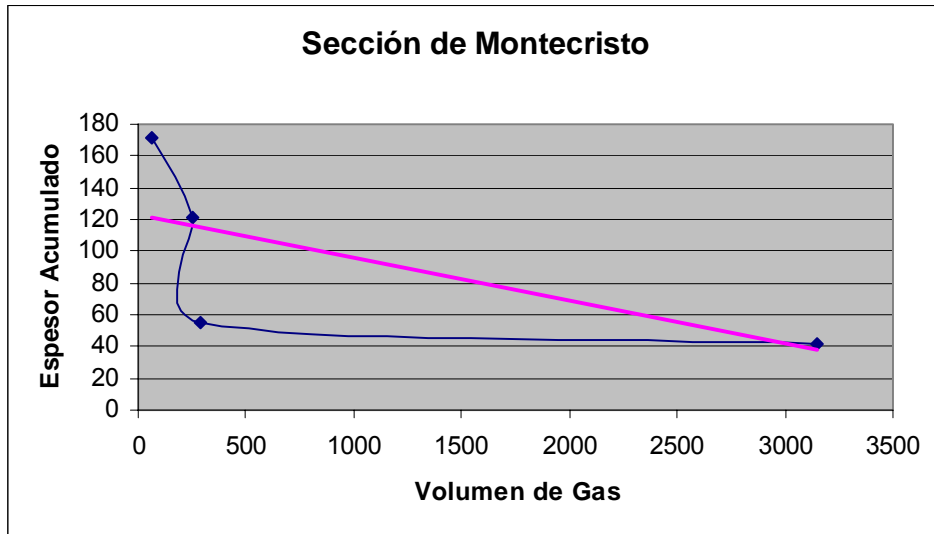


FIGURA 14. Volumen de gas emitido Vs espesor acumulado para la sección de Montecristo

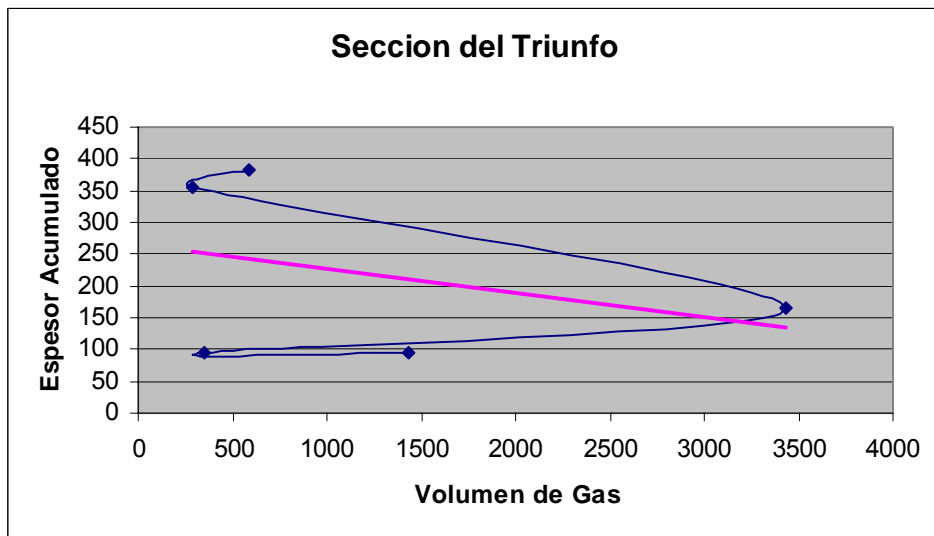


FIGURA 15. Volumen de gas emitido Vs espesor acumulado para la sección del Triunfo

Análisis De Cromatografía Gases

En el análisis realizado a los gases para determinar su composición se encontraron hidrocarburos C1 a C5 en proporciones variables en todas las muestras de carbón.

Para analizar la variación de los gases en relación con la profundidad, se trazaron gráficos donde el eje x corresponde a las cantidades en ppm de los gases

encontrados y el eje y corresponde a los mantos en profundidad, estos resultaron se compraron con los resultados de Ro y materia volátil previamente analizados. Las curvas azules representan la variación de los datos en profundidad, y la línea rosa representa la tendencia lineal de los datos.

TABLA 22. Contenido de gases para la sección de Triunfo, el contenido esta en ppm.

SECCIÓN TRIUNFO									
Muestra	Metano	Etano	Eteno	Propano	Propileno	Isobutano	N-Butano	1-Buteno	N-Pentano
M19	32639,70	4,15	0,34	0,18	0,36	0,14	0,13	0,19	4,34
M18	31245,04	7,94	3,07	1,47	2,77	1,36	1,24	1,24	15,63
M12	2078,78	2,20	0,46	0,27	0,47	0,24	0,21	0,10	0,72
M11	236,20	6,87	2,98	1,74	3,07	1,56	1,41	0,78	4,80
M7	112057,20	50,44	3,38	1,79	3,23	1,60	1,45	0,83	11,70
M7	374,43	7,29	3,21	1,73	3,11	1,63	1,45	0,96	8,12
M5	194205,54	560,96	2,13	1,71	2,00	1,08	0,93	0,53	5,61
M5	480057,41	394,65	3,57	2,20	3,37	1,68	1,67	0,80	7,38

TABLA 23, Contenido de gases para la sección de Montecristo, el contenido de gases se encuentra en ppm

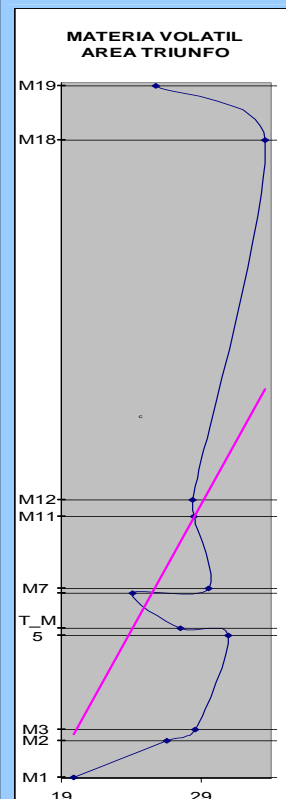
SECCION MONTECRISTO									
Muestra	Metano	Etano	Eteno	Propano	Propileno	Isobutano	N-Butano	1-Buteno	N-Pentano
M9	30245,64	10,77	0,28	0,19	0,35	0,15	0,15	0,08	0,52
M6	631821,64	2099,44	2,99	2,76	2,41	1,35	1,16	0,63	4,37
M3	397001,44	39,42	2,42	1,44	2,65	1,29	1,11	0,63	3,95
M2	50095,51	4,23	0,23	0,16	0,27	0,14	0,13	0,06	11,38

TABLA 24, Contenido de gases para la sección de Lenguaque, el contenido de gases se encuentra en ppm

SECCION LENGUAZQUE									
Muestra	Metano	Etano	Eteno	Propano	Propileno	Isobutano	N-Butano	1-Buteno	N-Pentano
M 15	8180,87	7,93	3,26	1,70	3,09	1,66	1,63	1,05	6,95
M 13	138355,05	3,78	0,63	0,36	0,73	0,31	0,29	0,19	18,48
M 13	528,48	6,42	2,52	1,59	2,65	1,46	1,29	0,84	23,60
M 11	122,71	3,53	1,61	0,91	1,76	0,86	0,74	0,47	15,70
M 7	13030,05	9,02	2,73	1,36	2,38	1,27	1,14	0,75	12,67
M 3	14083,61	7,91	3,11	1,62	3,32	1,55	1,60	0,80	6,14
M 1	350,86	6,57	3,04	1,56	3,10	1,45	1,29	0,72	7,12

TABLA 25. Variación de %Ro y % de materia volátil con relación a la profundidad en el área del Triunfo.

SECCION TRIUNFO				
Espesor (m)	Muestra	Ro		% Materia Volátil
383,3	M19	0,545		25,789
354,8	M18	0,558		33,541
165,9	M12	0,632		28,4
157,3	M11	0,73		28,456
119,7	M7	0,736		29,555
117	M7	0,737		24,126
98,5	M5_14	0,86		27,4775
95	M5_45	0,86		30,955
45,5	T_M3	0,698		28,552
39,7	T_M2	0,836		26,521
20,5	T_M1	0,767	19,875	



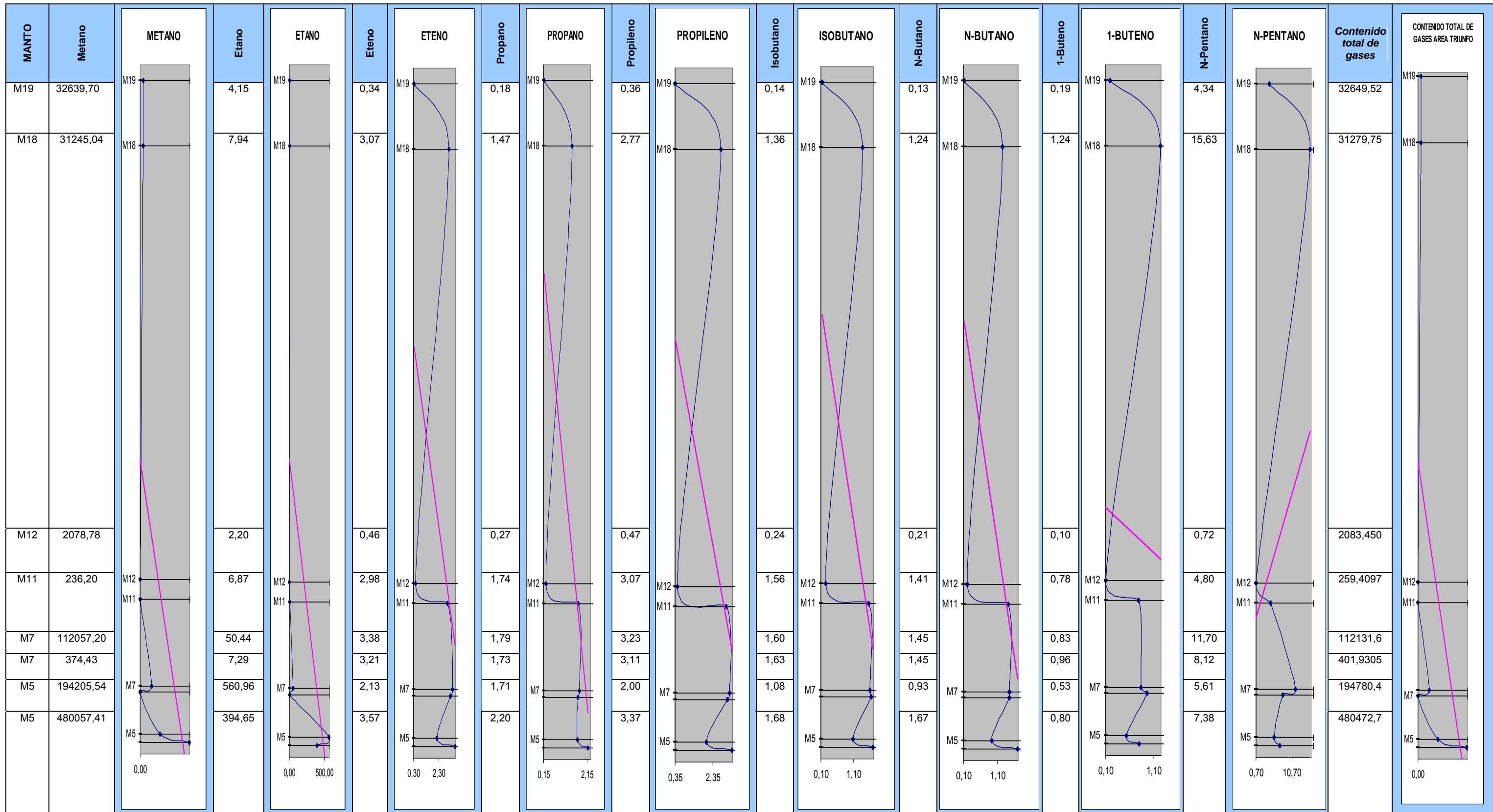


TABLA 26. Variación de gases C1- C5 en profundidad en la sección del Triunfo

TABLA 27. Variación de % Ro y % de Materia volátil con relación a la profundidad de los mantos en la sección de Montecristo.

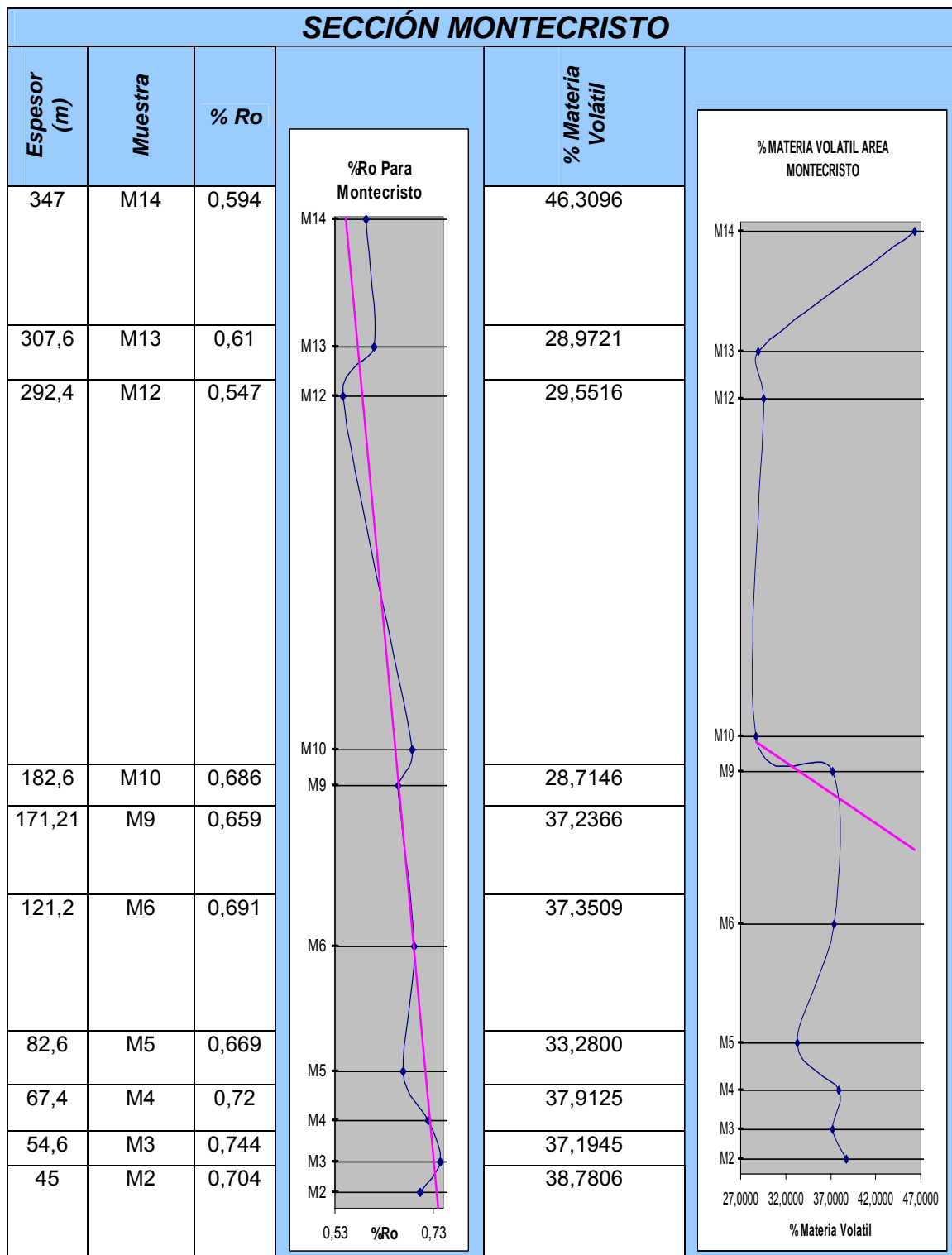


TABLA 28. Variación de gases C1- C5 en profundidad en la sección de Montecristo.

