

**ESTUDIO DE LA MADURACIÓN TERMAL DE KERÓGENOS TIPO II Y III  
MEDIANTE RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR (RMN) Y REFLECTANCIA  
DE VITRINITA ( $R_o$ ), EN FORMACIONES DEL CRETÁCICO SUPERIOR Y DEL  
PALEÓGENO EN LA CORDILLERA ORIENTAL DE COLOMBIA**

**TANIA SARITH PALMERA HENAO**

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

**2011**

**ESTUDIO DE LA MADURACIÓN TERMAL DE KERÓGENOS TIPO II Y III  
MEDIANTE RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR (RMN) Y REFLECTANCIA  
DE VITRINITA ( $R_o$ ), EN FORMACIONES DEL CRETÁCICO SUPERIOR Y DEL  
PALEÓGENO EN LA CORDILLERA ORIENTAL DE COLOMBIA**

**TANIA SARITH PALMERA HENAO**

**Proyecto de Grado para optar el título de  
GEÓLOGA**

**Director:**

**Mario García González, Ph.D.**

**Profesor Titular**

**Co-Director:**

**José Antonio Henao Martínez, Ph.D.**

**Profesor Titular**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICO – QUIMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGIA  
BUCARAMANGA**

**2011**

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor del presente trabajo de grado, agradece:

A la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander y su personal docente, por la formación profesional recibida que me permitió crecer académica y personalmente.

Al grupo de Investigación en Geología de Hidrocarburos y Carbones de la escuela de Geología, por confiarme el desarrollo de este proyecto de investigación.

Al Doctor Mario García González, por brindarme su dirección, apoyo, confianza y amistad a lo largo de la carrera, y especialmente durante la realización de este trabajo.

A Dios que me ha acompañado, inspirado y bendecido a lo largo de toda mi vida.

A mi mamá que con su gran amor, sabiduría y apoyo incondicional han hecho posible que este sueño se haga realidad.

A mis familiares y amigos, especialmente a mi novio Luis Guillermo Rueda por su amor y compañía incondicional.

A mi Tío José Antonio Henao por el amor y apoyo brindado a lo largo de este camino.

**TANIA PALMERA**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	20
1. OBJETIVOS	22
1.1 OBJETIVO GENERAL	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	22
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
3. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	26
4. ANTECEDENTES	30
5. METODOLOGÍA	34
5.1 PLANEACIÓN DE ACTIVIDADES	34
5.2 MUESTREO Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS:	34
5.3 ANÁLISIS DE LABORATORIO	38
5.3.1 Carbono Orgánico Total (TOC)	38
5.3.2 Resonancia Magnética Nuclear (RMN)	40
5.3.3 Reflectancia de Vitrinita (Ro)	42
5.3.4 Calculo proximal de Carbones	45
5.3.5 Pirolisis rock eval	47
5.4 CORRELACIÓN DE RESULTADOS CON EL MODELAMIENTO GEOQUIMICO	50
5.4.1 Historias De Subsistencia	50
5.4.2 Diagramas De Tiempo –Temperatura	53
5.4.3 Método Cinético	54
5.5 ANALISIS DE RESULTADOS	56

6. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	57
7. MARCO GEOLOGICO LOCAL	61
7.1 SECCION DEL TRIUNFO	61
7.1.1 Geología Estructural	61
7.1.2 Estratigrafía	62
7.2 SECCIÓN TUNJA- VILLA DE LEYVA	66
7.2.1 Geología Estructural	66
7.2.2 Estratigrafía	67
8. RESULTADOS	77
8.1 NOMENCLATURA ESTRATIGRAFICA	77
8.1.1 Sección del Triunfo	77
8.1.2 Sección Tunja –Villa de Leyva	78
8.2 RESULTADOS DE ANALISIS GEOQUIMICOS	79
8.2.1 Sección del Triunfo	79
8.2.1.1 Resultados de Carbono Orgánico Total (%TOC)	79
8.2.1.2 Resultados de Resonancia Magnética Nuclear (RMN)	80
8.2.1.3 Resultados de Reflectancia de Vitrinita (%Ro)	81
8.2.1.4 Resultados del Análisis proximal de Carbones	83
8.2.1.5 Resultados de Pirolisis Rock Eval	84
8.2.1.6 Resultados del modelamiento geoquímico	85
8.2.2 Sección Tunja-Villa de Leyva	89
8.2.2.1 Resultados de Carbono Orgánico Total (%TOC)	89
8.2.2.2 Resultados de Resonancia Magnética Nuclear (RMN)	89
8.2.2.3 Resultados de Reflectancia de Vitrinita (%Ro)	90
8.2.2.4 Resultados de Pirolisis Rock Eval	90
8.2.2.5 Resultados del modelamiento geoquímico	91
9. ANALISIS DE RESULTADOS	102

9.1 ANÁLISIS PROXIMALES Y CARBONO ORGANICO TOTAL (TOC)	102
9.1.1 Sección del Triunfo	102
9.1.2 Sección Tunja-Villa de Leyva	103
9.2 RESONANCIA MAGNETICA NUCLEAR	104
9.2.1 Sección del Triunfo	104
9.2.2 Sección de Tunja Villa de Leyva	109
9.3 REFLECTANCIA DE VITRINITA	110
9.3.1 Sección del Triunfo	110
9.3.2 Sección de Tunja Villa de Leyva	111
9.4 PIROLISIS ROCK EVAL	112
9.4.1 Sección del Triunfo	112
9.4.2 Sección de Tunja-Villa de Leyva	114
9.5 ANALISIS DE RESULTADOS DEL MODELAMIENTO GEOQUIMICO	115
9.5.1 Sección del Triunfo	115
9.5.2 Sección de Tunja-Villa de Leyva	116
9.6 CORRELACIÓN DE RESULTADOS CON EL MODELAMIENTO GEOQUIMICO	117
CONCLUSIONES	119
BIBLIOGRAFÍA	123
ANEXOS	127

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de roca según Lewan (1996)	40
Tabla 2. %Ro establecidos de forma internacional.	44
Tabla 3. Corresponde a datos preestablecidos, K corresponde a la conductividad térmica, $\rho_c$ corresponde a la densidad	53
Tabla 4. Nomenclatura Estratigráfica para la sección del Triunfo, departamento de Cundinamarca	77
Tabla 5. Nomenclatura Estratigráfica para la sección Tunja-Villa de Leyva, departamento de Boyacá	78
Tabla 6. Resultados de TOC (%en peso) para la Sección del Triunfo	79
Tabla 7. Resultados del Factor del aromaticidad (Fa) para la Sección del Triunfo	81
Tabla 8. Resultados de Ro para los mantos de carbón de la Sección del Triunfo.	82
Tabla 9. Resultados de los análisis proximales de carbones para la Sección del Triunfo	83
Tabla 10. Resultados de Pirolisis Rock Eval para los mantos de carbón para la Sección del Triunfo.	84
Tabla 11. Datos utilizados para el modelamiento geoquímico del centro del Sinclinal de Checua-Lenguazaque, en la sección del Triunfo.	85
Tabla 12. Resultados de TOC (%en peso) para la Sección de Tunja-Villa de Leyva.	89
Tabla 13. Resultados de Ro para las muestras de shales de la Sección de Tunja-Villa de Leyva	90

Tabla 14. Resultados de Pirolisis Rock Eval para la Sección de Tunja-Villa de Leyva	90
Tabla 15. Datos utilizados para el modelamiento geoquímico del centro del Anticlinal de Arcabuco, en la sección del Tunja- Villa de Leyva	92

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Ubicación detallada de la sección del Triunfo, en el departamento de Cundinamarca, Colombia	27
Figura 2. Ubicación detallada de la sección Tunja-Villa de Leyva, en el departamento de Boyacá, Colombia.	29
Figura 3. Mapa de ubicación de las muestras tomadas en la Sección del Triunfo, en el departamento de Cundinamarca, Colombia. La equivalencia estratigráfica de este muestreo se encuentra explicada en la tabla 4	36
Figura 4. Mapa de ubicación de las muestras tomadas en la Sección de unja-Villa de Leyva, en el departamento de Boyacá, Colombia. La equivalencia estratigráfica de este muestreo se encuentra explicada n la tabla 5	37
Figura 5. Fotografía del equipo que mide el TOC: Analizador de carbono y azufre Leco SC-144DR, modelo SC 144DR	39
Figura 6. Fotografía del equipo de Resonancia magnética nuclear ultrashield 400, modelo Bruker	41
Figura 7. Fotografía del equipo que mide la Reflectancia de vitrinita: Microscopio fotómetro Zeiss Modelo MPM400	43
Figura 8. Fotografía del equipo de pirolisis rock eval: Analizador anhídrido de muestras de roca y suelos Rock Eval 6	48
Figura 9. Variación de la porosidad en función de la profundidad, tabla de valores estándar para porosidades iniciales de cada litología, según Van Hinte (1978)	52
Figura 10. Modelo secuencial del desarrollo tectónico regional para la Cordillera Oriental.	60

Figura 11. Mapa geológico y estructural de la sección del Triunfo, dentro del sinclinal de Checua-Lenguazaque.	62
Figura 12. Columna Estratigráfica de la Formación Guaduas en la sección del Triunfo (ver anexo C), en el departamento de Cundinamarca, Colombia.	65
Figura 13. Mapa geológico y estructural de la sección de Tunja- Villa de Leyva dentro del Anticlinal de Arcabuco	66
Figura 14. Columna Estratigráfica de la sección de Tunja- Villa de Leyva (ver anexo D), en el departamento de Boyacá, Colombia	67
Figura 15. Espectros de resonancia magnética nuclear (RMN) para las muestras de carbón de la formación Guaduas, Sección del Triunfo.	80
Figura 16. Diagrama de Soterramiento decompactado para el centro del Sinclinal de Checua-Lenguazaque, en la sección del Triunfo	86
Figura 17. Variabilidad de la conductividad térmica por edades para cada formación de la sección del Triunfo, en relación con la profundidad de las mismas	87
Figura 18. Variabilidad de la temperatura para cada Formación de la sección del Triunfo, teniendo en cuenta la edad y la profundidad	88
Figura 19. Espectros de resonancia magnética nuclear (RMN) para las muestras de shales de la Formación San Gil Superior (TPH-TV-7) y el Miembro Cucaita (TPH-TV-1 y 2), Sección de Tunja-Villa de Leyva.	89
Figura 20. Diagrama de Soterramiento decompactado para el centro del Anticlinal de Arcabuco, en la sección de Tunja-Villa de Leyva	93
Figura 21. Variabilidad de la conductividad térmica por edades para cada formación de la sección de Tunja- Villa de Leyva, en relación con la profundidad de las mismas	94