MANTO	Metano	METANO	Etano	ETANO	Eteno	ETENO	Propano	PROPANO	Propileno	PROPILENO	Isobutano	ISOBUTANO	N-Butano	N-BUTANO	1-Buteno	1-BUTENO	N-Pentano	N-PENTANO	Contenido total de gases (ppm)	CONTENIDO TOTAL DE GASES (ppm)
M9	30245,64		10,77		0,28		0,19		0,35		0,15		0,15		0,08		0,52		30258,1289	
M6	631821,64		2099,44		2,99		2,76		2,41		1,35		1,16		0,63		4,37		633936,745	
M3	397001,44		39,42		2,42		1,44		2,65		1,29		1,11		0,63		3,95		397054,35	
M2	50095,51		4,23		0,23		0,16		0,27		0,14		0,13		0,06		11,38		50112,1121	

TABLA 29. Variación de % Ro y % de materia volátil con relación a la profundidad de los mantos en la sección de Lenguazaque.

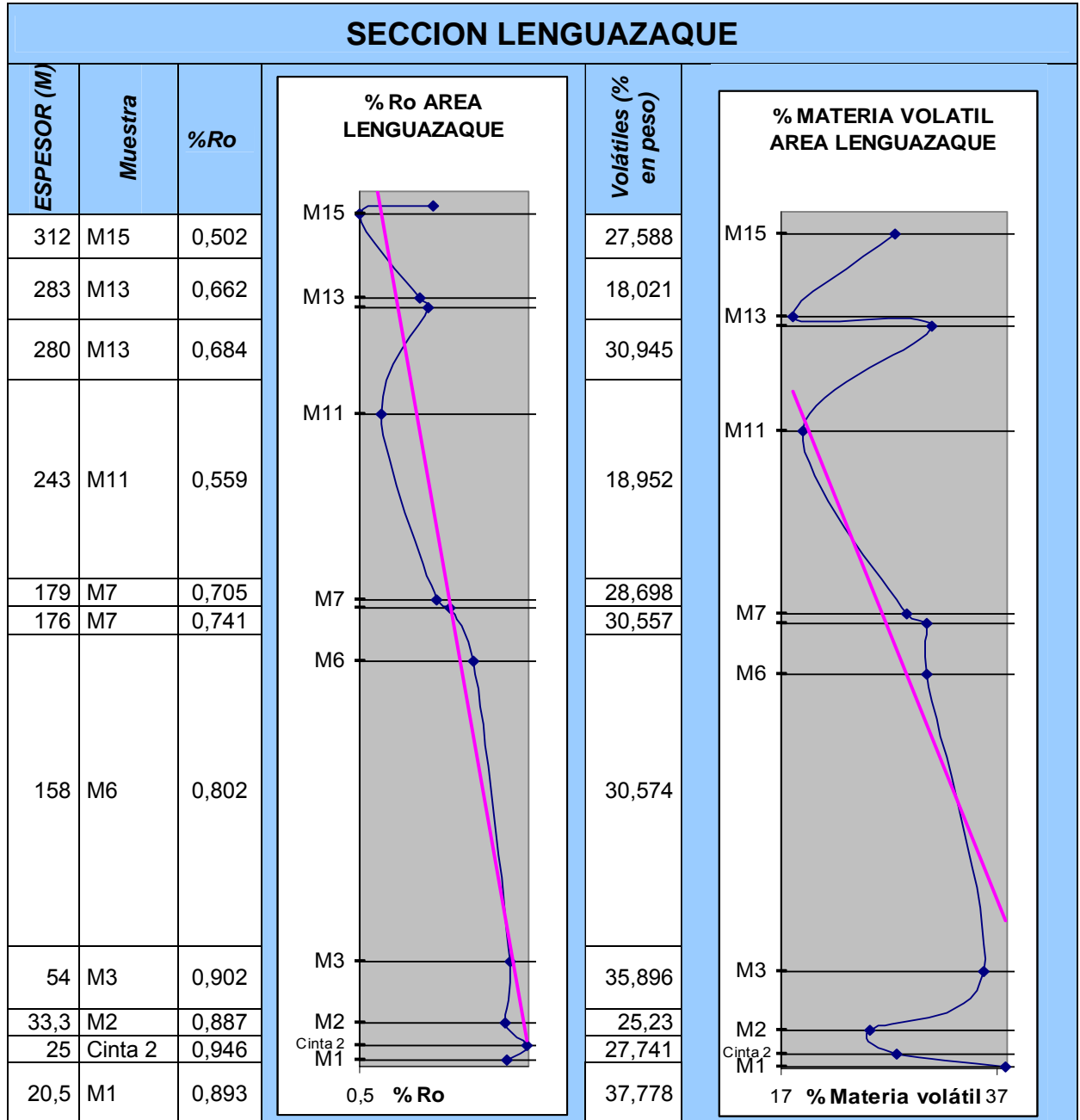
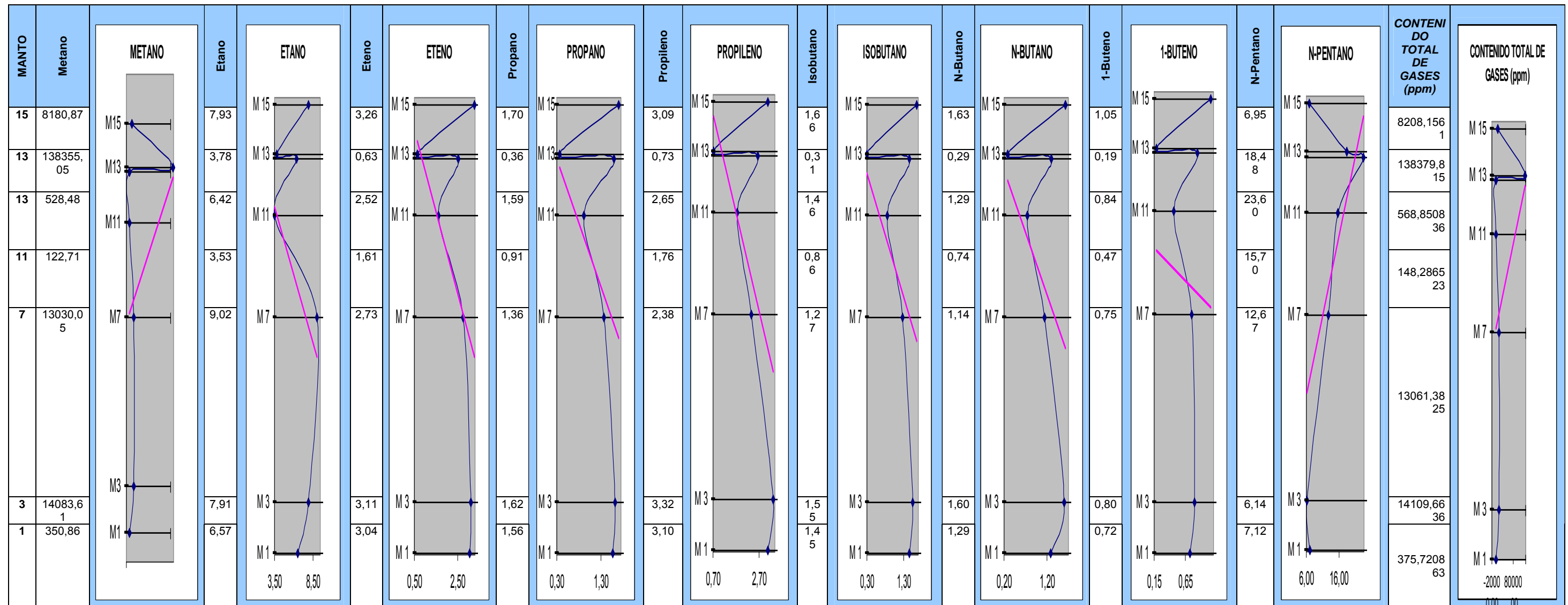


TABLA 30. Variación de gases C1- C5 en profundidad en la sección de Lenguaque.



Adsorción Isotérmica

Para análisis de adsorción se escogieron tres muestras teniendo en cuenta la profundidad del manto y el contenido abundante de gases, las muestras corresponden a la sección del Triunfo y hacen referencia al manto 1, manto 12 y manto 19, los cuales estratigráficamente corresponden a la parte inferior, media y superior de la sección respectivamente.

Para obtener los máximos valores de adsorción de cada una de las muestras analizadas, se utiliza la expresión:

$$\text{MCGA} = 0,403 * (\text{profundidad manto} / 0,305),$$

Donde:

MGCA equivale a la máxima cantidad de gas adsorbido

0,4332 = Gradiente de presión Hidrodinámica para aguas frescas

0,305 = Factor de conversión de pies a metros

Manto 1 Area el Triunfo

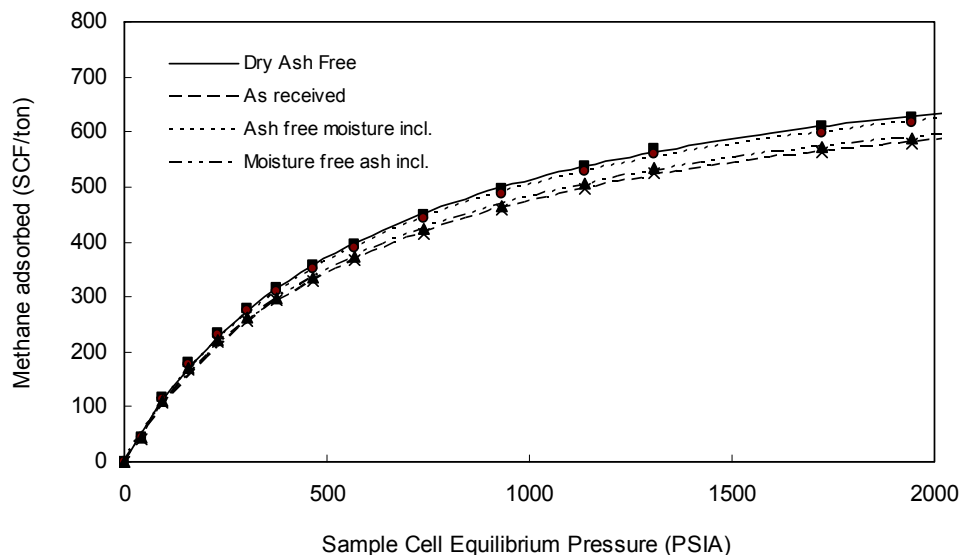


FIGURA 16. Curva de adsorción isotérmica para el manto 1.

TABLA 31. Parámetros de análisis de adsorción manto 1 Sección Triunfo

RESUMEN DE LOS PARAMETROS PARA ANALISIS DE ADSORCION					
Isotherm Temperature:		40,0°C			
% Ceniza	2,25	%Humedad	1,62	Density g/cc	1,288

Los resultados obtenidos indican que el manto 1 cuya profundidad es de 1600 metros tiene una capacidad teórica de adsorción de gas de 2271,5 Libras.

Manto 12 el Triunfo

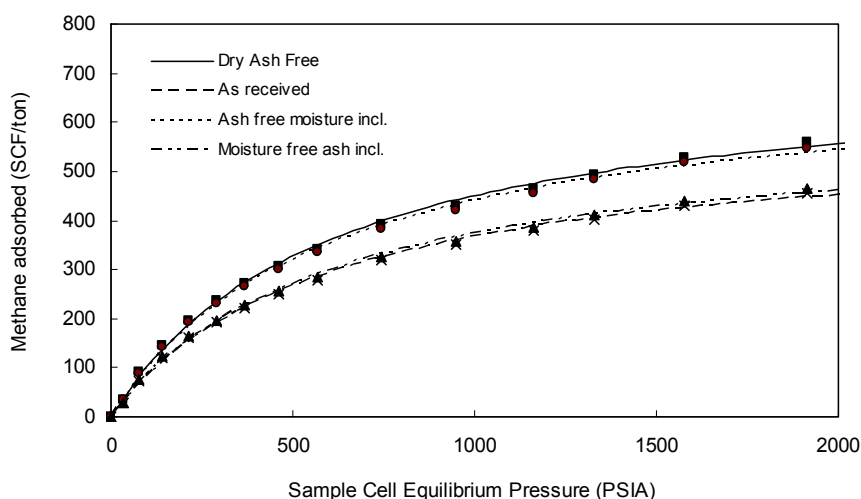


FIGURA 17. Curva de adsorción isotérmica para el manto 12 en la sección del Triunfo.

TABLA 32. Parámetros de análisis de adsorción manto 12 Sección Triunfo

RESUMEN DE LOS PARAMETROS PARA ANALISIS DE ADSORCION					
Isotherm Temperature:		40,0°C			
% Ceniza	6,69	%Humedad	1,84	Density g/cc	1,353

Los resultados obtenidos indican que el manto 12 cuya profundidad es de 1250 metros tiene una capacidad teórica de adsorción de gas de 1774,6 Libras.

Manto 19 Area el Triunfo

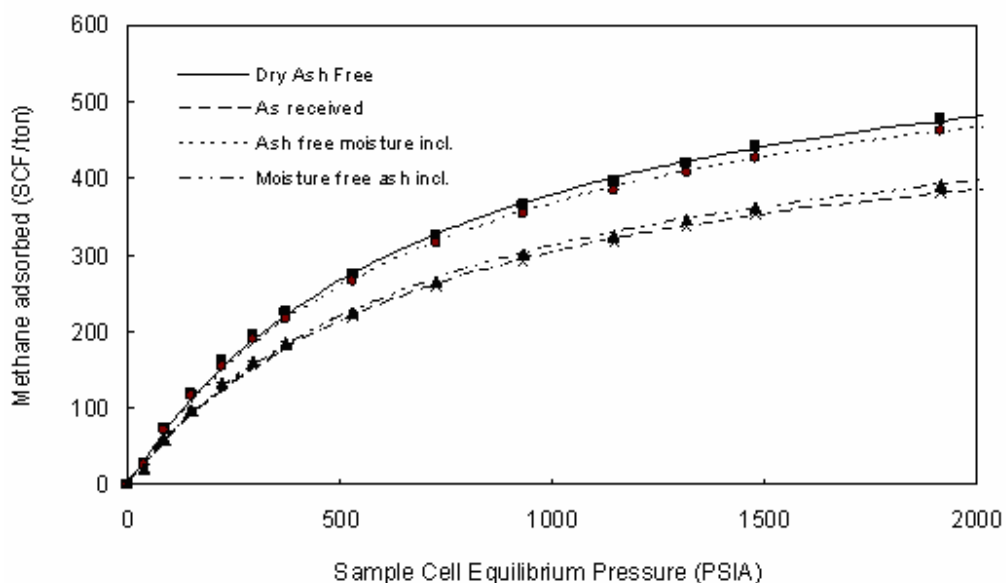


Figura 18. Curva de adsorción isotérmica para el manto 19, sección el Triunfo.

TABLA 33. Parámetros de análisis de adsorción manto 19 Sección Triunfo

RESUMEN DE LOS PARAMETROS PARA ANALISIS DE ADSORCION					
Isotherm Temperature:			40,0°C		
% Ceniza	7,42	%Humedad	2,65	Density g/cc	1,407

Los resultados obtenidos indican que el manto 19 cuya profundidad es de 950 metros tiene una capacidad teórica de adsorción de gas de 1348,7 Libras.

8.4. MODELAMIENTO GEOQUIMÍCO

El modelamiento se usa para analizar diferentes escenarios para la evolución de la cuenca de Bogotá. Se tiene como fin determinar modelos de expulsión y generación de hidrocarburos teniendo en cuenta la variación termal y la historia erosiva de la cuenca, el modelamiento se llevó a cabo tanto para el centro del sinclinal como para el flanco occidental del mismo, en los cuales como es de esperarse, la rata de levantamiento y erosión afectó mas al centro del sinclinal que a sus flancos.

Los siguientes parámetros fueron fundamentales en el desarrollo del modelamiento, se usó un flujo de calor transitorio de 61 mW/s^2 dato hallado por temperaturas de fondo en el pozo Suesca – 1 en trabajos anteriores, con una temperatura superficial de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ la cual fue medida en el área de estudio. Estos datos de flujo de calor se toman teniendo en cuenta el tipo de cuenca y la evolución termal a la cual ha estado expuesta.

A nivel de maduración se tienen 5 rangos basados en el porcentaje de R_o : Zona inmadura, R_o menores de 0,5%; temprana maduración, R_o entre 0,5% a 0,7 %, mediana maduración, R_o entre 0,7% a 1,0 %; maduración tardía, R_o entre 1,0 % a 1,3 %; y principal generación de gas sobre valores de 1,3 % R_o .