Figura 22. Variabilidad de la temperatura para cada Formación de la sección de Tunja-Villa de Leyva, teniendo en cuenta la edad y la profundidad	95
Figura 23. Gráfica de tendencia de los resultados de Carbono Orgánico Total con respecto a la posición estratigráfica de los mantos de carbón de la sección del Triunfo	96
Figura 24. Gráfica de tendencia de los resultados de Materia Volátil con respecto a la posición estratigráfica de los mantos de carbón de la sección del Triunfo	96
Figura 25. Gráfica de tendencia de los resultados de Humedad con respecto a la posición estratigráfica de los mantos de carbón de la sección del Triunfo.	97
Figura 26. Gráfica de tendencia de los resultados de Cenizas con respecto a la posición estratigráfica de los mantos de carbón de la sección del Triunfo	97
Figura 27. Gráfica de tendencia de los resultados de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) con respecto a la posición estratigráfica de los mantos de carbón de la sección del Triunfo	98
Figura 28. Gráfica de tendencia de los resultados de Reflectancia de Vitritina (Ro) con respecto a la posición estratigráfica de los mantos de carbón de la sección del Triunfo	98
Figura 29. Gráfica de tendencia de los resultados de Pirolisis Rock Eval con respecto a la posición estratigráfica de los mantos de carbón de la sección del Triunfo	99
Figura 30. Gráfica de tendencia de los resultados de Carbono Orgánico Total con respecto a la posición estratigráfica de las muestras de cada formación de la sección de Tunja- Villa de Leyva.	100

Figura 31. Gráfica de tendencia de los resultados de Reflectancia de Vitrinta con respecto a la posición estratigráfica de las muestras de cada formación de la sección de Tunja- Villa de Leyva	100
Figura 32. Gráfica de tendencia de los resultados de Pirolisis Rock Eval con respecto a la posición estratigráfica de las muestras de cada formación de la sección de Tunja- Villa de Leyva	101

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Corte geológico utilizado para el modelamiento geoquímico de la sección del Triunfo con base en el perfil del pozo Suesca-1, ubicado en el departamento de Cundinamarca, Colombia.	128
Anexo B. Corte geológico utilizado para el modelamiento geoquímico de la sección de Tunja- Villa de Leyva, ubicado en el departamento de Boyaca, Colombia	129
Anexo C. Columna Estratigráfica de la Formación Guaduas en la Sección del Triunfo, en el Departamento de Cundinamarca, Colombia	130
Anexo D. Columna Estratigráfica de la Sección de Tunja- Villa de Leyva, en el Departamento de Boyacá, Colombia	131
Anexo E. Histogramas de Frecuencias de Acuerdo con los Resultados de las Medidas Estadísticas de Relectancia de Vitrinita (%ro) para la Sección del Triunfo	132
Anexo F. Ejemplos del Tratamiento de Deconvolución de los Espectros Obtenidos de Resonancia Magnética Nuclear, para dos Muestras de los Mantos de Carbón de la Sección del Triunfo, con Diferente grado de Maduración Termal, Mediante el Programa DMFIT de la Universidad D'orleans de Francia	139
Anexo G. Clasificación del Kerógeno Presente en los Mantos de Carbón de la Sección del Triunfo de Acuerdo con su Grado de Maduración Termal, Mediante Pirolisis Rock Eval	142
Anexo H. Clasificación del Kerógeno Presente en las Muestras de Shales y Calizas de la Sección de Tunja-Villa de Leyva de Acuerdo con su Grado de Maduración Termal, Mediante Pirolisis Rock Eval	143

Anexo I. Gráficas de Ro con Respecto a las Siguietes Variables:

Materia Volatil (M.V), Reflectancia de Vitrinita (Ro) y Pirolisis

Rock Eval (TMax)

144

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO DE LA MADURACIÓN TERMAL DE KERÓGENOS TIPO II Y III MEDIANTE RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR (RMN) Y REFLECTANCIA DE VITRINITA (Ro), EN FORMACIONES DEL CRETÁCICO SUPERIOR Y DEL PALEÓGENO EN LA CORDILLERA ORIENTAL DE COLOMBIA.\*

**AUTOR:** TANIA SARITH PALMERA HENAO.\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Kerógeno- Maduración termal-Resonancia magnética nuclear (RMN). Reflectancia de Vitrinita (Ro) - Contenido de Materia Orgánica Total (TOC) - Pirolisis Rock Eval.

### DESCRIPCION:

El presente trabajo reporta los resultados del estudio de los procesos de maduración termal de los kerógenos tipo II y III presentes en los mantos de carbón de la formación Guaduas de edad paleogena (sección del triunfo) y en las muestras de shales y calizas de las formaciones: Paja, San Gil Superior, Churuvita, San Rafael y el Miembro Cucaita (sección de Tunja-Villa de Leyva) de edad Cretácica.

Los resultados de los análisis geoquímicos realizados a las muestras de la sección del Triunfo permitieron establecer que los mantos de carbón se encuentran clasificados de la siguiente manera: los mantos del 1 al 12, se encuentran en el final de la ventana de generación de aceite, de acuerdo con los valores de Ro que varían entre 0,83 y 1.04%, de Tmax que varían de 451° a 459°C y con los valores arrojados por el factor de aromaticidad; los mantos del 17 al 19 se encuentran en un estado de maduración temprana, de acuerdo con los valores obtenidos de Ro que varían entre 0,63 y 0.74%, de Tmax varían de 439° a 440°C y con los valores arrojados por el factor de aromaticidad.

De igual manera los resultados de los análisis geoquímicos realizados a las muestras de la sección de Tunja- Villa de Leyva permitieron establecer que los shale y las calizas de las formaciones: Paja, San Gil Superior, Churuvita, San Rafael y el Miembro Cucaita son inmaduras termalmente de acuerdo con los valores obtenidos de Tmax <450°C, es decir, que son rocas generadoras inmaduras, pero con excelente potencial para generar gas.

La metodología empleada en este trabajo se puede aplicar a la exploración, identificación y evaluación de áreas prospectivas de yacimientos no convencionales.

---

\* Proyecto de Investigación

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Mario García González, Ph. D., Profesor Titular de Geología. Co-Director: José Antonio Henao Martínez, Ph.D.

## ABSTRACT

**TITLE:** STUDY OF THERMAL MATURATION OF TYPE II AND III KEROGENS BY MAGNETIC RESONANCE (RMN) AND VITRINITE REFLECTANCE IN UPPER CRETACIC AND PALEOGEN FORMATIONS IN THE EASTERN RANGE IN COLOMBIA\*

**AUTHOR:** TANIA SARITH PALMERA HENAO\*\*

**KEY TERMS:** Kerogen- Termal maturation –Nuclear Magnetic Resonance (RMN). Vitrinita Reflectance (Ro) – Total Organic Content (TOC) – Rock Evaluation Pyrolysis.

### DESCRIPTION:

This research reports the results of studies in the processes of thermal maturation of type II and III kerogen present in the coal layers of the Guaduas formation, paleogen aged (Area of Triunfo) and in the samples of shales and limestone in the formations Paja, San Gil Superior, Churuvita, San Rafael, and el Miembro (Area of Tunja – Villa de Leyva), cretaceous aged.

The results of the geochemical analyses made to the samples coming from the area of El Triunfo led to establish that the layers of carbon are classified as follows: The layers from 1 to 12, are in the end of the oil generation window, according to the Ro values which vary between 0.83 and 1.04%, maximum temperature values between 451° and 459°, and the values of the aromaticity factor; the layers from 17 to 19 are in an early maturation stage, according to the Ro values which vary between 0.69 and 0.74%, maximum temperature values between 439° and 440°, and the values of the aromaticity factor as well.

Likewise, the results of the geochemical analyses made to the simples of the area of Tunja-Villa de Leyva led to establish that shale and limestone from the formations Paja, upper San Gil, Churivita, San Rafael and el Miembro Cucaita are thermally immature, which means that, according to the obtained values of maximum temperature <450°C, they are immature source rocks that have an excellent potential for gas generation.

The methodology applied in this work can be applied in exploration, identification and evaluation of prospective non-conventional deposits.

---

\* Research Project.

\*\* Faculty of Engineering's Physicochemistrys, School of Geology, Director: Mario Garcia González, Ph. D., Geology's Titular professor. Co-Director: José Antonio Henao Martínez, Ph.D.

## INTRODUCCIÓN

En Colombia, específicamente en la cordillera oriental son muy pocos los estudios de yacimientos no convencionales tipo Shale gas y gas asociado al carbón, que permitan entender y evaluar mediante procesos de maduración termal del kerógeno el potencial gasífero presente en dicha zona.

Por ende en el presente trabajo de investigación se escogieron dos secciones para ser estudiadas: La sección del Triunfo en el departamento de Cundinamarca y la sección de Tunja-Villa de Leyva en el departamento de Boyacá, pertenecientes a la antigua cuenca de Bogotá y a la antigua cuenca de Villa de Leyva respectivamente. Con el fin de identificar y determinar los procesos de maduración termal de los kerógenos tipo II y III, determinando así el potencial para generar hidrocarburos líquidos y gas que poseen estas áreas como yacimientos no convencionales. Estas secciones fueron escogidas debido a que las cuencas a las que pertenecieron en un principio se vieron afectadas por grandes eventos tectónicos y depositacionales durante el cretácico superior y el paleógeno que permitieron la acumulación y preservación de grandes cantidades de materia orgánica.

Las secciones estudiadas podrían en un futuro satisfacer las necesidades del mercado de los hidrocarburos, debido poseen una cantidad de reservas considerables que pueden producir por un tiempo más prolongado que un yacimiento convencional.

La explotación de este tipo de yacimientos requiere una serie de estudios geológicos previos que demuestren la viabilidad del proyecto, los cuales se realizaron en esta investigación por medio de la reflectancia de vitrinita ( $R_o$ ), resonancia magnética nuclear (RMN), pirolisis rock eval, carbono orgánico total

(TOC) y análisis proximales, demostrando que con esta tecnología se pueden identificar y evaluar áreas prospectivas para la exploración y explotación de yacimientos no convencionales.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Estudiar y analizar los procesos de maduración termal del kerógeno presente en las Formaciones Paja, Grupo San Gil, Churuvita, San Rafael y Miembro Cucaita, en la sección de Tunja – Villa de Leyva del Cretácico Superior y la Formación Guaduas, en la sección del Triunfo del Paleógeno. Estableciendo un paralelo entre los datos de: reflectancia de vitrinita, análisis proximal de carbones y resonancia magnética nuclear como indicadores de madurez termal.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Llevar a cabo la recolección de muestras de las secciones de estudio: sección Tunja – Villa de Leyva del Cretácico y de la sección el Triunfo del Paleógeno.
- Realizar el estudio petrográfico de los shales y carbones de las formaciones mencionadas mediante secciones pulidas en microscopio de luz reflejada.
- Realizar el estudio geoquímico de las Formaciones Paja, Grupo San Gil, Churuvita, San Rafael, Miembro Cucaita y Guaduas por medio de análisis químicos tales como: TOC, Pirolisis Rock Eval y reflectancia de Vitrinita ( $R_o$ ), con base en el muestreo realizado.
- Estudiar y analizar por medio de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) las Formaciones Paja, Grupo San Gil, Churuvita, San Rafael, Miembro Cucaita y Guaduas.

- Determinar y evaluar los procesos de generación de gas en shales y carbones con el fin de identificar áreas prospectivas de yacimientos no convencionales.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante los últimos años la caída de los yacimientos convencionales en el mundo ha sido inevitable y el surgimiento de los yacimientos no convencionales como alternativas para satisfacer las necesidades del mercado de los hidrocarburos es un hecho, debido a que poseen una cantidad considerable de reservas que pueden producir por un tiempo más prolongado que un yacimiento convencional. La explotación de este tipo de yacimientos requiere una serie de estudios geológicos previos que demuestren la viabilidad del proyecto, estimando así los tratamientos y la tecnología necesaria para la exploración y explotación de la roca reservorio.

En Colombia, específicamente en la cordillera oriental son muy pocos los estudios de yacimientos no convencionales tipo Shale gas y gas asociado al carbón, que permitan entender y evaluar mediante procesos de maduración termal del kerógeno el potencial gasífero presente en dicha zona.

Por ende en esta investigación se proponen técnicas de análisis geoquímicos tales como: resonancia magnética nuclear, reflectancia de vitrinita, análisis proximal de carbones, pirolisis rock eval y carbono orgánico total, como nuevas herramientas tecnológicas que permiten estudiar de forma efectiva y eficaz el grado de maduración termal de los kerógenos tipo II y III.

En el desarrollo de este proyecto de investigación se escogió un área de estudio dividida en dos secciones: la sección de Tunja – Villa de Leyva del Cretácico Superior y la sección del Triunfo del Paleógeno, ubicadas en la cordillera oriental de Colombia; con el fin de aplicar los análisis geoquímicos anteriormente nombrados para estudiar y analizar los procesos de maduración del termal del kerógeno presente en las Formaciones Paja, Grupo San Gil, Churuvita, San

Rafael, Miembro Cucaita y Guaduas, mediante las técnicas innovadoras nombradas anteriormente.

### 3. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra localizada en la región comprendida entre los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, en Colombia. Dicha región fue repartida en dos secciones: La primera, la sección del Triunfo (Figura 1.), perteneciente al departamento de Cundinamarca y la segunda, la sección de Tunja-Villa de Leyva (Figura 2.), en el departamento de Boyacá respectivamente.

La sección del Triunfo comprende las siguientes coordenadas:

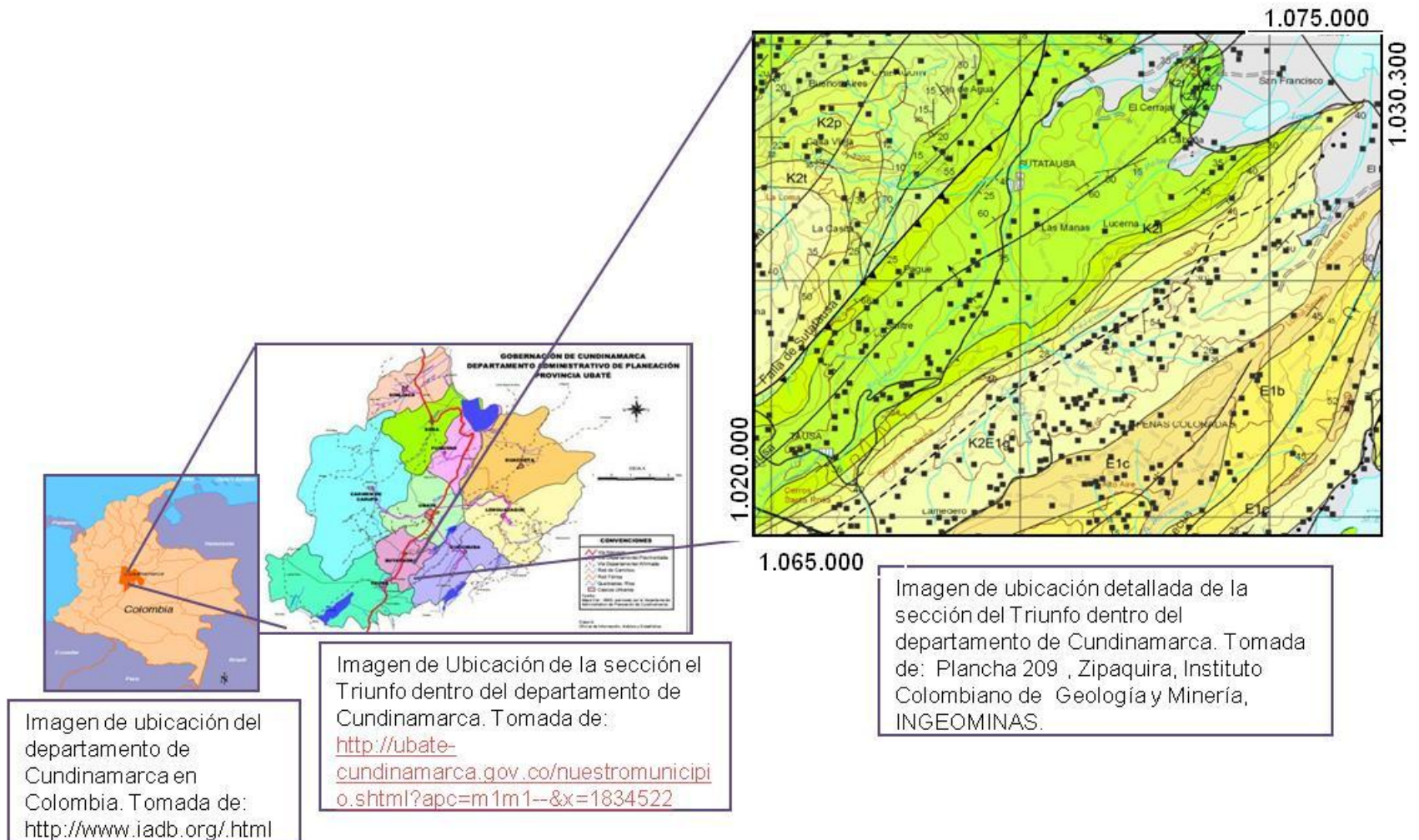
Punto Inicial: X: 1.020.000      Y:1.065.000

Punto Final: X: 1.030.300      Y:1.075.000

Esta sección se encuentra localizada entre las provincias de Sutatausa y Cucunuba al Sureste del departamento de Cundinamarca, Colombia.

La principal vía de acceso a esta sección es la carretera Bucaramanga-Bogotá, esta se une con la vía Ubate-Zipaquira-Bogota; de la cual se derivan otras vías de acceso pavimentadas que comunican específicamente los municipios de Ubate – Cucunuba, Ubate-Tausa. La sección del Triunfo cuenta también con vías sin pavimentar, pero en buen estado, que permiten acceder a veredas importantes dentro de la sección de estudio tales como: La vereda peñas del Boquerón y la Vereda la Pluma, los caminos de estas veredas se derivan de la carretera Bucaramanga-Bogotá, cerca del desvío hacia Tausa.

Figura 1. Ubicación detallada de la sección del Triunfo, en el departamento de Cundinamarca, Colombia.



Fuente principal: Plancha 209, Zipaquirá, Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS.

La segunda sección, la sección de Tunja-Villa de Leyva, comprende las siguientes coordenadas:

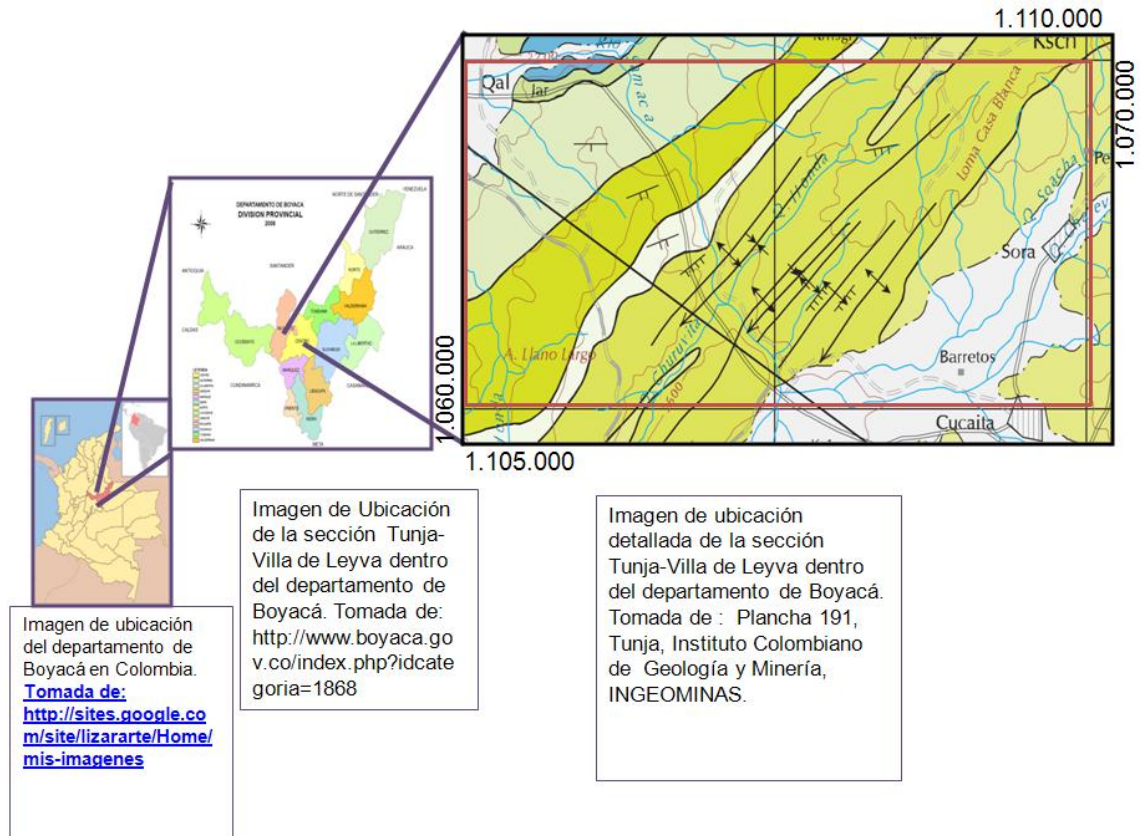
Punto Inicial: X: 1.060.000      Y: 1.105.000

Punto Final: X: 1.070.000      Y: 1.110.000

Esta sección se encuentra localizada entre las provincias del Centro y Ricaurte, al Noroeste del departamento de Boyacá, Colombia, en donde está ubicada Tunja y Villa de Leyva respectivamente.