Inicialmente se construyeron historias de enterramiento 1D, las cuales fueron reconstruidas de la estratigrafía y litología presente en la cuenca, los eventos erosivos se estimaron teniendo en cuenta el levantamiento de la cordillera y la inexistencia de depósitos Paleógenos en el área de estudio.

CENTRO DEL SINCLINAL:

TABLA 34. Datos usados para el diagrama de soterramiento decompactado y para el modelamiento total para el centro del sinclinal.

EDAD	FORMACION	DISCORDANCIAS	LITOLOGIA	ESPESOR ACTUAL (metros)	ESPESOR EROSIONADO (metros)	TIPO DE KEROGENO	% TOC
12,5		Erosión			-1000		
27	Formación Usme		Conglomerados	0	500		
37	Formación Regadera		Areniscas	0	400		
40		Erosión			-400		
45	Formación Bogotá		Areniscas	150	250		
58	Formación Cacho		Areniscas	150			
65		Erosión			-200		
70	Formación Guaduas		Lodolitas con carbón	1250		Tipo III	60
72	Formación Arenas de Labor y Tierna		Areniscas	400			
80	Formación Plaeners		Liditas	350			
88	Formación Arenisca Dura		Areniscas	150			
95	Formación Chipaque		Shale	1075		Tipo II	3
100		Erosión			-50		
102	Formación Une		Shale	950			
110	Formación Fomeque		Shale	1000			
120	Areniscas de Las Juntas		Areniscas	850			
131	Lutitas de Macanal		Lutitas	2935		Tipo II	3
135	Calizas del Guavio		Calizas	1000		Tipo II	3

TABLA 35. Parámetros de porosidad y permeabilidad para las Fm. De la cuenca de Bogota.

Unidad Estratigrafica	Porosidad (fraccion)	Permeabilidad (factor)
Fm.Bogota	0.52	0.36
Fm.Chipaque	0.59	0.49
Fm.Fomeque	0.60	0.49
Fm.Lutitas Macanal	0.59	0.22
Fm.Las Juntas	0.46	0.26
Fm.Regadera	0.46	0.26
Fm.Tilata	0.45	0.27
Fm.Plaeners	0.6	0.22
Fm.Calizas del Guavio	0.59	0.23
Fm.Une	0.45	0.27
Fm.Arenisca Dura	0.48	0.27
Fm.Arenisca Tierna	0.47	0.31
Fm.Guaduas	0.53	0.40
Fm.Cacho	0.45	0.27
Fm.Usme	0.50	0.34

Centro del sinclinal

CMP=SC;TH=SHF;MAT=SIM
TG=1;TI=3;EXP=None;PRM=MKC

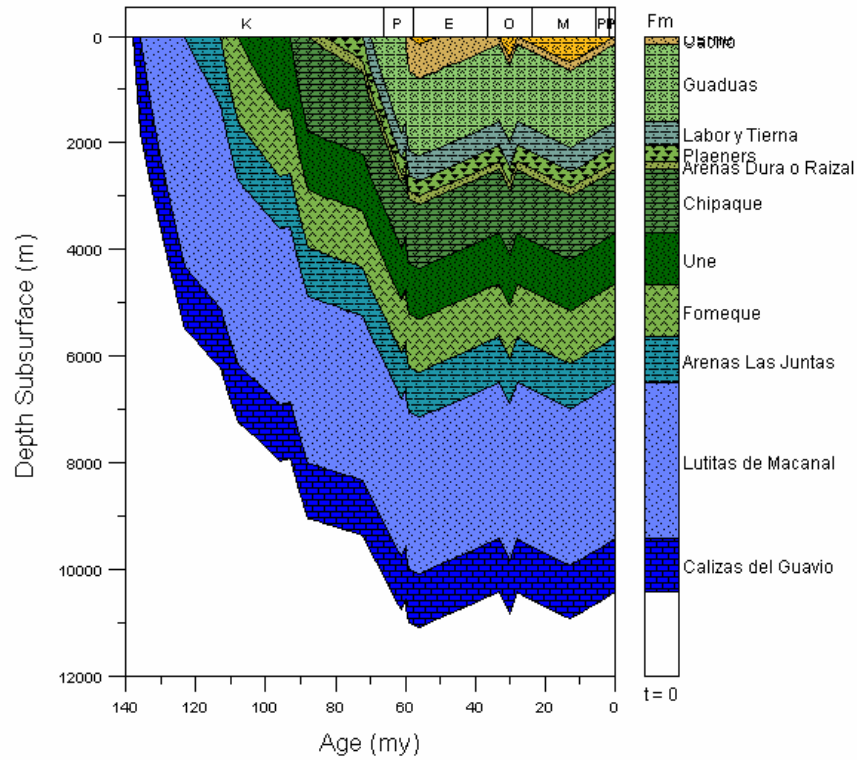


FIGURA 19. Diagrama de Soterramiento decompactado para el centro del Sinclinal de Checua Lenguaque

Tanto para el centro del sinclinal como para el eje del mismo, se construyó un diagrama de tiempo versus temperatura teniendo en cuenta la ecuación de Fourier que presenta variables de conductividad térmica, temperatura superficial y flujo de calor, la conductividad térmica para cada formación se estimó a partir de la tabla 3, se encontró que en profundidad cada formación presenta variabilidad en la conductividad, Figura 20 a. Así mismo por cambios en presión cada formación presenta cambios de temperatura en profundidad Figura 20 b.

B.

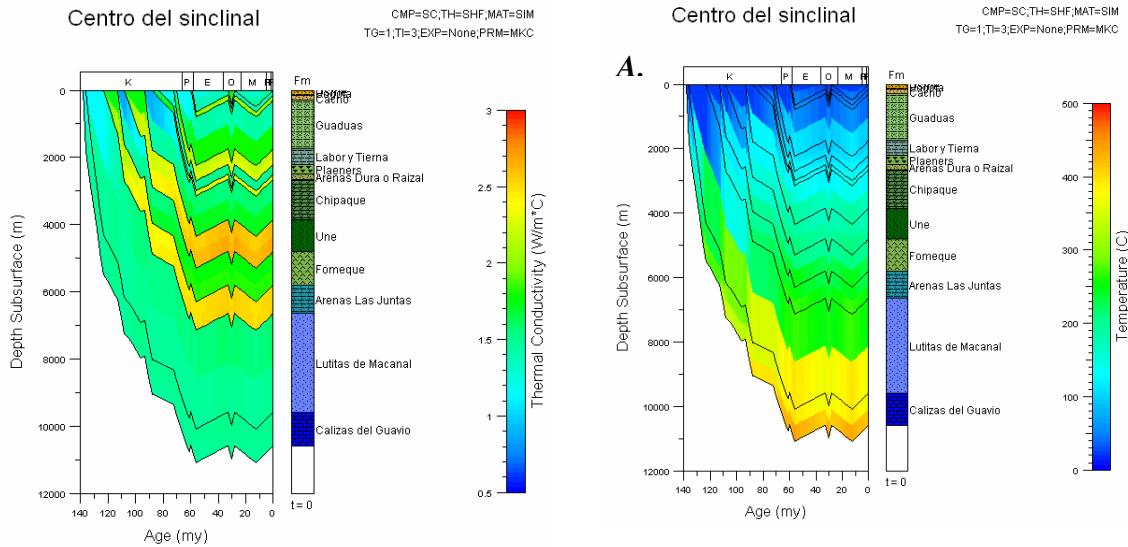


FIGURA 20. A. Variabilidad de la conductividad térmica por edades para cada formación en relación con la profundidad. B. variabilidad de la temperatura para cada Formación, teniendo en cuenta la edad y la profundidad.

A partir de los diagramas anteriores se construye el diagrama tiempo vs Temperatura, el cual plotea en un grafico resultados de temperatura presente en la Formación Guaduas a lo largo del tiempo. (Figura 21)

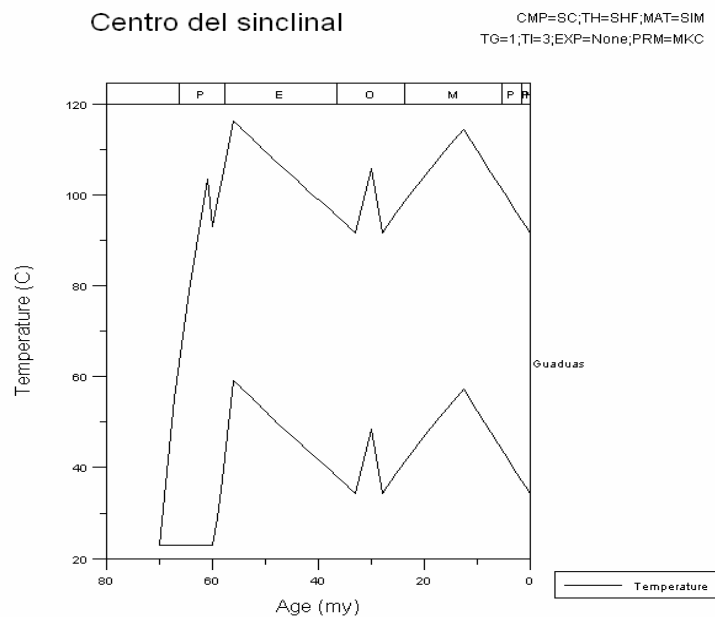


FIGURA 21. Diagrama de Tiempo vs Temperatura para el centro del Sinclinal

El diagrama de tiempo – temperatura se construyó sólo para la formación Guaduas debido a que esta constituye una excelente roca fuente y además es objeto del presente estudio.

Por ultimo siguiendo el método cinético (Razón de transformación, TR) según Tissot y Welte 1984, se grafica la madurez en %Ro con relación a la profundidad y edad. (Figura 22 y23)

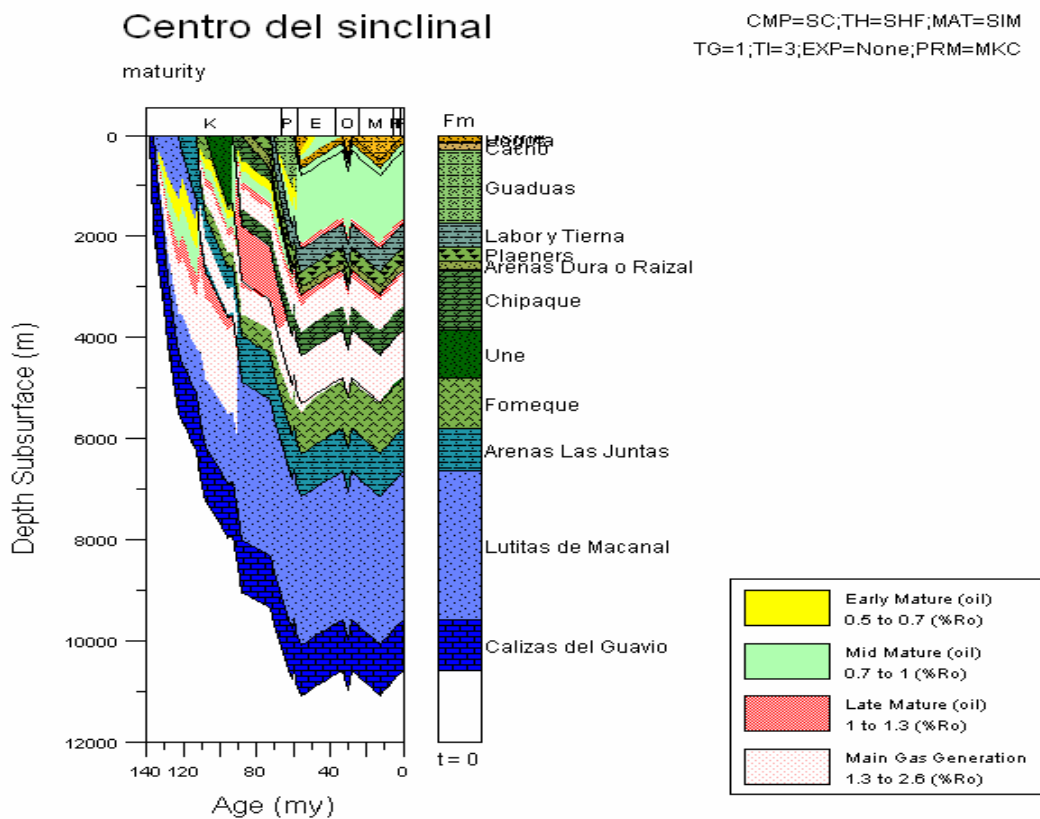


FIGURA 22. Madurez en %Ro en relación con la profundidad y edad de las formaciones del centro del Sinclinal Checua Lenguaque

Centro del sinclinal

CMP=SC;TH=SHF;MAT=SIM
TG=1;TI=3;EXP=None;PRM=MKC

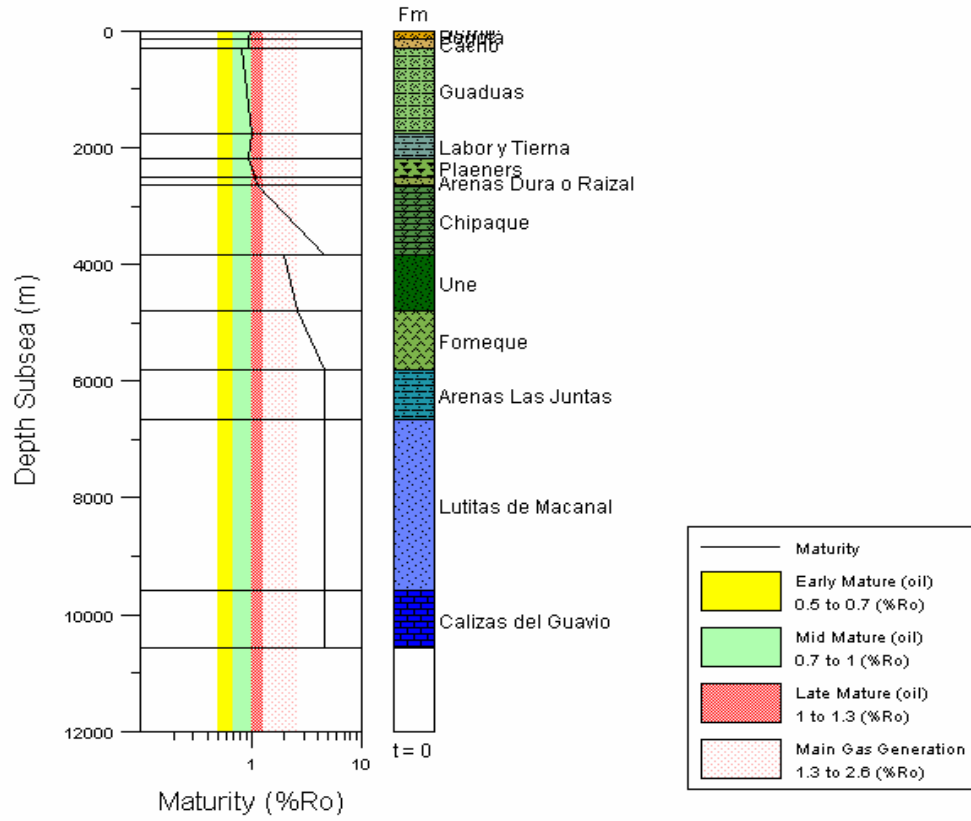


FIGURA 26. Rangos de madurez alcanzados por las Formaciones en el centro del sinclinal Checua Lenguaque.

EJE DEL SINCLINAL

TABLA 36. Datos usados para el diagrama de soterramiento decompactado y para el modelamiento total para el centro del sinclinal.

EDAD	FORMACION	DISCORDANCIAS	LITOLOGIA	ESPESOR ACTUAL (metros)	ESPESOR EROSIONADO (metros)	TIPO DE KEROGENO	% TOC
12,5		Erosión			-1000		
27	Formación Usme		Conglomerados	0	500		
37	Formación Regadera		Areniscas	0	400		
40		Erosión			-400		
45	Formación Bogotá		Areniscas	0	400		
58	Formación Cacho		Areniscas	150			
65		Erosión			-200		
70	Formación Guaduas		Lodolitas con carbón	1250		Tipo III	60
72	Formación Arenas de Labor y Tierna		Areniscas	400			
80	Formación Plaeners		Liditas	350			
88	Formación Arenisca Dura		Areniscas	150			
95	Formación Chipaque		Shale	1075		Tipo II	3
100		Erosión			-50		
102	Formación Une		Shale	950			
110	Formación Fomeque Areniscas de Las Juntas		Shale	1000			
120			Areniscas	850			
131	Lutitas de Macanal		Lutitas	2935		Tipo II	3
135	Calizas del Guavio		Calizas	1000		Tipo II	3

Flanco del sinclinal

CMP=SC;TH=SHF;MAT=SIM
TG=1;TI=3;EXP=None;PRM=MKC

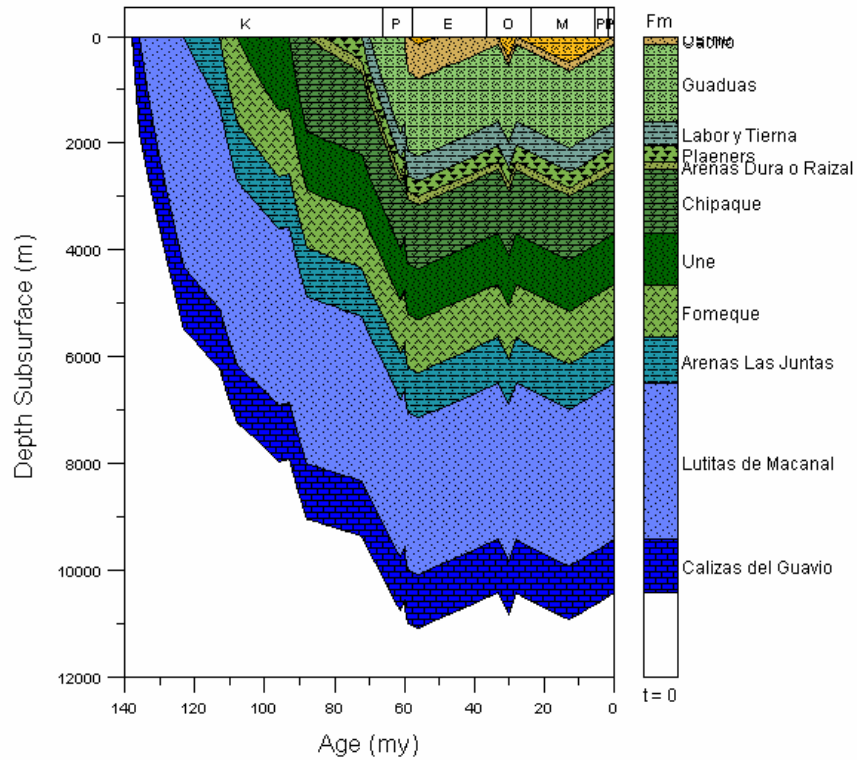


FIGURA 24. Diagrama de Soterramiento decompactado para el flanco del Sinclinal de Checua Lenguazaque

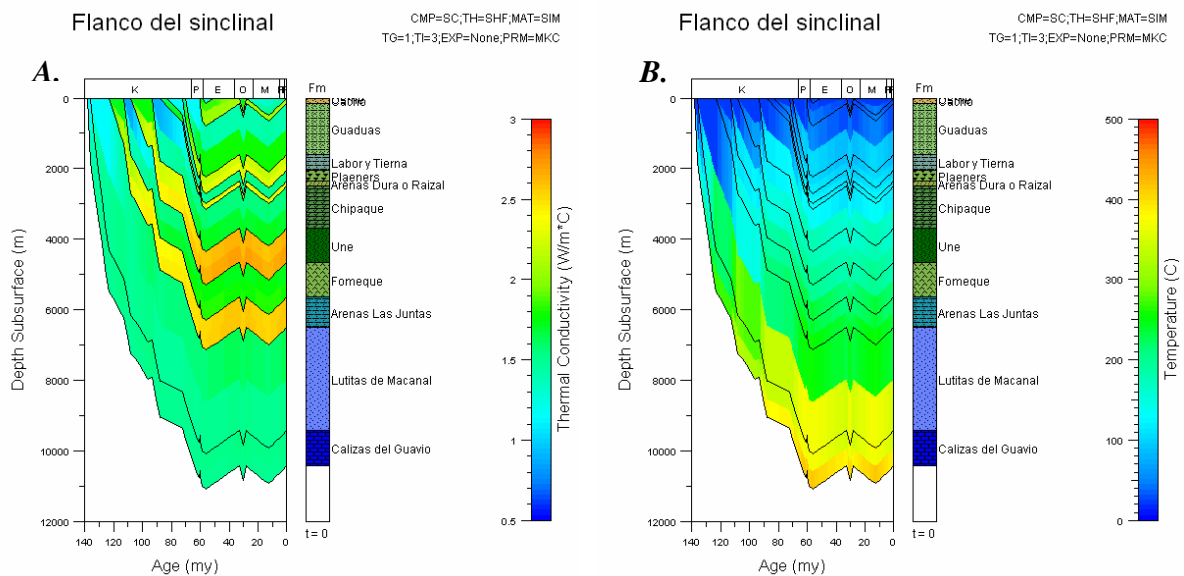


FIGURA 25 A. Variabilidad de la conductividad térmica por edades para cada formación en relación con la profundidad. B. variabilidad de la temperatura para cada Formación, teniendo en cuenta la edad y la profundidad.

Por ultimo siguiendo el método cinético (Razon de transformación, TR) según Tissot y Welte 1984, se grafica la madurez en %Ro con relación a la profundidad y edad. (Figura 26, 27 y 28)

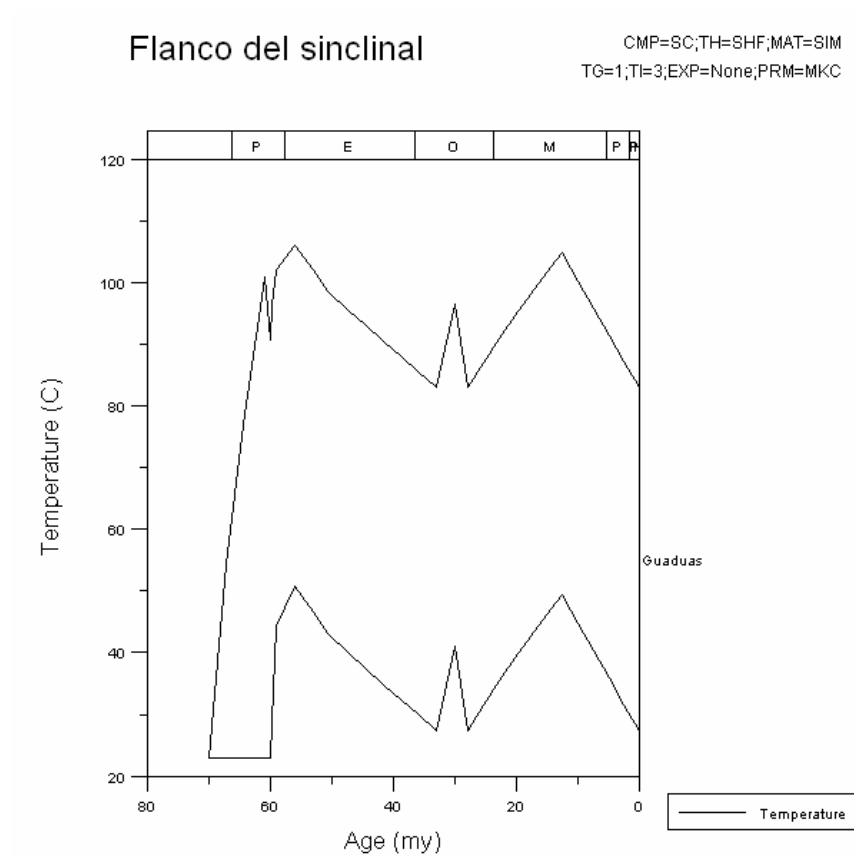


FIGURA 26. Diagrama de Tiempo vs Temperatura para el flanco del Sinclinal

Flanco del sinclinal

CMP=SC;TH=SHF;MAT=SIM
TG=1;TI=3;EXP=None;PRM=MKC

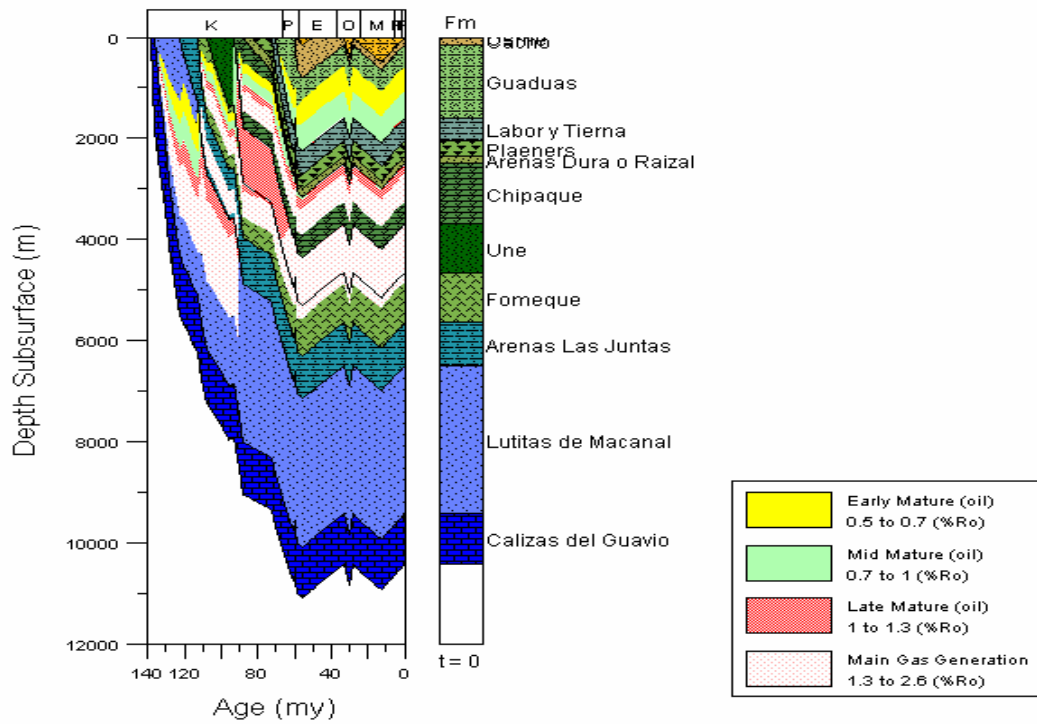


FIGURA 27. Madurez en %Ro en relación con la profundidad y edad de las formaciones del flanco del Sinclinal Checua Lenguaque

Flanco del sinclinal

CMP=SC;TH=SHF;MAT=SIM
TG=1;TI=3;EXP=None;PRM=MKC

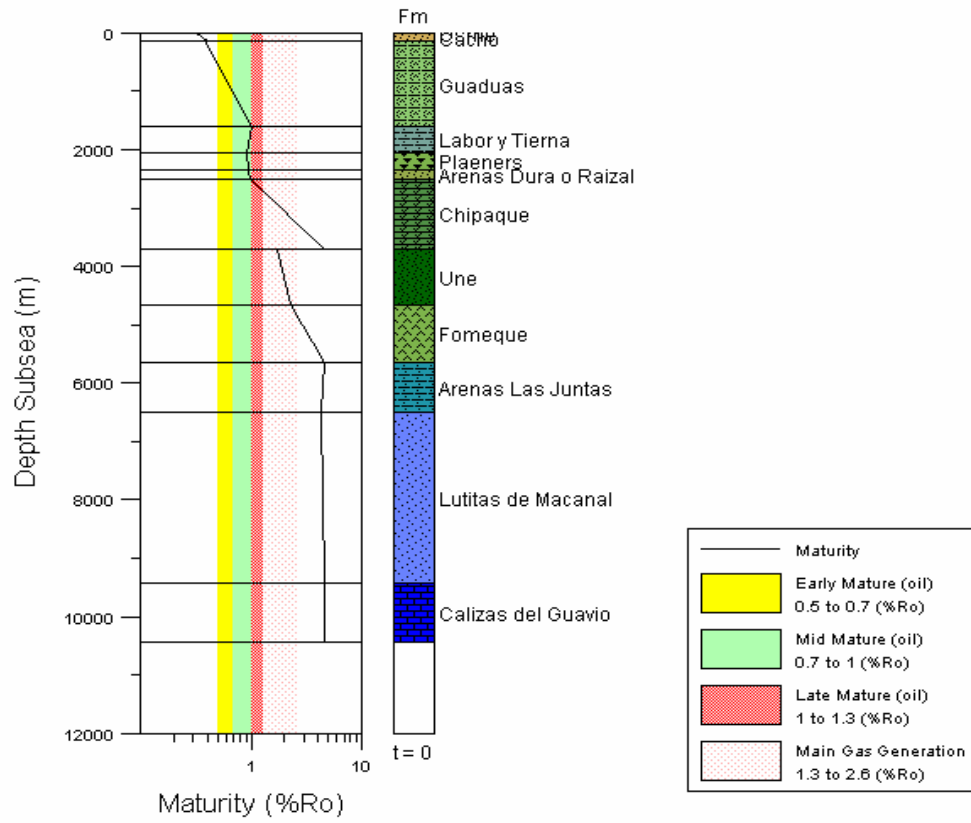


FIGURA 28. Rangos de madurez alcanzados por las Formaciones en el centro del sinclinal Checua Lenguaque.

9. DISCUSION DE RESULTADOS

ESTUDIO ESTRATIGRÁFICO

Los resultados del estudio estratigráfico realizado en forma conjunta con Rincón y Rocha (2007), permiten evidenciar una confusa denominación de los mantos de carbón en al área minera del sinclinal Checua Lenguazaque.

La propuesta presentada para la nomenclatura de los mantos de carbón de la Formación Guaduas en este sector fue realizada tomando en cuenta la totalidad de capas de carbón de la sección del Triunfo, que corresponde al área con mayor cantidad de capas de carbón, 22 mantos en total, distribuidos en tres segmentos que son de base a techo, segmento inferior que incluye los mantos 1 al 4, todos por debajo de la arenisca La Guía, segmento intermedio que contiene los mantos 5 a 16 y esta delimitado hacia el tope por canales de arena, y segmento superior que va desde el manto 17 hasta el 22.

CORTE GEOLOGICO

Se encontró que la Formación Guaduas presenta un espesor de 1400 metros, la base de esta en el centro del sinclinal se encuentra a una profundidad de 1700, constituyendo la máxima profundidad alcanzada por la Formación Guaduas en el sinclinal, para el flanco se encontraron profundidades variables, sin embargo para el modelamiento se tomó como profundidad total de 1800 m., en los frentes de explotación en los cuales se obtuvieron muestras para las pruebas de degasificación las profundidades máximas alcanzadas en los mantos inferiores y

medios se aproximan a los 200 metros, mientras que en los mantos superiores no sobrepasan los 150 metros.

A nivel de estructuras, en el corte se evidencian una familia de fallas de alto ángulo asociadas a una falla de despegue, la cual se relaciona con la falla de Tunja – Soapagá, su despegue se da en la formación Chipaque; por otra parte los plegamientos presentes se caracterizan por poseer tendencias asimétricas y estos están cortados por las fallas descritas anteriormente, lo cual puede complementarse con el análisis de la geología estructural del área. (Véase sección geología estructural)

ANALISIS PROXIMALES, TOC Y AZUFRE

Sección Montecristo:

Los resultados obtenidos en los análisis de volátiles, indican que los carbones pertenecientes a los llamados mantos inferiores y medios pueden ser clasificados como carbones altos en volátiles, de buen rango, mientras que los incluidos en los mantos superiores, se clasifican como carbones altos en volátiles de rango bajo.

Los porcentajes de ceniza son buenos para la totalidad de los mantos, pues no superan en ningún caso el 9%. La tendencia que se marca claramente indica un aumento del porcentaje de cenizas a medida que nos acercamos al tope de la Formación, lo cual puede ser explicado por el aumento en la influencia continental que se observa en la parte superior de Guaduas, corroborando lo propuesto por Rincón y Rocha (2007) quienes plantean la disminución del espacio de acomodación y la interacción con sedimentos continentales.

Los contenidos de Humedad son bastante bajos, y el carbono fijo oscila entre 60% y el 70%, salvo en la base de los mantos superiores donde es un poco menor y en los mantos medios en los que supera el 70%.

La clasificación global de los carbones del área de Montecristo, varia entre bituminosos altos en volátiles A a bituminosos medios y bajo volátiles, siendo los carbones de la base de la secuencia del Guaduas de excelente calidad para la producción de coque, dadas sus propiedades aglomerantes (Bueno y Moreno, 2005).