Existen varias vías de acceso totalmente pavimentadas que facilitan el acceso a la sección de Tunja-Villa de Leyva, tales como: la carretera Bucaramanga- Bogotá que pasa Tunja, esta carretera dista de Bogotá aproximadamente 123 Km. Desde Tunja se toma un desvío por carretera que conduce hacia villa de Leyva, a uno 39 Km aproximadamente de Tunja se encuentra el municipio de Villa de Leyva. Dentro de esta sección también existen vías sin pavimentar, pero en buen estado, que facilitan y permiten el acceso a ciertas áreas específicas dentro de la sección.

Figura 2. Ubicación detallada de la sección Tunja-Villa de Leyva, en el departamento de Boyacá, Colombia.



Fuente principal: Plancha 191, Tunja, Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS.

#### 4. ANTECEDENTES

En el marco del desarrollo de este proyecto: Estudio de la maduración termal de Kerógenos tipo II y III, mediante Resonancia Magnética Nuclear (RMN) y Reflectancia de vitrinita (Ro), en formaciones del cretácico superior y del paleógeno en la cordillera oriental de Colombia; cuya área de estudio fue repartida en dos secciones: la sección de Tunja-Villa de Leyva, del Cretácico Superior, en el departamento de Boyacá y la sección del Triunfo, del Paleógeno, perteneciente al departamento de Cundinamarca, para estudiar los procesos de maduración termal del kerógeno presente en las Formaciones: Paja, Grupo San Gil, Churuvita, San Rafael, Miembro Cucaita y Guaduas, respectivamente; se han utilizado una serie de artículos de autoría internacional y tesis de grado realizadas por estudiantes de Geología de la Universidad Industrial de Santander, que han permitido conocer el manejo de las técnicas de análisis que se van a utilizar en el proyecto y algunas características geoquímicas fundamentales de las formaciones en estudio, respectivamente, tales como:

Se utilizaron dos proyectos de grado desarrollados por estudiantes de la escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander, los cuales brindaron información importante para el desarrollo de este proyecto, estos son:

Cortes Y. y Jiménez M. (2007), estudio de la Geoquímica de gas asociado a carbón en la cuenca de Bogotá. Universidad Industrial de Santander, Trabajo de grado, Biblioteca, inventario N° 122564. Por medio de este proyecto de grado se logró comprender la 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 en este proyecto indican que el contenido de gas aumenta hacia la base de la secuencia, junto con la madurez y el rango de los carbonos; y además, la secuencia de mantos de carbón de la

Formación Guaduas se encuentra completa en la sección del Triunfo, y disminuye progresivamente hacia el norte.

Bueno L. y Moreno M. (2005), estudio de la estratigrafía, petrografía y geoquímica de la ocurrencia de carbones coquizables de la formación Guaduas en la cuenca de Bogotá. Universidad Industrial de Santander, Trabajo de grado, Biblioteca, inventario N°117975. Con la información brindada por este proyecto de grado, se logró identificar, comprender y analizar los mantos de carbón coquizables y térmicos de edad Maastrichtiano a Paleoceno, presentes en la secuencia sedimentaria de la formación Guaduas. También se encontró que los estudios de este proyecto de grado permitieron conocer los ambientes de depositación de los mantos de carbón coquizables de la Formación Guaduas (mantos uno al nueve), los cuales según el estudio realizado se depositaron en la parte inferior, en ambientes parálicos desarrollados durante un Middle Lowstand y presentan las mejores características en cuanto a calidad de coquización, espesor y continuidad de los mantos, ya que se dieron las condiciones propicias para la acumulación y preservación de la materia orgánica, constituyéndose en un ambiente favorable como guía exploratoria en una secuencia sedimentaria.

Además los mantos de carbón de la parte intermedia de la Formación Guaduas (mantos Ciscuda, vidriosa, depósito, 7 Bancos y Veta Chica), se depositaron en ambientes de Late Lowstand a Transgressive y tienden a ser espesos pero discontinuos, con alto contenido de pirita y menor poder de coquización; y los mantos de la parte superior de la Formación comprendidos entre los 500 y 700m fueron depositados en un ambiente de Early Highstand a Middle Highstand, son relativamente delgados y discontinuos.

Por otra parte los artículos de autoría internacional que fueron utilizados en esta investigación brindaron información importante para el desarrollo de las técnicas de análisis, tales como: Reflectancia de vitrinita (Ro), Resonancia Magnética

Nuclear (RMN) y Contenido de Carbono Orgánico Total (TOC); permitiendo crear comparaciones, rangos y parámetros para las diferentes mediciones que se llevaron a cabo mediante estas técnicas en el presente trabajo de investigación; aunque cabe mencionar que en Colombia no se han desarrollado proyectos de investigación que estudien la maduración termal de Kerógenos tipo II y III, mediante Resonancia Magnética Nuclear (RMN) y Reflectancia de Vitrinita (Ro).

A continuación se ponen en evidencia los artículos utilizados como referencia o guía para el estudio de las diferentes técnicas (anteriormente nombradas) aplicadas en el presente proyecto de investigación:

Behar F.<sup>1</sup>, Vandenbroucke M.<sup>1</sup> y Tang<sup>2</sup>, Marquis F. and Espitalie (1997), Thermal cracking of kerogen in open and closed systems: determination of kinetic parameters and stoichiometric coefficients for oil and gas generation, *Org. Geochem*, Vol.26, N°26, N°5/6, p 321-339

Bustin R.M., Guio Y., (1999), Abrupt change (jumps) in reflectance values and chemical compositions of artificial charcoals and inertinite in coals, *International Journal of Coal Geology* 38, p. 237-260.

García González Mario, MacGowan Donald B. y Surdam Ronald C, Coal as a Source Rock of Petroleum and Gas –A comparison Between Natural and Artificial Maturation of the Almond Formation Coals, Greater Green River Basin in Wyoming, *The Future of Energy Gases*, U.S. Geological Survey Professional Paper 1570, p. 405-436.

J.R. Harmer, T.G. Callcott, M. Maeder\*, B.E. Smith (2001), A rapid coal characterisation analysis by low-resolution RMN spectroscopy and partial least-squares regression, Department of chemistry, The University of Newcastle, Callaghan, NSW 2308, Australia, *Elsevier, Fuel* 80(2001), p 1341-1349.

Miknis, F.P., Sullivan, M., Bartuska, V.J., y Maciel, G.E., (1981), Cross-polarization magic angle spinning  $^{13}\text{C}$  NMR spectra of coals of varying rank: *Organic Geochemistry*, V.3, p. 19-28.

Stéphane Gillet, Patrice Rubini, Jean-Jacques Delpuech, Jean-Claude Escalier\* and Patrice Valentin (1981), Quantitative Carbon-13 and proton nuclear magnetic resonance spectroscopy of crude oil and petroleum products. I. Some rules for obtaining a set of reliable structural parameters, *Laboratoire de Chimie Physique Organique, ERA CNRS 222, Université de Nancy I, CO 140.54037 Nancy Cedex, France, Vol 60, P 221-225.*

Stéphane Gillet, Patrice Rubini, Jean-Jacques Delpuech, Jean-Claude Escalier\* and Patrice Valentin (1981), Quantitative Carbon-13 and proton nuclear magnetic resonance spectroscopy of crude oil and petroleum products. II. Average structure parameters of representative samples, *Laboratoire de Chimie Physique Organique, ERA CNRS 222, Université de Nancy I, CO 140.54037 Nancy Cedex, France, Vol 60, P 226-230.*

Vandenbroucke M.<sup>a\*</sup>, Largeau C.<sup>b</sup> (2007), Kerogen origin, evolution and structure, *Organic Geochemistry* 38, p 719-833.

Werner Ulrike-Zwanziger<sup>a\*</sup>, Lis Grzegorz<sup>b</sup>, Mastalerz Maria.<sup>c</sup>, Schimmelmann Arndt<sup>b</sup> (2005), Thermal maturity of type II kerogen from the New Albany Shale assessed by  $^{13}\text{C}$  CP/MAS NMR, *Solid State Nuclear Magnetic Resonance* 27, p 140-148.

## **5. METODOLOGÍA**

La estrategia metodológica empleada para este estudio de investigación consta de 5 fases principalmente, descritas a continuación:

### **5.1 PLANEACIÓN DE ACTIVIDADES**

Se llevó a cabo la revisión y recopilación de estudios geológicos realizados en la sección de Tunja-Villa de Leyva y la sección del Triunfo; a su vez se realizó la búsqueda y recopilación de la información bibliográfica necesaria para el entendimiento de cada una de las técnicas de análisis químico que fueron utilizadas en este estudio de maduración termal, tales como: Carbono Orgánico Total (TOC), Pirolisis Rock Eval, reflectancia de Vitrinita ( $R_o$ ) y Resonancia Magnética Nuclear (RMN).

### **5.2 MUESTREO Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS:**

En la fase de campo se realizó el respectivo muestro de las secciones de estudio. En la sección del Triunfo, el muestro fue hecho específicamente en la Formación Guaduas, en donde se tomaron muestras de los mantos de carbón del 1 al 19, con base en la columna estratigráfica levantada por Rincón L. y Rocha A. (2007) en esta zona, cuyos frentes de explotación se encontraran en producción, con el fin de relacionar estos análisis de carbón con el contenido de gas presente.

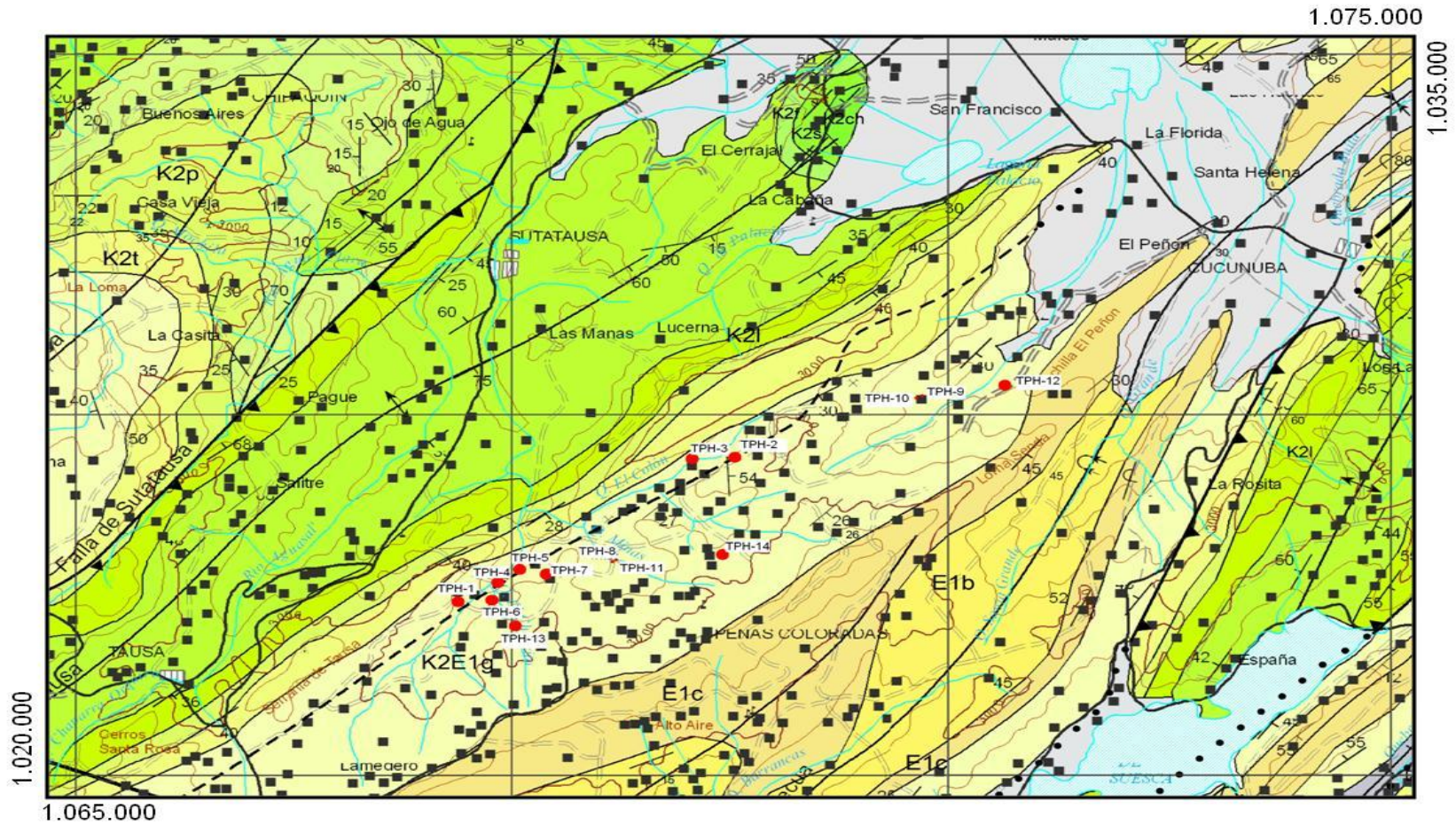
En la sección de Tunja –Villa de Leyva, se tomaron muestras de shales principalmente en las Formaciones Paja, Grupo San Gil, Churuvita, San Rafael,

Miembro Cucaita y Guaduas, con base en la columna estratigráfica levantada por Etayo F. (1968) en esta zona.

Cada una de las muestras recolectadas en campo fueron georeferenciadas y selladas herméticamente.

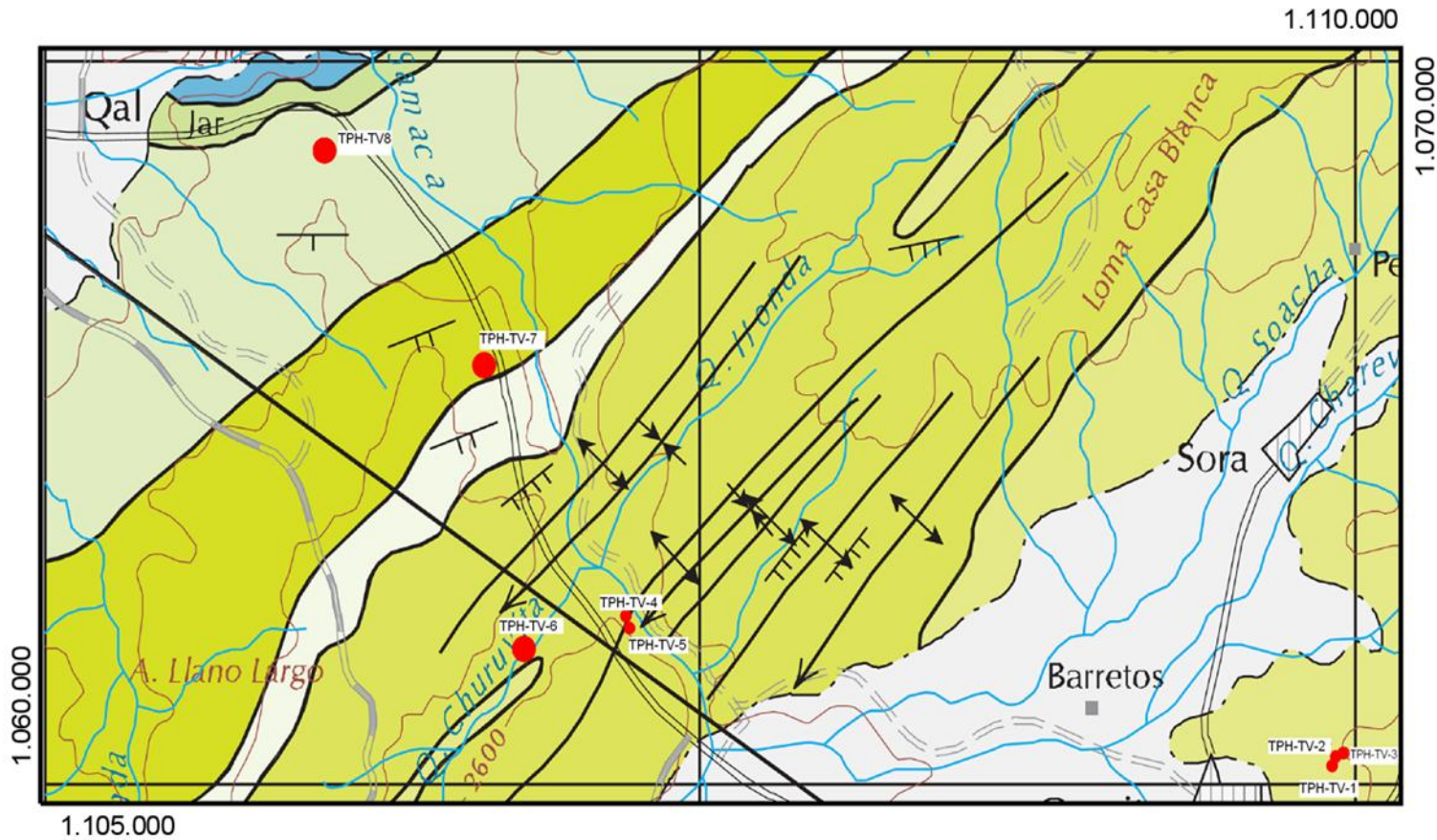
El muestreo realizado en cada una de las secciones de estudio se puede observar a continuación en los respectivos mapas geológicos de las mismas:

Figura 3. Mapa de ubicación de las muestras tomadas en la Sección del Triunfo, en el departamento de Cundinamarca, Colombia. La equivalencia estratigráfica de este muestreo se encuentra explicada en la tabla 4



Fuente: Plancha 209, Zipaquirá, Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS.

Figura 4. Mapa de ubicación de las muestras tomadas en la Sección de Tunja-Villa de Leyva, en el departamento de Boyacá, Colombia. La equivalencia estratigráfica de este muestreo se encuentra explicada en la tabla 5



Fuente: Plancha 191, Tunja, Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS

Luego se llevó a cabo la preparación de las muestras recolectadas en campo. En esta fase las muestras fueron trituradas, tamizadas de tal manera que la muestra pasara por el tamiz de 20 mesh y quedara en el tamiz de 30 mesh, para finalmente tomar una parte de las muestras tamizadas para macerarlas en un mortero de Agatha durante 20 minutos. Cada una de las muestras tratadas fue etiquetada, pesada y guardada en bolsas herméticas.

### **5.3 ANÁLISIS DE LABORATORIO**

Se realizó el estudio y análisis teórico –práctico de muestras por medio de las siguientes técnicas: % de Carbono Orgánico Total (TOC), Pirolisis Rock Eval, Reflectancia de Vitrinita ( $R_o$ ) y Resonancia Magnética Nuclear (RMN).

**5.3.1 Carbono Orgánico Total (TOC).** Para la determinación del porcentaje carbono orgánico total (TOC) se utilizaron las muestras maceradas durante 20 minutos en el mortero de Agatha. Se pesó aproximadamente 0.005(g) de cada muestra en un crisol especial que resiste la temperatura a la cual es sometido en el equipo.

Se debe verificar que las muestras no tengan contenido de carbonatos, en caso de tenerlos deben ser tratadas con ácido clorhídrico y posteriormente lavadas hasta que el ácido desaparezca. Las muestras de carbones de la sección del Triunfo no fueron tratadas, pero las muestras de shales y calizas de la sección de Tunja-villa de leyva tuvieron que ser atacadas con ácido clorhídrico para eliminar los carbonatos, posteriormente fueron lavadas.