El comportamiento del TOC muestra una tendencia bastante clara: Disminución progresiva a medida que se asciende estratigráficamente. Esto probablemente es evidencia del ambiente de depositación de los carbones, pues los mantos de la parte inferior según Rincón y Rocha, al igual que Bueno y Moreno pertenecen a un Middle Lowstand, el cual presenta mejores condiciones de preservación de materia orgánica; mientras los de la parte media - superior, se depositaron en un régimen en el aporte y conservación de materia orgánica fue menor.

El análisis de azufre muestra que los mantos inferiores y medios contienen pequeñas cantidades, inferiores a 0.9, exceptuando el manto 10, en el cual el valor esta muy por encima del promedio de estos mantos. Esta característica de este manto pudo ser evidenciada macro y microscópicamente, pues eran evidentes restos de pirita en las muestras de mano y en las secciones pulidas elaboradas. Además estudios anteriores ya habían hecho alusión a los elevados valores de azufre del manto La Ciscuda, como es conocido en la región.

Sección Triunfo:

Los resultados de los análisis de materia volátil para esta sección son muy similares a los obtenidos en Montecristo, pues la tendencia muestra que el rango de dichos carbones disminuye hace el tope de la columna.

Los contenidos de ceniza muestran valores aceptables, pues en general no superan el 10%, salvo la muestra del manto 11, la cual corresponde según nuestra correlación estratigráfica al manto 10 del área de Montecristo. Esto evidencia que las características anómalas de este manto se mantienen a lo largo de todo el sinclinal.

Los valores de humedad son normales y no muestran grandes variaciones con los presentados en las dos otras secciones.

El carbono fijo de los carbones del triunfo se mantiene al igual que en Montecristo entre el 60 % y el 70%. Solo el manto 1 presenta un valor superior, lo cual corrobora la calidad de los carbones de la base del Guaduas; Por el contrario, y continuando con valores negativos, el manto 11 presenta un valor de carbono fijo inferior al 60%

Sección Lenguazaque:

Los resultados de los análisis próximos para esta región son prácticamente idénticos a los de la sección del Triunfo, salvo la desaparición de los valores anómalos del manto 11 de dicha columna, que en esta área no se encuentra dentro de los mantos explotables.

La diferencia mas importante radica en el carbono fijo. Aquí a diferencia de las dos áreas anteriores el porcentaje varía en un rango más amplio, que inicia hacia el 55% y finaliza alrededor del 75%.

En general, los carbones de las áreas de Lenguazaque y El Triunfo, se han clasificados entre bituminosos altos en volátiles A a bituminosos medio volátil, con características para producir coque en mezclas.

REFLECTANCIA DE VITRINITA

Con base en los resultados obtenidos se deduce a nivel general que los carbones de la formación Guaduas en el sinclinal Checua – Lenguazaque disminuyen los valores de R_o en la medida que se asciende en la columna estratigráfica. La reflectancia de vitrinita es un indicador de la madurez de los carbones, esta madurez depende de las condiciones fisicoquímicas a las cuales ha estado expuesta la materia orgánica desde el momento de su depositación. Los mantos superiores (carbones térmicos) presentan valores bajos de R_o , lo cual se puede explicar por el ambiente de depositación de estos carbones, los cuales fueron acumulados durante un retiro del mar y la influencia de condiciones más continentales, ambiente que no es apropiado para la preservación de la materia orgánica.

Además un evidente control estratigráfico para los valores de R_o permite deducir que los rangos de madurez se alcanzaron antes de la exhumación de la Cordillera en la Orogenia Andina.

Hacia la zona de Lenguazaque los carbones presentan mayor contenido de R_o , pues alcanza en un caso un promedio superior al 0,95% (cinta 2) Una explicación a esta anomalía puede ser la basculación del sinclinal en esta área, y la existencia de Formaciones Paleógenas erodadas en las secciones de Montecristo y el Triunfo, pero presentes en la sección de Lenguazaque, lo cual nos permite diferenciar, los cambios deformacionales en la rata de levantamiento de la cordillera, los cuales aparentemente fueron mayores en la parte Sur del sinclinal y menores en la parte Norte del mismo.

Además no se debe descartar la existencia de diapiros de sal que pudieran aumentar del gradiente geotérmico y flujo de calor en Lenguazaque, y de esta manera permitir que la materia orgánica alcanzara mayor madurez.

Degasificación De Carbones

De las tres secciones analizadas, solo las de Montecristo y El Triunfo arrojan datos suficientes para ser interpretados. La sección de Lenguazaque, solo arroja un dato satisfactorio de emisión de gases, en el manto 13, que hace parte del segmento de mantos térmicos superiores. Esto puede deberse a alguna de las siguientes causas: **1)** gas migrado de los mantos medios e inferiores, que al estar sometidos a mayores cargas, encuentran rutas de escape que finalizan en este manto, o **2)** por entrampamiento estructural o hidrostático, que impide que al igual que ocurre en los mantos medios e inferiores, el gas escape a la atmósfera.

En la sección de Montecristo, los mantos muestran una clara tendencia; la cantidad de gas contenido por los carbones aumenta hacia la base de la secuencia. El manto 2 contiene una elevada cantidad de gas con respecto a los demás mantos de la sección. Lo anterior está ligado a la mayor madurez de estos carbones y a las condiciones fisicoquímicas más extremas a las que estuvo sometido.

La tendencia evidenciada en la sección de Montecristo se repite para los mantos de carbón de la sección del Triunfo, donde inesperadamente el valor más alto de gas emitido (además de ser el valor más alto para todas las secciones) se registra en el manto 12, uno de los mantos pertenecientes al segmento intermedio. Esto se puede explicar debido a que el método de muestreo se presta para que existan valores anómalos en algunos mantos, ya que las condiciones a las cuales se encuentra la mina a la hora de tomar la muestra difiere entre ellas, algunas de estas pueden tener mayor ventilación que otras.

Los resultados obtenidos, de manera general eran de esperarse pues las condiciones que afectaron a la materia orgánica depositada a en la base de esta secuencia favorecían la generación de hidrocarburos;

COMPOSICION DE GASES

En el área del triunfo se encuentra que el contenido de gases (C1 a C4) aumentan en los mantos inferiores y disminuye en los mantos superiores, este además de coincidir con la tendencia general de R_o se observa a su vez que tiende a aumentar en aquellas lugares en donde han sido sometidos a mayores temperaturas y presiones (Parte basal de la sección), los cuales correlacionan con edad, rango y localización, sin embargo se tiene que para el n-pentano no se observa esta tendencia, el cual aumenta su contenido hacia el tope y disminuye hacia la base, por tanto se deduce que el alto contenido de este componente refleja la calidad de los carbones como roca fuente, el nivel de maduración termal y facies orgánicas, asociado a una temprana generación de hidrocarburos líquidos.

El metano se presenta en un 99.9 % en relación con los otros gases, los cuales disminuyen su contenido en la medida que el hidrocarburo se hace mas pesado, debido al aumento en las fuerzas moleculares.

En el área de Montecristo se tiene una comportamiento complejo, en donde se presenta que la línea de tendencia indica que el contenido de gas aumenta de base a techo, pero presenta una considerable disminución hacia los mantos medios, sin embargo si se tiene en cuenta que los mantos superiores (en los cuales no se llevó a cabo muestreo para gases) no presentan cantidades apreciables de gas, se puede indicar que de base a techo hay disminución del contenido de los mismos, lo cual como se propuso para el área del Triunfo coinciden con los datos de R_o y Materia volátil, se observa además que el manto 6 presenta grandes cantidades de gas en relación a los otros mantos lo cual puede estar asociado a la composición maceral del carbón,

En la sección de Montecristo el metano se presenta en un 99.8 % en relación con otros gases, al igual que para el área del Triunfo se observa un alto contenido de n-pentano comparado con C2, C3 y C4, que como se había propuesto antes se debe a la temprana generación de hidrocarburos líquidos.

En la sección de Lenguaque se tiene que la línea de tendencia para el contenido de metano muestra que la cantidad de gases disminuye de los superiores a los mantos inferiores, esta situación es contraria a la tendencia observada en la sección del Triunfo. Sin embargo la tendencia de los gases C2 a C4 aumente hacia la base de la sección, a excepción del C5 que presenta una tendencia similar a la del metano.

Esta distribución anómala se puede explicar por una posible migración de los gases livianos presentes en los mantos inferiores y medios, dejando en el carbón la molécula de carbón los gases pesados, mientras que los mantos superiores no presentan migración aparente, esto se puede explicar por los potentes canales arenas sobre los mantos inferiores y medios pero escasos sobre los mantos superiores.

El manto 18 en el área del Triunfo es correlacionable con el manto 13 en el área de Lenguaque, y estos dos a su vez presentan un comportamiento diferente con relación a los otros mantos, el cual se ve evidenciado en un alto contenido de gases para este punto específico, según los estudios de Bueno y Moreno (2005), se encontró que para este manto se tienen altos contenidos de liptinitas y resinitas, macérales que generan grandes cantidades de gas. (Tablas 22 y 24)

ADSORCION ISOTERMICA

Los resultados indican que para el manto 1 se adsorben las mayores cantidades de metano, y a medida que ascendemos en la Formación Guaduas, disminuyen los máximos valores de gas adsorbido, como lo reflejan los datos obtenidos por

las muestras de carbón de los mantos 12 y 19, pertenecientes a la parte media y alta de la secuencia estratigráfica que es explotada en el sinclinal. La conclusión que se puede obtener al observar este comportamiento, es la relación directa entre la maduración de los carbones y su poder de adsorción, lo cual era de esperarse, pues los resultados de los demás análisis de laboratorio apuntan en la misma dirección. Las condiciones fisicoquímicas y de sedimentación a las cuales se sometió la materia orgánica que dio lugar a la aparición de los mantos de carbón inferiores de la Formación Guaduas permitieron que su rango y madurez alcanzara los valores mas elevados de toda esta sección estratigráfica

MODELAMIENTO GEOQUIMICO

En el diagrama de soterramiento se evidencian las ratas de sedimentación que se dieron a lo largo del tiempo geológico en cada formación, esta a su vez es determinada por la evolución de la cuenca y es un indicador de los diferentes eventos a los que esta ha sido sometida.

En relación a los diagramas de tiempo – Temperatura, se estimó que la base de la Formación Guaduas alcanza su máxima temperatura (116°C) hace aproximadamente 56 Ma, actualmente se muestra que la base presenta temperaturas de 91°C aproximadamente.

El techo de la Formación se comporta de manera similar que la base, esta presenta menores temperaturas a lo largo de su historia, la diferencia de temperatura entre la base y el techo es de aproximadamente 59°C.

Las variaciones de temperatura que se dan entre el flanco y el centro del sinclinal se dan por la variación de la rata de levantamiento de la cordillera en estos dos puntos específicos, por tanto se tiene que el flanco sufrió mayor levantamiento y erosión, comparado con el centro del sinclinal.

Esta diferencia de valores para el centro y el flanco, es una tendencia normal si se tiene en cuenta que el primero ha estado sometido a mayores temperaturas.

Con relación a los resultados de madurez se encuentra que para el centro del sinclinal en la base de la Formación Guaduas se alcanzan los estados tardíos de maduración con un %Ro que fluctúa entre 1 a 1,3%, sin embargo, en la mayoría de la sección para esta misma Formación se alcanzan los estados de maduración media con un %Ro entre 0,7 a 1%; por otra parte para los análisis llevados a cabo en el flanco del Sinclinal se encuentra que los valores de madurez termal disminuyen sustancialmente con relación a los datos obtenidos para el centro del sinclinal, es así como se tiene que la parte inferior de la sección de la Formación Guaduas en el flanco del sinclinal alcanza estados de maduración media con %Ro entre 0,7 a 1%, mientras que para la parte media se tienen menores porcentajes de Ro, los cuales alcanzan la maduración Temprana con %Ro entre 0,5 a 0,7%, la parte superior de la sección no alcanza estados de madurez.

Los datos anteriores coinciden con los análisis de Ro tomados en los mantos de carbón, donde para el flanco el %Ro para los mantos inferiores fluctúa entre 0,7 a 0,8%, mientras que para los mantos medios los valores oscilan en 0,6% y por ultimo los mantos superiores presentan valores alrededor de 0,5%, esto haciendo referencia a los niveles de la sección estratigráfica con mantos de carbón, sin embargo, como se observó en el análisis estratigráfico, la Formación Guaduas en su parte superior no presenta mantos de carbón, y por tanto no ha alcanzado niveles de maduración apreciable, tal como se observa en los análisis de modelamiento.

A lo largo de la historia de la cuenca, la Formación Guaduas, presenta una maduración temprana en el paleoceno superior a partir del eoceno inicio una maduración media en el centro del sinclinal, comenzando así la ventana de generación de gases por parte los carbones; el mismo comportamiento se da

para el flanco del sinclinal, pero los valores a partir del eoceno, los valores para la parte media de la Formación son menores que para la parte baja.

10. CONCLUSIONES

Existe una evidente relación entre la posición estratigráfica de los mantos de carbón de la Formación Guaduas y su contenido de gas. En donde la tendencia generalizada de las secciones trabajadas indica que el contenido de gas aumenta hacia la base de secuencia, junto con la madurez y el rango de los carbones.

Los gases de hidrocarburos presentes en los carbones de la Formación Guaduas corresponden casi en su totalidad (> a 98%) a Metano.

La secuencia de mantos de carbón de la Formación Guaduas se encuentra completa en la sección del Triunfo, y disminuye progresivamente hacia el norte.

El comportamiento de los gases C1 a C4 en las secciones de Montecristo y El Triunfo es similar, y opuesto al observado en la sección de Lenguaque.

El n-pentano no presenta una tendencia clara de comportamiento, y sus cantidades, que superan a los gases C2, C3 y C4, reflejan su relación con la generación de hidrocarburos líquidos y su excelente caracterización como roca generadora.

La ventana generación de gas por parte de los carbones de la Formación Guaduas inicio en el paleógeno para el flanco y el centro del sinclinal, sin embargo el flanco alcanzo menores estados de maduración termal que el centro, lo que permite deducir que el contenido de gas es mayor en el centro del sinclinal, por su estado de maduración intermedio.

REFERENCIAS CITADAS

Alarcón, A., Villaruel J., Et al. 2004, El Carbón Colombiano, recursos, reservas y Calidad, Publicaciones especiales Ingeominas, p. 229-303.

Bueno, L., Moreno, M., 2005. Estratigrafía, Petrografía Y Geoquímica de la ocurrencia de Carbones Coquizables de la Formación Guaduas en la Cuenca de Bogota. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander.

Burke, K., C. Cooper, J. Dewey, P. Mann and J. Pindell, 1984, Caribbean Tectonics and relative Plate Motions, In: Bonini, W., R. Hargraves and R. Shagan (ed) The Caribbean-South American plate boundary and regional tectonics, GSA Memoir 162, p. 31-64.

Campbell, C., Bürgl, H. 1965. Section through the eastern cordillera of Colombia, South America. GSA Bulletin, Vol 76, No 5, p 567 – 589.

Cheilletz, A., Feraud, G., Giuliani, C., Rodríguez, T., , 1994, Time-pressure and temperature constraint in the formation of Colombian emeralds: An $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser microprobe and fluid inclusion study: Economic Geology, v. 89. p. 369-367.

Centro Internacional de Física (CIF), 2006, Manual de Usuario sistema de medición de gas en muestras de carbón, p 12-66.

Centro Internacional de Física (CIF), 2006, Software CGMS 2.0

Cooper, M.A., Addison, F.T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R.H., Hayward, A.B., Howe, S., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A.J., and Taborda, A., 1995, Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera and Middle Magdalena Valley, Colombia: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 79, p. 1421–1443.

Colletta, B., Hebrard, F., Letouzey, J., Werner, P., and Rudkiewicz, J.L., 1990, Tectonic style and crustal structure of the Eastern Cordillera (Colombia) from a balanced cross section, in Letouzey, J., ed., Petroleum and Tectonics in Mobile Belts: Paris, Editions Technip, p. 81–100.

Duque, H., 1990, El bloque Chocó en el Noroccidente Suramericano: Implicaciones estructurales, tectonoestratigráficas y Paleogeográficas. Boletín Ingeominas, V 31, p 1-25.

Etayo-Serna, F., Barrero, D., Lozano, H., Espinosa, A. González, H., Orrego, A., Ballesteros, I., Forero, H., Ramírez, C., Zambrano, F., Duque, H., Vargas, R., Núñez, A., Alvarez, J., Ropaín, C., Cardozo, E., Galvis, N., Sarmiento, L., Albers, J., Case, J., Singer, D., Bowen, R., Berger, B., Cox, D., and Hodges, C., 1983, Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia: Publicaciones Geológicas Especiales del Ingeominas, no. 14, 235 p.

Fabre, A., 1983a, La subsidencia de la Cuenca del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia) durante el Cretáceo y el Terciario Segunda Parte: Esquema de evolución tectónica: Geología Norandina, No. 8, p. 22–27.

Fabre, A., 1983b, La subsidencia de la Cuenca del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia) durante el Cretáceo y el Terciario primera parte estudio cuantitativo de la subsidencia: Geología Norandina, No. 8, p. 35–59.

García González (2001), Gas asociado a mantos de carbón en el altiplano cundiboyacense. Informe final proyecto de investigación 1102-06539-97

Gomez, E., 2001, Tectonic control on the Late Cretaceous to Cenozoic sedimentary fill of the Middle Magdalena Valley Basin. Eastern Cordillera and Llanos Basin, Colombia [Ph.D. thesis]: Ithaca, New York, Cornell University, 619 p.

Gomez, E., Jordan, T. E., Allmendinger, R. W., Cardozo, 2005b, Development of the Colombian foreland basin system as a consequence of diachronous exhumation of the northern Andes: GSA, V 117, p. 1272-1292.

Guilland, R., 1988, Evolution Meso-Cenozoique d'une vallée et intercordillère andine: La Haute Vallée du Rio Magdalena (Colombia): Ph. D. Tesis, Université Pierre et Marie Curie, v. 88-26. p. 358.

HEWLETT PACKARD. Understanding your chem. Station. Fourth edition. 1997

Hubach, E. 1951. Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores. Servicio Geológico Nacional, informe No 785. también publicado en 1958, Boletín Geológico Instituto Geológico Nacional, Vol. 5, No 2. p. 93-112.

IGAC. División política administrativa del departamento de Cundinamarca. 2003.

Julivert, M., 1963a. – Estratigrafía y sedimentología de la parte inferior de la Formación Guaduas al S de la Sabana de Bogotá (Cordillera Oriental). Boletín Geológico UIS., nº 12, p. 85-99.

Julivert, M., 1963b. – Los rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación de las estructuras Boletín Geológico UIS., nº 13, p. 5 – 102.

Kellogg, J. N., y V. Vega, 1995, Tectonic development of Panamá, Costa Rica, and Colombian Andes: constrains from Global Positioning System geodetic studies and gravity, *in* P. Mann, ed., Geologic and tectonic development of the Caribbean plate boundary in southern Central America, v. Special Paper 295: Boulder, Colorado, Geological Society of America, p. 75-90.

Kellogg, J., Ojeda, G., Duque, H., Cerón, J., 2005, Cristal structure of the Eastern Cordillera, Colombia: ISAG 2005, Barcelona, extended Abstracts: 424-427.

Kim, A y Douglas, L. 1973 Gases Desorbed From Five Coals of Low Gas Content. United States Department Of The Interior, p. 3 – 13.

Perez, F. Et al. 1987. – Caracterización de carbones colombianos zona Checua - Lenguazaque. Boletín Ingeominas 28, nº 2. p. 1-217.

Rincón, L., Rocha, A., 2007, Estratigrafía de secuencias de la Formación Guaduas, Colombia. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander.

Rice, DD and Claypool, GE., 1981, Generation, accumulation, and resource potential of biogenic gas: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 65, no. 1, p. 5-25.

Rightmire, CT., 1984., Coalbed methane resources, in Rightmire, C.T., Eddy, G.E., and Kirr, J.N., editors, Coalbed methane resources of the United States: American Association of Petroleum Geologists Explorer, v. 21, no.4 (April, 2000), p. 16, 18-20, 22-23.

Sarmiento, L.F., 1989, Stratigraphy of the Cordillera Oriental, West of Bogotá, Colombia [M.S. thesis]: Chapel Hill, University of South Carolina, 102 p.

Sarmiento, G., 1992. Estratigrafía y medios de depósito de la Formación Guaduas, Boletín Geológico, Ingeominas, Bogotá, No. 32-1, Ingeominas.

Sarmiento G, 1994, Visión Regional de la Formación Guaduas Publicación Especial del Ingeominas No. 20.

Seewald, J. S., 2003, Organic – inorganic interactions in petroleum – producing sedimentary basins: Nature V 426, p. 327 – 333.

Toro, J., F. Roure, N. Bordas-Le Floch, S. Le Cornec-Lance, and W. Sassi, 2002, Thermal and kinematic evolution of the Eastern Cordillera Fold and thrust belt, Colombia: AAPG Hedberg Series, No 1, p. 79-115.

Toro, J., F. Roure, N. Bordas-Le Floch, S. Le Cornec-Lance, W. Sassi, 2004, Thermal and Kinematic Evolution of the Eastern Cordillera fold-and-thrust-belt, Colombia, in R. Swennen, F. Roure, and J. W. Granath, eds. Deformation, fluid flow, and reservoir appraisal in foreland fold and thrust belts: AAPG Hedberg Series, no. 1, p. 79-115.

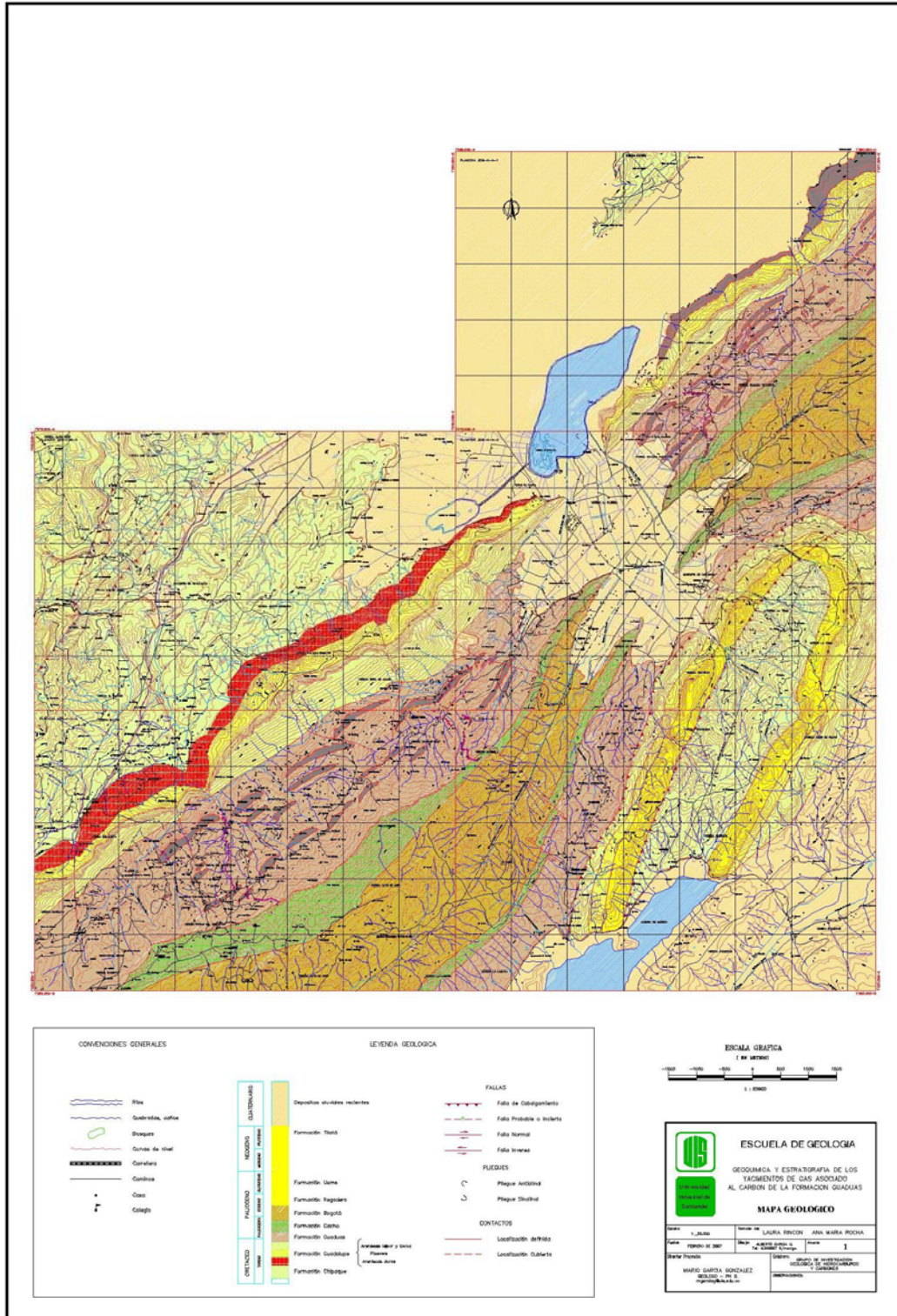
Ulloa, C.; Rodríguez, E. 1979. Geología del Cuadrángulo K12 - Guateque. Boletín Geológico, Ingeominas, Vol. XXII, No 1. p. 3 - 56.

ANEXOS

Anexo 1. Columnas estratigráficas

The figure is a detailed stratigraphic correlation chart. It consists of three main columns representing different geological sites: **COLUMNA TRIUNFO** (left), **COLUMNA MONTECRISTO** (center), and **COLUMNA LENGUAZAQUE** (right). Each column contains a vertical scale of depth in meters and a list of lithological units with their descriptions. Correlation lines, drawn in various colors (orange, red, purple, blue), connect equivalent stratigraphic layers across the different columns. To the left of the columns, there are two small diagrams showing stratigraphic profiles. On the right side, there are two legends: the top one is a table with a green box and text, and the bottom one is a table titled 'SIMBOLOS' that defines the symbols used for different lithological units.

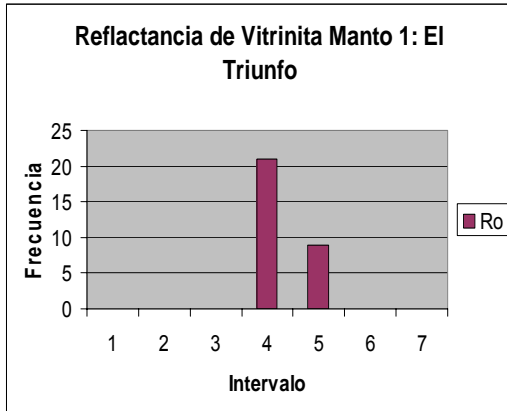
Anexo 2. Mapa geológico



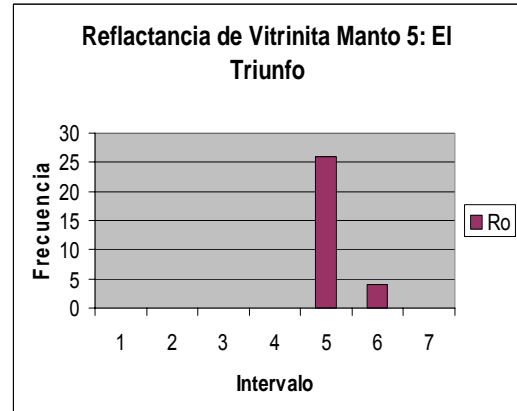
ANEXO 4
Estadísticas de reflectancia de vitrinita