Luego de verificar que las muestras no tenga carbonatos, se procede a introducir la muestra en el analizador de carbono y azufre Leco SC-144DR, modelo SC 144DR (Figura 5.). En esta técnica la muestra es sometida a una temperatura

entre 1350°C hasta 1500°C, en una atmósfera oxidante, durante aproximadamente 2 minutos, tiempo suficiente para que los vapores de la combustión de la muestra sean pasados a través de una celda de espectro Infrarrojo, la cual analiza la cantidad de CO<sub>2</sub> producido durante la combustión, al igual que el azufre presente y determinar así la cantidad de carbono orgánico total en cada una de las muestras de roca que incluye tanto el Kerógeno como el bitumen, esta medida es expresada a modo de %.

Figura 5. Fotografía del equipo que mide el TOC: Analizador de carbono y azufre Leco SC-144DR, modelo SC 144DR.



Fuente: Tomada del laboratorio del grupo de investigación en geología de hidrocarburos y carbones (GIGHC).

El procesamiento de los datos de %TOC y Azufre, se llevó a cabo mediante el software SC144R del analizador LECO. El instrumento fue calibrado previamente empleando diferentes patrones de calibración para carbono y para azufre.

El porcentaje de carbono orgánico total obtenido en cada una de las muestras no es por sí solo un indicador del potencial o la capacidad de una roca para generar

hidrocarburos, pero si permite clasificar la roca de la siguiente manera, según Lewan (1996):

Tabla 1. Clasificación de roca según Lewan (1996)

% DE CARBONO ORGANICO TOTAL	CLASIFICACION DE LA ROCA DE ACUERDO AL % DE TOC
0 - 0.5	Pobre
0.5 - 1.0	Regular
1.0 - 2.0	Buena
2.0 - 4.0	Muy Buena
>4.0	Excelente

**5.3.2 Resonancia Magnética Nuclear (RMN).** Para la técnica de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) se utilizaron muestras sólidas, las cuales se maceraron durante 20 minutos en el mortero de Agatha. Luego cada muestra fue introducida en el rotor del equipo ultrashield 400, modelo Bruker de RMN (Figura 6.), con los siguientes parámetros: secuencia de one pulse, frecuencia de 14 MHz para  $^{13}\text{C}$  y un ángulo mágico de rotación (MAS) de  $54^{\circ}44'$ . Las muestras de los mantos de carbón de la sección del Triunfo fueron analizadas aproximadamente durante 4 horas cada una, mientras que las muestras de shales y calizas de la sección Tunja-Villa de Leyva tuvieron que ser analizadas aproximadamente durante 24 horas cada una, pero primero fueron seleccionadas de acuerdo con los % de TOC, analizando únicamente 3 muestras pertenecientes al Miembro Cucaita y a Formación San Gil superior, dos de las muestras pertenecen al Miembro Cucaita y son: las muestras TPH-1 y TPH-2 con %TOC de 0.91 y 1.98, respectivamente y la muestra TPH-7 con un % de TOC de 3.34, perteneciente a la Formación San Gil Superior.

Figura 6. Fotografía del equipo de Resonancia magnética nuclear ultrasield 400, modelo Bruker.



Fuente: Tomada del laboratorio de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) en Guatiguará.

Los espectros resultantes del análisis de cada una de las muestras fueron tratados mediante dos programas: el Mestre-c versión 4.9.9.6, por medio del cual se hizo el alisamiento de los espectros y la posterior integración de las áreas aromáticas y alifáticas, teniendo en cuenta los límites dados por Snape (1979), para calcular el factor de aromaticidad ( $f_a$ ) mediante la siguiente ecuación:

$$f_a = \frac{\text{carbono aromático}}{\text{carbono aromático} + \text{carbono alifático}}$$

Y el programa Dmfit de la universidad D'ORLEANS en Francia, el cual es utilizado por el laboratorio de resonancia magnética nuclear de la universidad industrial de Santander para realizar las deconvoluciones de los espectros de cada una de las muestras y determinar así los posibles grupos funcionales que acompañan a los carbonos aromáticos y alifáticos de cada muestra.

La técnica de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) en muestras sólidas, permite realizar un seguimiento detallado del proceso de maduración termal que sufre la molécula de Kerógeno presente en las muestras de shales y carbones de cada una de las formaciones estudiadas, de acuerdo con los grupos funcionales identificados en cada uno de los picos de los carbonos aromáticos y alifáticos; pues de forma teórica se sabe que al aumentar el grado de maduración termal (profundidad de enterramiento) en las formaciones, la relación de aromaticidad para los shales y los carbones aumentará de forma proporcional, de igual manera se tiene que a medida que aumentan los compuestos aromáticos comenzaran a aparecer grupos funcionales tales como: el grupo cetona y los radicales orgánicos, disminuyendo notablemente los compuestos alifáticos.

**5.3.3 Reflectancia de Vitrinita (Ro).** La técnica de Reflectancia de Vitrinita, es una técnica derivada de los estudios del carbón y es utilizada para evaluar el grado de evolución térmico de la roca. Hasta el momento esta es la técnica más ampliamente utilizada para estudiar la madurez térmica de las rocas, debido a que la vitrinita (maceral) va cambiando su reflectividad en la medida que aumenta la madurez termal de la roca.

Esta técnica permite medir el poder reflector del Kerógeno y para ello se necesita que la muestra este totalmente pulverizada, macerada y pulida. La Ro aumenta durante la maduración térmica, debido a reacciones de aromatización irreversibles y complejas. Es importante tener en cuenta que la Ro no se puede medir en rocas que carezcan de vitrinita. Los resultados de las mediciones de esta técnica se expresan a manera de %.

Para este estudio se elaboraron 22 secciones pulidas, de las cuales 14 secciones fueron de los principales mantos de carbón de la Formación Guaduas (mantos del 1 al 19), en la sección del Triunfo y 8 secciones de shales y calizas de las

formaciones: Paja, Grupo San Gil, Churuvita, San Rafael y del Miembro Cucaita, de la sección de Tunja-Villa de Leyva. El procedimiento que se llevó a cabo con estas secciones pulidas fue el siguiente:

Primero se toman las muestras que fueron previamente trituradas, tamizadas de tal manera que la muestra pasara por el tamiz de 20 mesh y quedara en el tamiz de 30 mesh, del resultado de este proceso se pesaron de 3 a 5 gramos aproximadamente, posteriormente estas muestras fueron impregnan 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.

Luego se procede a tomar las medidas de Reflectancia de vitrinita ( $R_o$ ) mediante un microscopio fotómetro Zeiss Modelo MPM400 (Figura 7.), utilizando objetivos de inmersión en aceite y una fuente de luz blanca reflejada.

Figura 7. Fotografía del equipo que mide la Reflectancia de vitrinita: Microscopio fotómetro Zeiss Modelo MPM400.



Fuente: Tomada del laboratorio del grupo de investigación en geología de hidrocarburos y carbones (GIGHC).

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. A si mismo los datos obtenidos 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.

Finalmente luego de la calibración del equipo se toman 30 lecturas de Ro por cada sección pulida, en las lecturas se deben identificar claramente los macérales de vitrinita sobre la superficie pulida y se debe tener cuidado de tomar lecturas en otros tipo de macérales diferentes a la vitrinita, pues se alterarían fuertemente los resultados. La desviación estándar de las 30 lecturas de Ro por sección pulida debe ser menor a 0.003.

Con los %Ro obtenidos se clasificaron las muestras estudiadas de acuerdo con una comparación entre el grado de madurez térmico de la muestra y su respectivo %Ro, mediante la siguiente tabla:

Tabla 2. %Ro establecidos de forma internacional.

<b>% DE REFLECTANCIA DE VITRINITA</b>	<b>GRADO DE MADUREZ TERMICO DE LA ROCA</b>
0.2 - 0.6	Inmadura
0.6 - 0.65	Madurez Temprana
0.65 - 0.9	Pico de Generación
0.9 - 1.35	Madurez Tardía
>1.35	Postmadura

**5.3.4 Calculo proximal de Carbones.** Esta técnica funciona como un indicador más de madurez termal únicamente para las muestras de carbones de la sección del Triunfo.

Para los análisis proximales se utilizaron las muestras de carbón de la sección del triunfo, las cuales fueron previamente tamizadas y maceradas en un mortero de Agatha. Calculando principalmente el % en peso de Humedad, Materia Volátil, Cenizas y Carbono Fijo de cada una de las muestras de carbón. Estos análisis se basaron en las normas ASTM y fueron realizados por duplicados para cada muestra.

Los resultados que se obtienen generan una aproximación que caracteriza los carbones térmicos y coquizables, siendo este el principal método de evaluación de los rangos del carbón, el cual permite determinar el grado de madurez termal.

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

- Humedad:

Para determinar el contenido de agua presente en cada una de las muestra de carbón, se tuvo que pesar aproximadamente 1 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. El % de Humedad de las muestras fue determinado mediante la siguiente formula, de acuerdo con las diferencias de peso:

$$\% H = \frac{M2 - M3}{M2 - M1} * 100$$

Siendo:

H: Humedad

M1: Peso del crisol vacío.

M2: Peso del crisol vacío + 1 gramo de Muestra

M3: Peso del crisol después de la experiencia.

- Materia Volátil:

Mediante esta técnica la materia volátil es eliminada totalmente durante el proceso de carbonización. La materia volátil es utilizada como un importante indicador en la predicción del grado de carbonización y del grado de madurez termal de los carbones.

Para este análisis se utilizó 1 gramo de muestra pesada en un crisol con tapa, el cual fue introducido posteriormente en una mufla a una temperatura aproximadamente entre 930 y 970°C durante 7 minutos.

Las diferencias de peso obtenidas indican la cantidad de materia que se quemó, para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$\% MV = \frac{M2 - M3}{M2 - M1} - H * 100$$

MV: Materia Volátil

M1: Peso del crisol vacío.

M2: Peso del crisol vacío + 1 gramo de Muestra

M3: Peso del crisol después de la experiencia.

- Cenizas:

El contenido de cenizas es el material incombustible del carbón y representa la cantidad de impurezas y el carbón efectivo disponible en cada muestra, con los cuáles 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 entre 900 y 950°C durante una hora. Las diferencias de peso indican el contenido de cenizas presentes en cada muestra, la ecuación utilizada para su cálculo fue la siguiente:

$$\% CZ = \frac{M3 - M1}{M2 - M1} * 100$$

CZ: Cenizas

M1: Peso del crisol vacío.