TRIUNFO

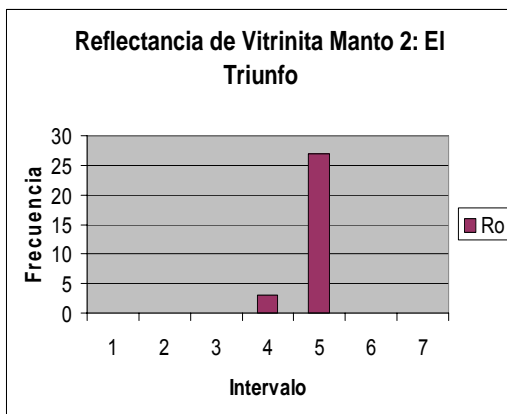
Manto 1



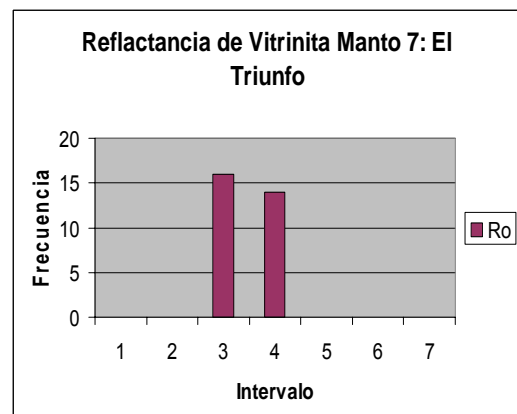
Manto 5



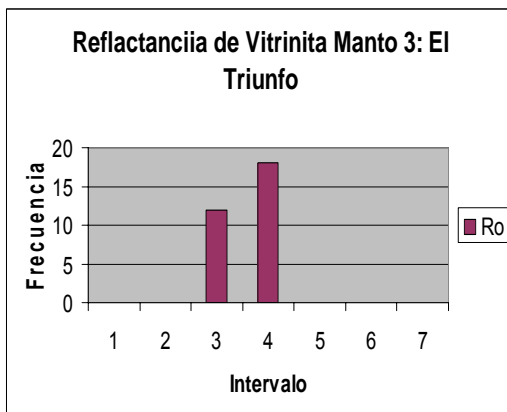
Manto 2



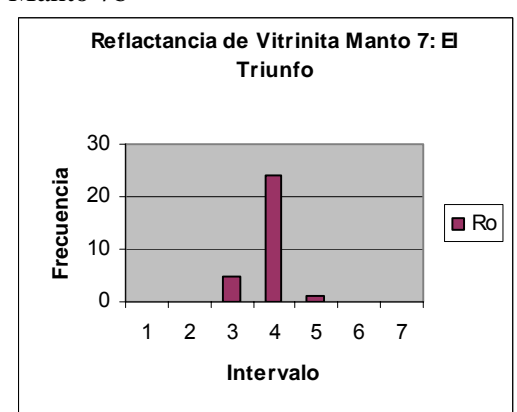
Manto 7a



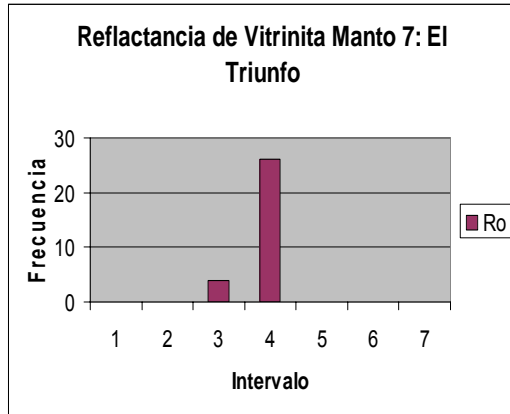
Manto 3



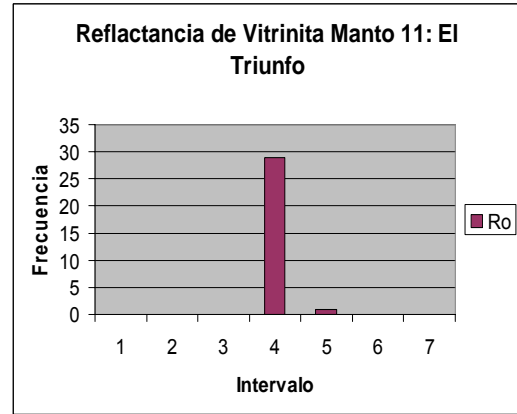
Manto 7b



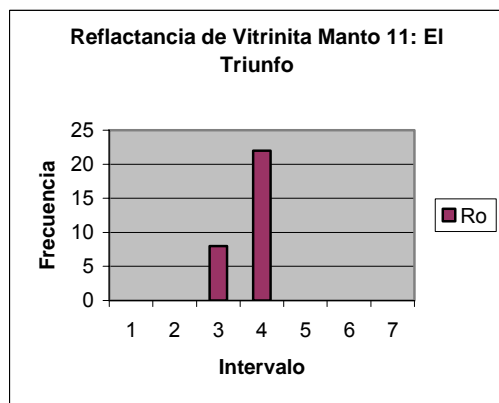
Manto 7c



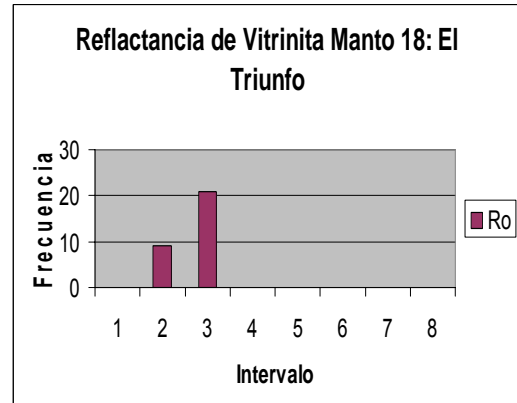
Manto 12



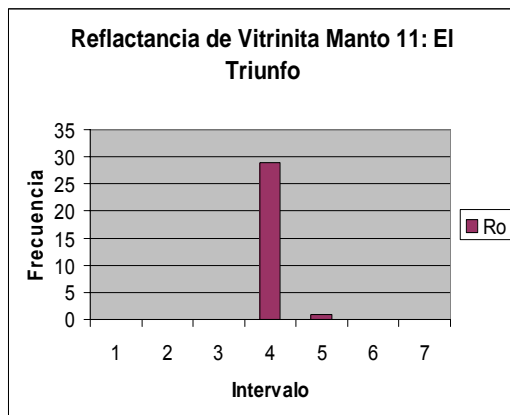
Manto 11



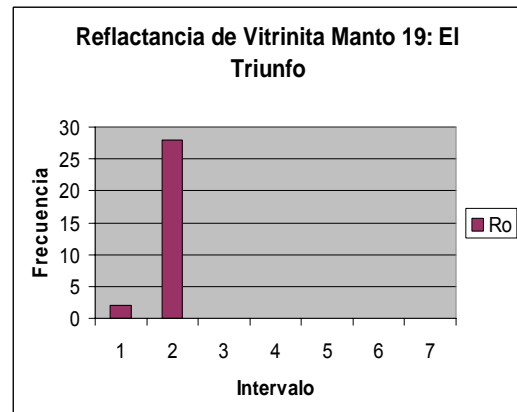
Manto 18



Manto 11

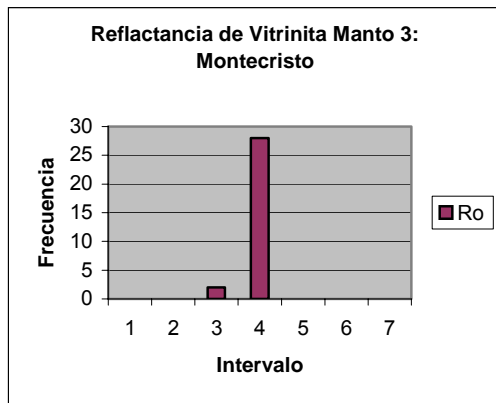


Manto 19

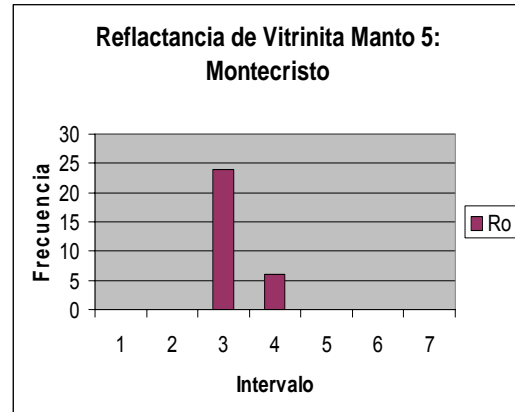


MONTECRISTO

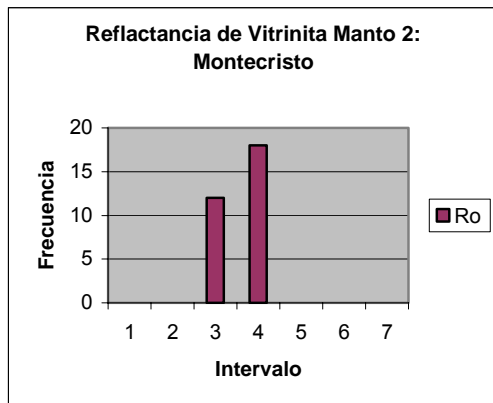
Manto 2



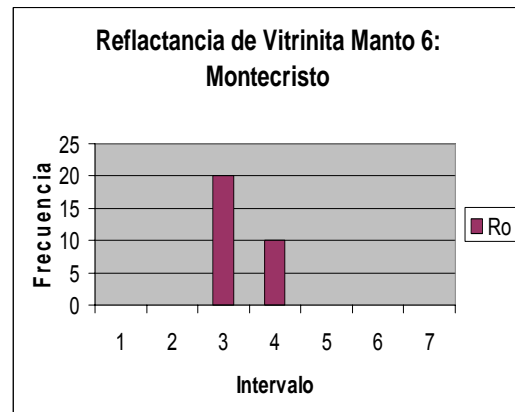
Manto 5



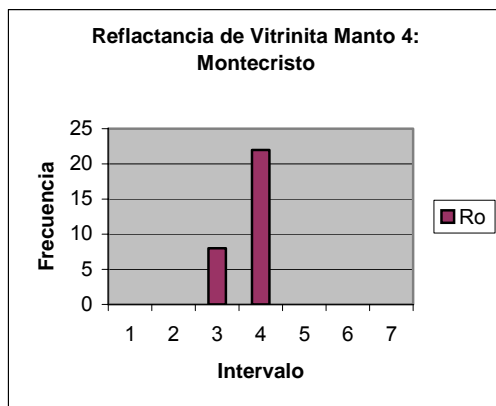
Manto 3



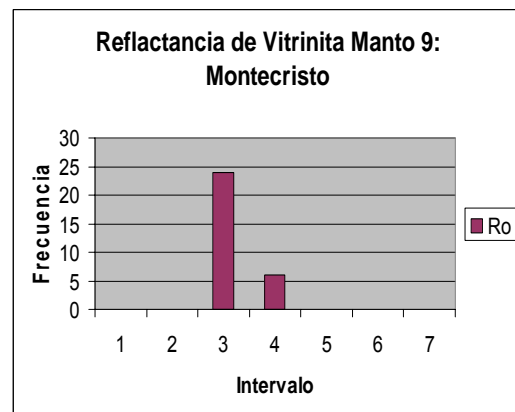
Manto 6



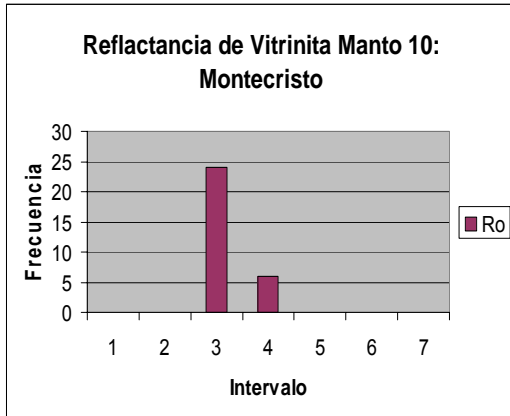
Manto 4



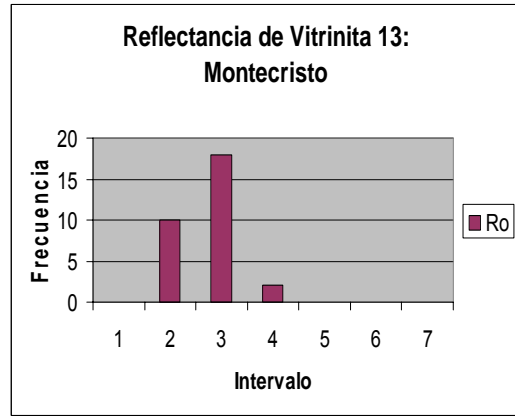
Manto 7



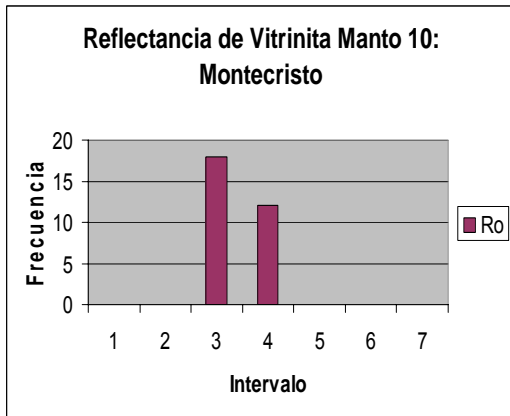
Manto 10



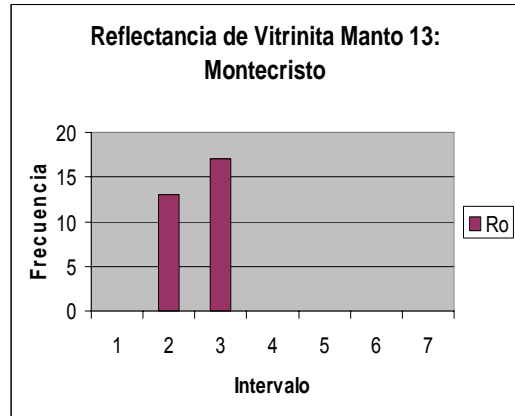
Manto 13a



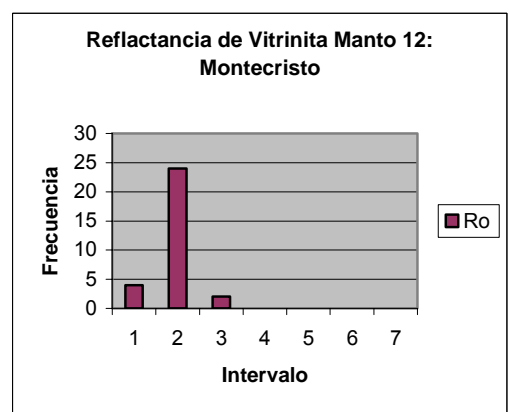
Manto 10



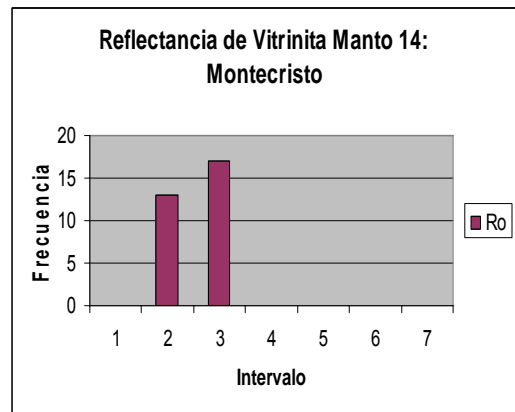
Manto 13b



Manto 12

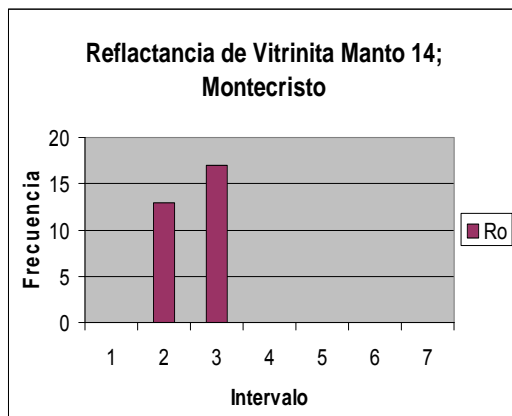


Manto 14a

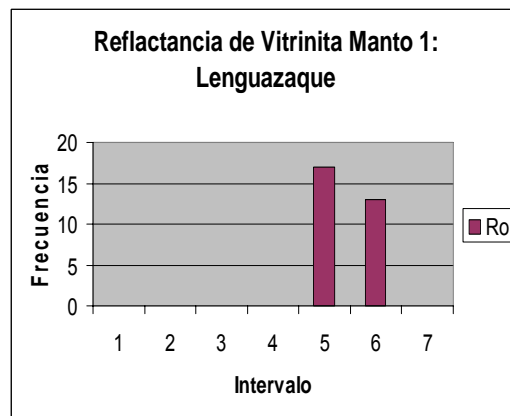


LENGUAZAQUE

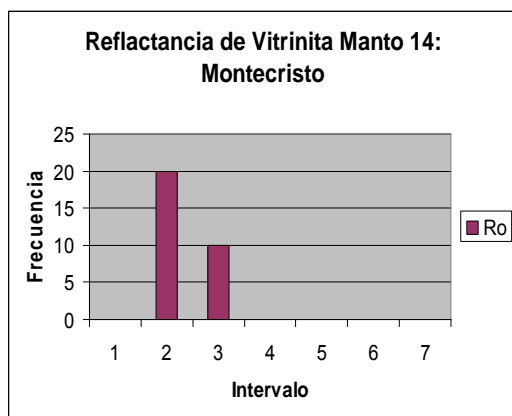
Manto 14b



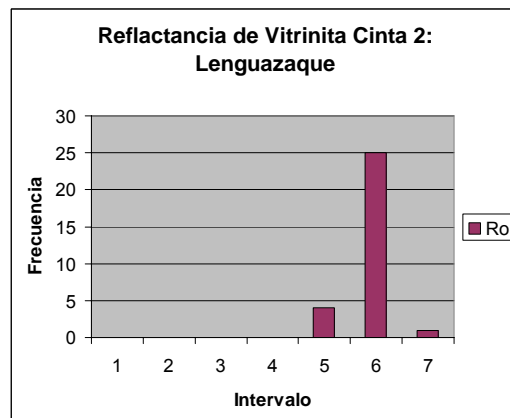
Manto 1



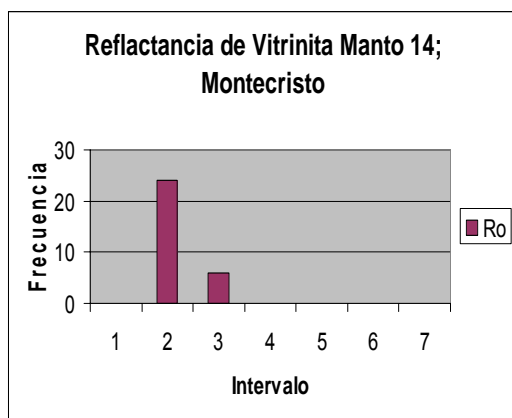
Manto 14c



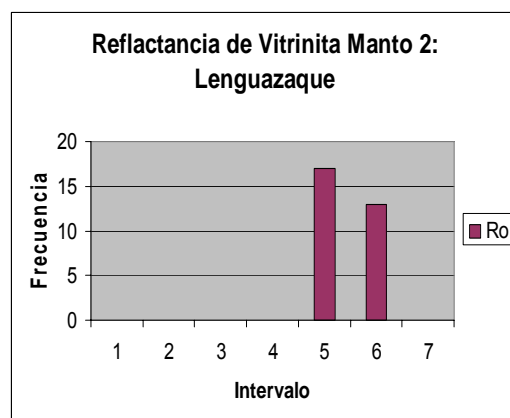
Cinta 2



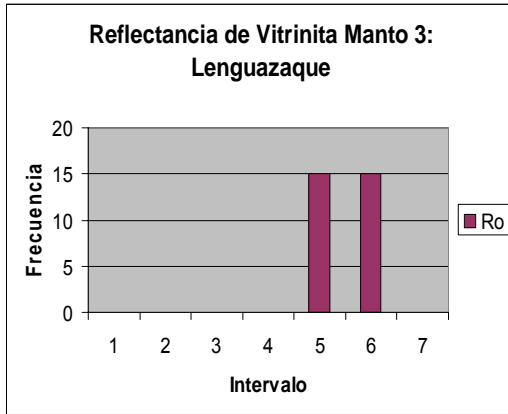
Manto 14d



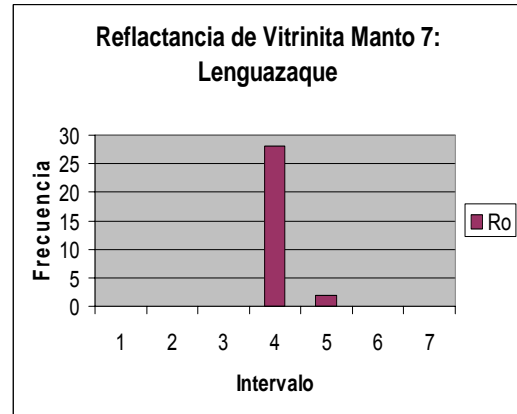
Manto 2



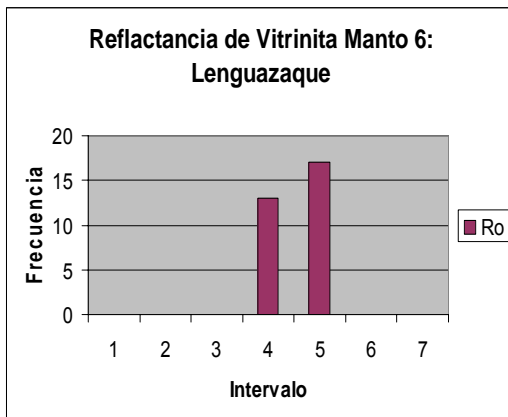
Manto 3



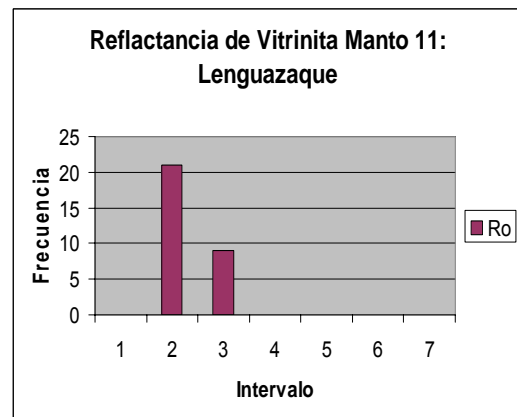
Manto 7



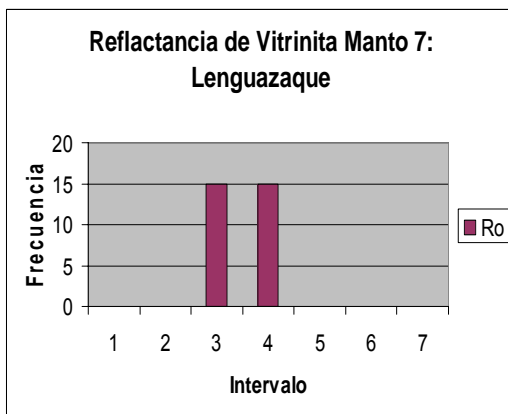
Manto 6



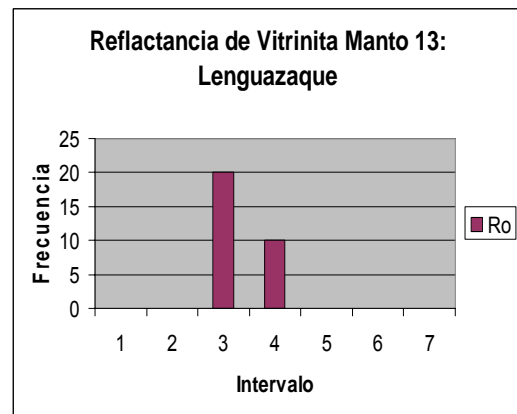
Manto 11



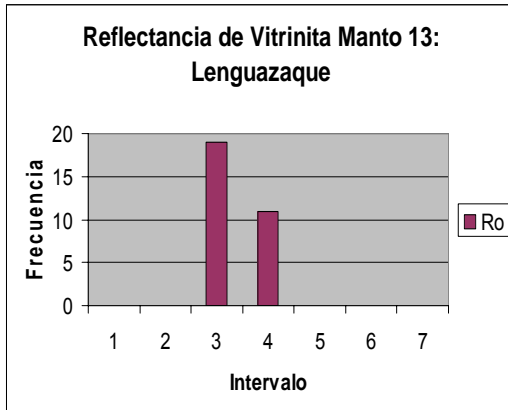
Manto 7



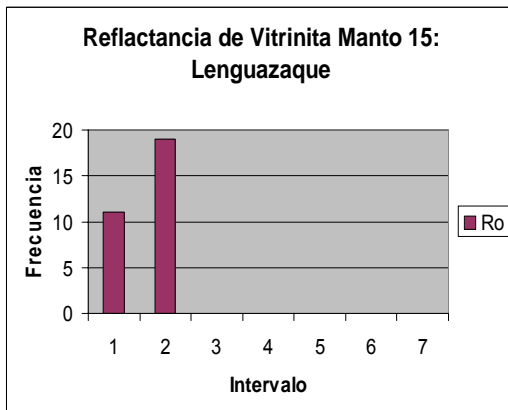
Manto 13a



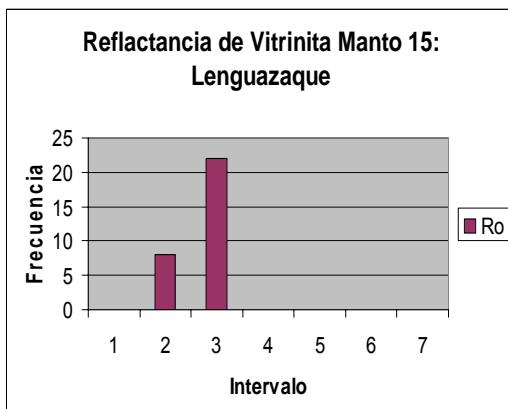
Manto 13b



Manto 15a



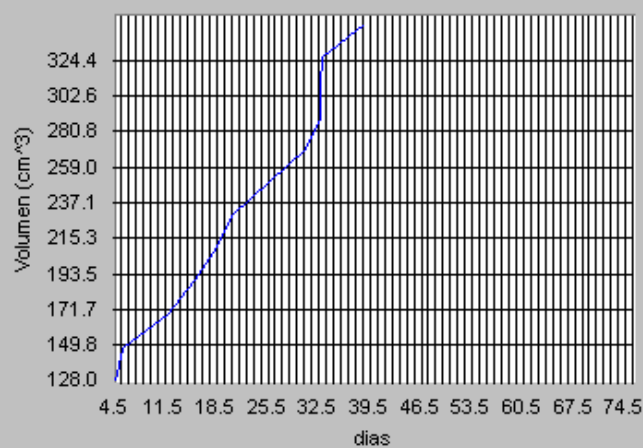
Manto 15b



ANEXO 5

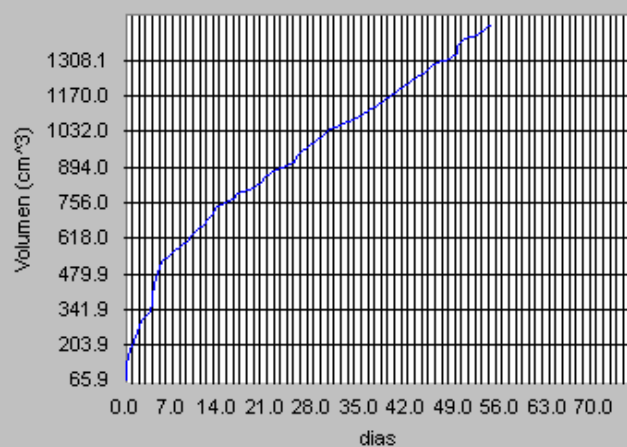
MANTO 4 SECCIÓN EL TRIUNFO

Periodo graficado: 10/11/2006 07:17:34 p.m. - 25/01/2007 09:05:07 a.m.



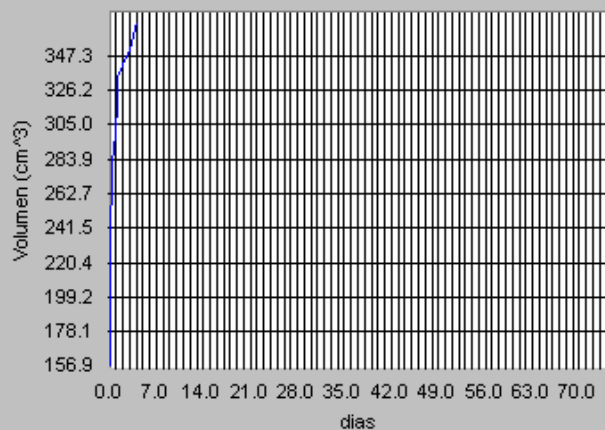
MANTO 4 SECCIÓN EL TRIUNFO

Periodo graficado: 10/11/2006 07:36:19 p.m. - 25/01/2007 09:11:35 a.m.



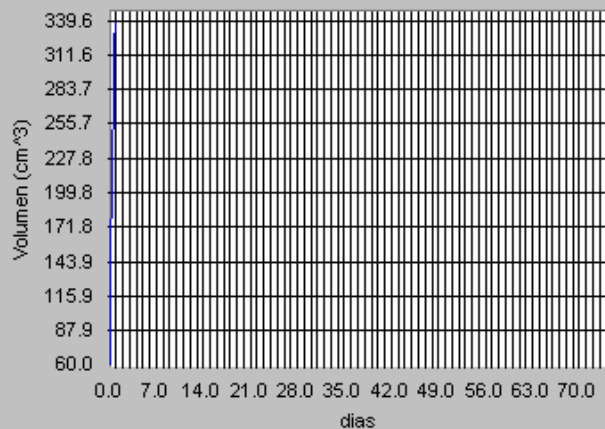
MANTO 6 SECCION MONTECRISTO

Periodo graficado: 11/11/2006 08:57:22 p.m. - 25/01/2007 09:11:17 a.m.



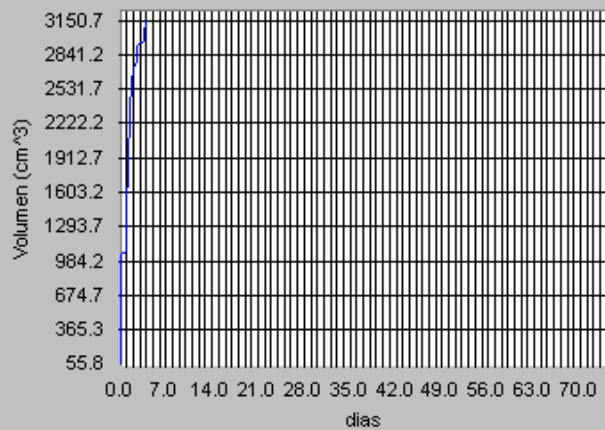
MANTO 3 SECCION MONTECRISTO

Periodo graficado: 11/11/2006 09:00:23 p.m. - 25/01/2007 09:14:14 a.m.



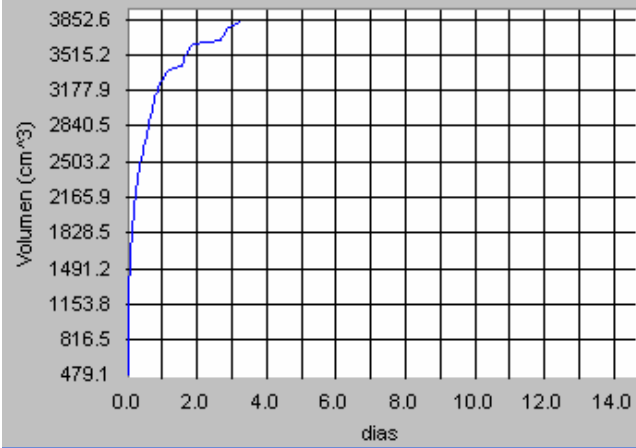
MANTO 2 SECCIÓN MONTECRISTO

Periodo graficado: 11/11/2006 09:09:45 p.m. - 25/01/2007 09:04:37 a.m.



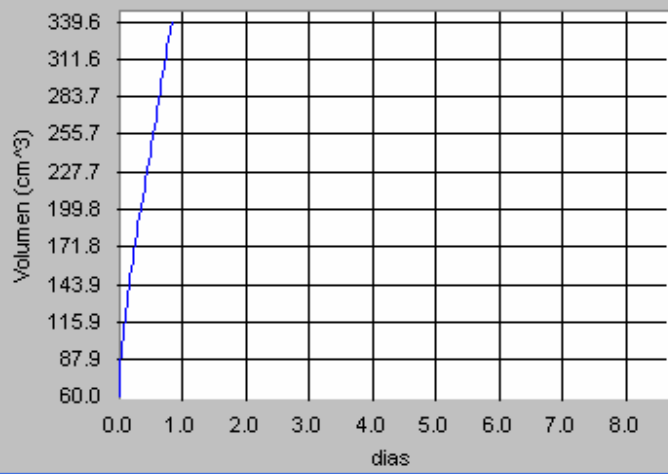
MANTO 7 SECCION TRIUNFO

Periodo graficado: 15/11/2006 07:23:54 p.m. - 30/11/2006 10:15:06 a.m.



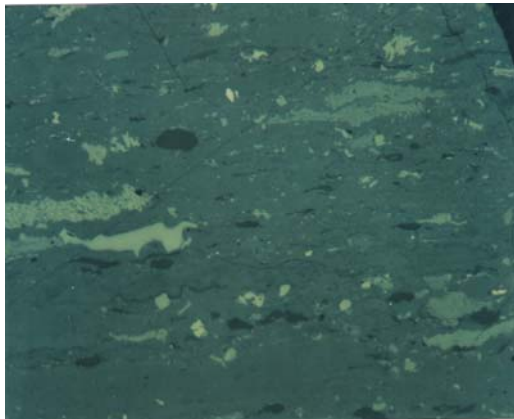
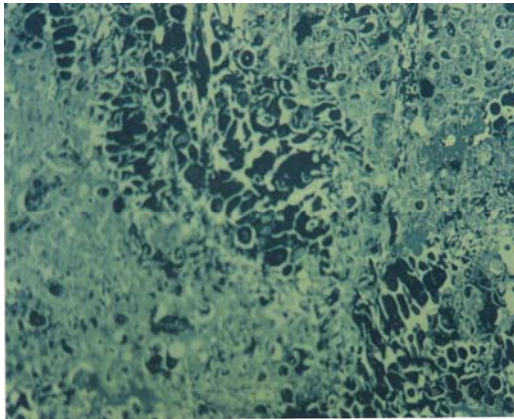
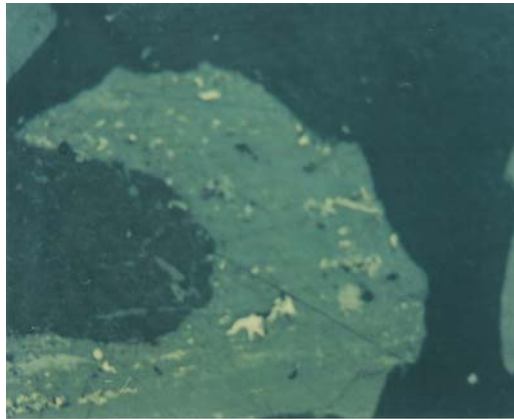
MANTO 18 SECCION TRIUNFO

Periodo graficado: 15/11/2006 07:37:29 p.m. - 24/11/2006 10:58:54 a.m.

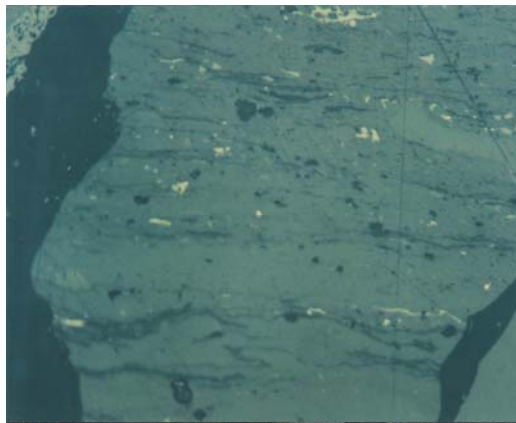


ANEXO 6

Anexo 6 Mosaico de Fotomicrografías.



- 1a) Manto 2; Desmocolinita, fusinita, sección El Triunfo. Luz Blanca.
1b) Manto 2; Desmocolinita, fusinita, sección El Triunfo. Fluorescencia.
2a) Manto 4; Textinita, semifusinita, desmocolinita, sección Montecristo. Luz Blanca.



- 2b) Manto 4, Textinita, semifusinita, sección Montecristo. Fluorescencia.
3) Manto 1; Exudatinita, sección Lenguazaque. Luz Blanca.
4) Manto 19, Resinita, sección El Triunfo. Luz Blanca