M2: Peso del crisol vacío + 1 gramo de Muestra

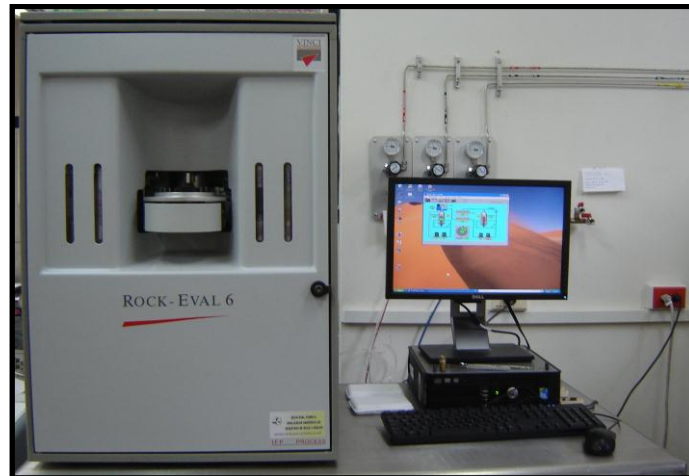
M3: Peso del crisol después de la experiencia

**5.3.5 Pirolisis rock eval.** El procedimiento analítico realizado mediante la pirolisis rock eval permite de forma rápida y a partir de una pequeña cantidad de muestra, evaluar los diferentes tipos de materia orgánica junto con su grado de evolución térmica y su potencial para generar hidrocarburos líquidos o gas. Las muestras utilizadas para el desarrollo de esta técnica fueron previamente trituradas, tamizadas y maceradas durante 20 minutos en el mortero de Agatha.

Las muestras fueron dispuestas en el analizador anhídrido de muestras de roca y suelos Rock Eval 6 (Figura 8.) de acuerdo con la sección de estudio a la que

pertencieran, cada una de las muestras fue calentada en el horno del equipo en atmosfera inerte, a una rata aproximada de 25°C/minuto hasta alcanzar 850°C.

Figura 8. Fotografía del equipo de pirolisis rock eval: Analizador anhídrido de muestras de roca y suelos Rock Eval 6.



Fuente: Tomada del laboratorio del grupo de investigación en geología de hidrocarburos y carbones (GIGHC).

Los productos que se obtienen durante el proceso analítico del equipo van siendo medidos, obteniendo así los valores de los picos S1, S2 y S3 junto con la medida del índice de producción (IP), la temperatura máxima (Tmax), el índice de hidrogeno (IH) y el índice de oxigeno (IO). A continuación se hará una breve descripción de cada uno de los resultados que se obtienen durante este proceso:

Pico S1, corresponde a la medida de los hidrocarburos libres expresados en mg/g que pueden ser volatilizados fuera de la roca a temperaturas menores a 200°C, sin craquear el kerógeno.

Pico S2, corresponde a los hidrocarburos producidos durante el calentamiento por craqueo del kerógeno, son expresados en mg/g; estos representan el potencial actual que posee la roca para generar hidrocarburos líquidos o gas.

Pico S3, corresponde a la medida de CO<sub>2</sub> producido durante la pirolysis, es expresado en mg/g.

Índice de producción (IP), es la medida del avance de la generación de hidrocarburos líquidos y gas en una roca. Puede ser calculado mediante la siguiente relación:  $IP = S1/S1+S2$ .

Índice de hidrogeno (IH), es un indicador de la cantidad de hidrogeno disponible en el kerógeno. Puede ser calculado mediante la siguiente relación:  $IH = (S2/TOC)*100$  (mgHC/TOC).

Índice de oxigeno (IO), es un indicador de la cantidad de oxigeno presente en el kerógeno. Puede ser calculado mediante la siguiente relación:  $IO = (S3/TOC)*100$  (mgCO<sub>2</sub>/TOC).

Temperatura máxima (Tmax), corresponde a la temperatura máxima alcanzada durante el análisis (S2). Es considerada como una medida de la madurez termal del kerógeno y se encuentra controlada por el tipo de materia orgánica. Según Espitalie y otros (1985) por medio de los resultados de Tmax se pueden clasificar las rocas de acuerdo con su potencial para generar hidrocarburos de la siguiente manera: las rocas generadoras inmaduras presentan valores de Tmax < 435°C, las rocas en estado de maduración temprana muestran valores de Tmax entre 435°-445°C, las rocas en pico de generación de hidrocarburos presentan valores de Tmax entre 445°-450°C, las rocas que se encuentran en el final de la ventana de generación de aceite presentan valores de Tmax entre 450°-470°C y las rocas sobremaduras poseen muestran valores de Tmax > 470°C.

El tratamiento de los resultados obtenidos por medio de las mediciones del equipo de pirolisis rock eval se llevó a cabo mediante el programa Rockint, el cual permite exportar los datos para realizar los respectivos diagramas utilizados en el procesamiento analítico de los mismos.

#### **5.4 CORRELACIÓN DE RESULTADOS CON EL MODELAMIENTO GEOQUIMICO**

El modelamiento geoquímico se llevo a cabo para el eje del sinclinal Checua-Lenguazaque, en la sección del Triunfo, en el departamento de Cundinamarca y para el eje del anticlinal de Arcabuco, en la sección de Tunja- Villa de Leyva, en el departamento de Boyacá con el fin de determinar el grado de madurez en estos dos puntos.

Para llevar a cabo el modelamiento geoquímico de las secciones de estudio de esta investigación fue necesario realizar los siguientes diagramas con sus respectivos cálculos:

**5.4.1 Historias De Subsistencia.** Los diagramas de subsidencia permiten conocer las profundidades que existían en las cuencas a lo largo del tiempo de depositación de las mismas, sin embargo para construir estos diagramas se deben tener en cuenta las siguientes variables: las unidades geológicas con su respectiva edad y litología, las discordancias presentes, hiatos deposicionales, cálculo de decompactación, entre otros.

El modelamiento geoquímico de las secciones de estudio se realizo con base en los siguientes cortes geológicos:

Para la sección del Triunfo, ubicado en la antigua cuenca de Bogotá, se utilizo el corte geológico de la Figura 11 (Ver anexo A.) del artículo de Debgó C<sup>2</sup>. y Covey C<sup>3</sup>., cuyo título es: Structure of the Eastern cordillera of Colombia: Implications for trop styles and Regional tectonics and Regional tectonics, publicado en The American Association of Petroleum Geologists Bulletin Vol.8, p. 1315-1337.

Para la sección de Tunja Villa de Leyva, ubicada en la antigua cuenca de Villa de Leyva, se utilizo el corte geológico C-C' del artículo de Kammer A. (1997), cuyo título es: Los pliegues del sinclinal de Tunja. Análisis Estructural y Modelamiento Geométrico, publicado en Geología Colombiana Vol.22 p. 3-25 (ver anexo B).

Con base en los datos brindados por los cortes geológicos para cada una de las secciones de estudio se construyo posteriormente un diagrama de subsidencia, cuyo eje x corresponde al tiempo y el eje y corresponde a el espesor (espesor actual) de cada formación, y se procedió a determinar el espesor inicial para las mismas. Sin embargo, para calcular el espesor inicial, se tuvo que calcular la decompactación, teniendo en cuenta los cálculos de porosidad establecidos en tablas para cada litología, según el diagrama de Van Hinte (1978), (ver figura 9), donde muestra la variación del espesor de las unidades a través del tiempo de enterramiento teniendo en cuenta la porosidad.

A continuación se muestra la ecuación determinada a partir del diagrama de Van Hinte para calcular el espesor inicial ( $T_0$ ) de cada formación:

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

Teniendo en cuenta que:

$\phi$ : Es porosidad

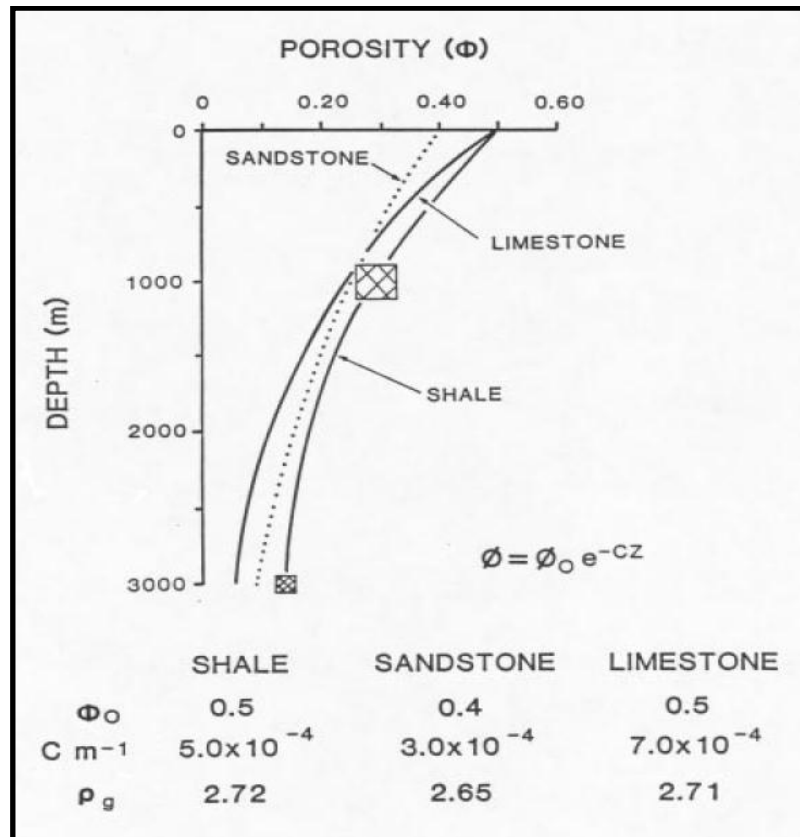
To: Es el espesor inicial

Tn: Es el espesor final

De igual manera la rata de decrecimiento de la porosidad durante enterramiento puede ser determinada empíricamente mediante una simple relación exponencial para el cambio de porosidad en las formaciones, mediante la siguiente ecuación:

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

Figura 9. Variación de la porosidad en función de la profundidad, tabla de valores estándar para porosidades iniciales de cada litología, según Van Hinte (1978).



Fuente: Tomado de Van Hinte (1978).

**5.4.2 Diagramas De Tiempo –Temperatura.** Para determinar 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,  $\rho_c$  corresponde a la densidad.

	K[mW/m-K]	$\rho_c$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\phi_o$	$\sigma_c$ [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 <sup>8</sup>	0

Los diagramas de Tiempo – Temperatura se grafican a partir de los datos obtenidos con la ecuación de Fourier con base en las historias de subsidencia decompactadas para cada una de las secciones de estudio, realizadas en el paso anterior, la ecuación de Fourier es la siguiente:

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

Teniendo en cuenta que:

$T_z$ : Es la temperatura del horizonte a calcular

$T_0$ : Es la temperatura superficial, la cual se estimó en 20 °C para sección dl Triunfo y en 20°C para la sección de Tunja- Villa de Leyva.

Q: Es el flujo de calor el cual se calculó para la sección de Triunfo 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 60 mV/m<sup>2</sup> y para la sección de Tunja-Villa de Leyva en base a datos de temperaturas de fondo del pozo Tunja-1, tratamiento que se llevo a cabo en trabajos de tesis anteriores y dio como resultado un flujo de 60 mV/m<sup>2</sup>.

X: Es el espesor para cada formación, este se toma a partir de los espesores decompactados.

$\Lambda$ : Es la conductividad térmica 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:  $\lambda_{matriz}$  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).  $\lambda_{fluido}$  es la conductividad del agua equivalente a 0.56  $\approx$  0.6 W/m/k; y  $\phi$  es la porosidad calculada durante la decompactación.

**5.4.3 Método Cinético.** El método cinético muestra la razón de transformación (TR) según Tissot y Welte, (1984). Este método permite cuantificar la cantidad de hidrocarburos generados por las reacciones químicas de transformación de kerógeno en gas, dicha cuantificación se lleva a cabo con un modelo cinético de degradación térmica del kerógeno con incrementos de las temperaturas a lo largo del tiempo.

Para llevar a cabo el desarrollo del método cinético se deben analizar las dos ecuaciones de Arrhenius de la siguiente manera:

La primera ecuación es:  $dC/dt = -kC^n$  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 es el factor de frecuencia, E es la energía de activación, R es la constante de los gases (1.987 calorías/mol/°K) y T es la temperatura absoluta en K.

Por otra parte la segunda ecuación tiene que ver con la rata de transformación (TR), la cual se define como la fracción de kerógeno transformado a hidrocarburo líquido o gas con relación al potencial genético de algún tipo específico de kerógeno y se calcula mediante 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 de transformación.

$\sum C_i$ : Es el potencial genético o la masa de kerógeno transformada a hidrocarburos líquidos o gas cuando la reacción esta completa.

$Y_o$ : Es el aceite de origen bioquímico.

Además se tiene que teóricamente 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 hidrocarburos.

## **5.5 ANALISIS DE RESULTADOS**

En esta fase se llevó a cabo los análisis de resultados correspondientes a cada una de las técnicas aplicadas en este estudio, nombradas anteriormente, generando así los respectivos análisis y conclusiones de acuerdo con el desarrollo de cada una de las fases metodológicas.

## 6. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El área de estudio de esta investigación se encuentra localizada en la cordillera oriental de Colombia, específicamente en la región comprendida entre los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. Dicha región fue repartida en dos secciones: La primera, la sección del Triunfo, pertenece al departamento de Cundinamarca y la segunda, la sección de Tunja-Villa de Leyva, en el departamento de Boyacá respectivamente.

La cordillera Oriental es una cadena plegada que cabalga hacia el Este sobre la cuenca de los Llanos Orientales y hacia el Oeste sobre la cuenca del Valle Medio del Magdalena, se extiende en dirección noreste desde el macizo Colombia en el departamento del Huila hasta la serranía de Perijá. Esta región presenta grandes controles tectónicos sobre la acomodación de las cuencas sedimentarias, asociado a grandes orogenias. A continuación se explicaran los principales eventos evolutivos de la cordillera oriental (Figura 10), con base en los cuales se podrá entender el marco geológico regional que forjó lo que actualmente son las dos secciones estudiadas:

En el Mesozoico específicamente en el Triásico –Jurásico se produce un fuerte evento distensivo causado por la disgregación de Pangea y la apertura del Paleocaribe, lo cual genera que en el cretácico se produzcan múltiples eventos sedimentológicos y tectónicos que formaron, moldearon y rellenaron las cuencas que constituyen lo que actualmente es la cordillera oriental colombiana, junto con algunos eventos de baja actividad magmática. Los eventos tectónicos que afectaron al oriente colombiano durante este periodo fueron de tipo distensivos y estaban controlados por fallamientos de tipo normal, causando así una extensión y un crecimiento cortical con fuertes subsidencias principalmente en las cuencas del valle Medio del Río Magdalena y la sabana de Bogotá, permitiendo

deposiciones marinas epicontinentales en ambientes bastantes tranquilos, producto de una importante transgresión marina.

El mar que cubría el Valle medio del Magdalena y la Cuenca de Bogotá transgredió lentamente hacia el sur llegando hasta la región del Tolima y del Huila durante el Aptiano, para luego extenderse hacia el Putumayo. La depresión del Cretácico temprano fue probablemente una cuenca bastante cerrada protegida de las acciones del océano abierto situado al W y al NW. Esta situación insinúa la presencia de una barrera entre la cuenca epicontinental del Oriente Andino y el océano abierto. En esta región oriental, ninguna discordancia angular se presenta en las secuencias sedimentarias; el magmatismo está reducido a unos pocos stocks gabroicos y el metamorfismo está totalmente ausente (Según Tossaint, 1996).

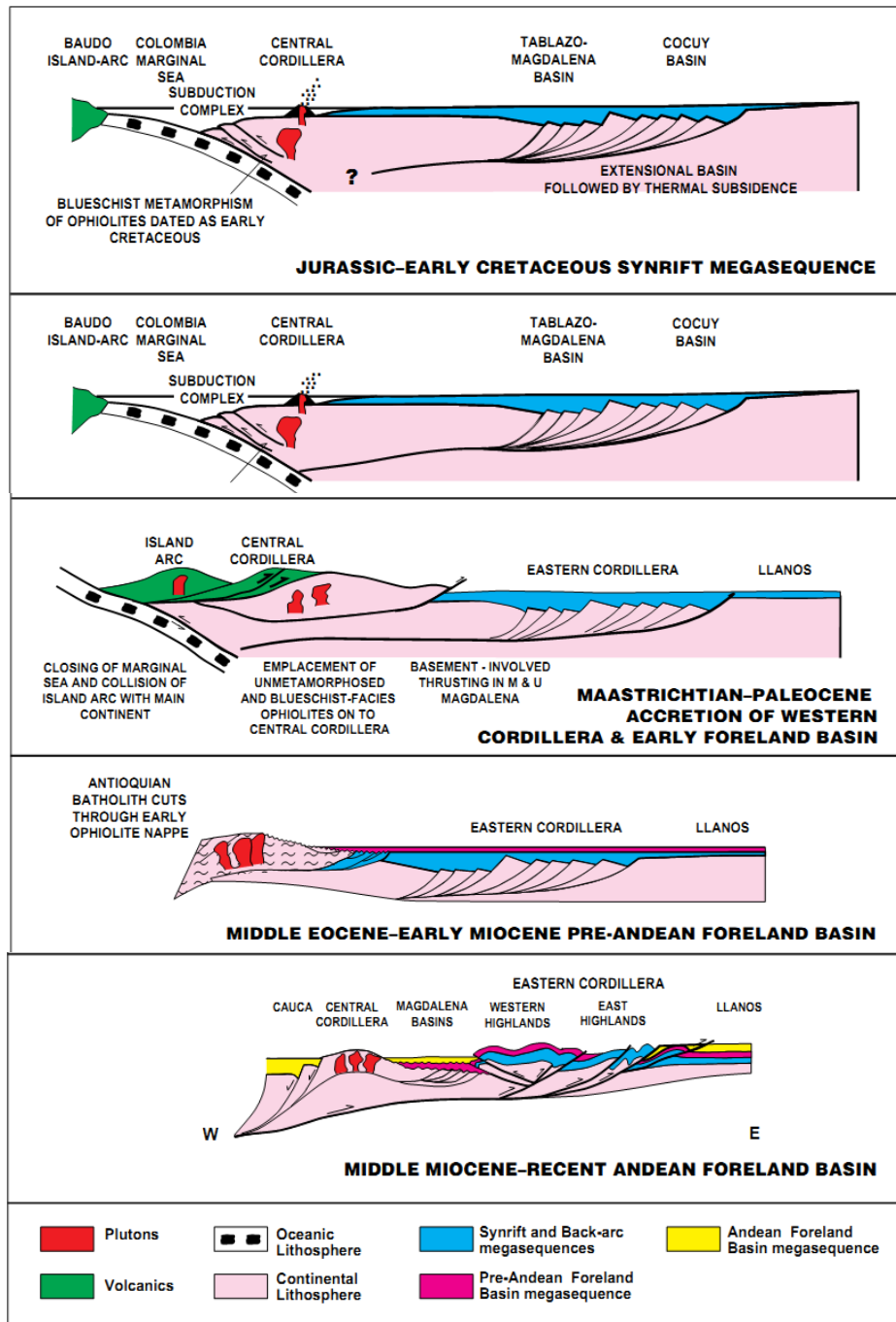
Luego de un prolongado periodo de depositación durante el Mesozoico en el cretácico inferior y medio, se produce la acreción de la Cordillera Occidental durante el Mesozoico en el cretácico superior Maastrichtiano y cenozoico en el paleoceno, generándose así el levantamiento de la cordillera central y la creación de una cuenca antepaís hacia el este, durante este evento se originan cabalgamientos con transporte tectónico principalmente en dirección SW, evidenciados en el valle medio del Magdalena.

El levantamiento estuvo seguido de un episodio depositacional desde el Maastrichtiano medio, consistente de facies litorales, planicies aluviales, planicies costeras y depósitos estuarinos dando origen a las formaciones Guaduas y Cacho las cuales fueron resultado de la depositación en el centro de la cuenca de gran cantidad de materia orgánica en condiciones parálidas, favorables a la formación de mantos de carbón (formación Guaduas) a través de la cordillera Oriental. (Fabre 1983).

Es aquí donde el oriente colombiano es afectado por un fuerte régimen tectónico durante el cenozoico en el eoceno medio que genera deformaciones, levantamientos y erosiones, lo cual es denominado como la fase preandina. El último periodo de tectonismo de gran importancia para el área de estudio tuvo lugar a finales del Neógeno durante el mioceno medio, donde se presenta un incremento de la carga tectónica en la cuenca desde el Oeste producida por la continua acreción de la cordillera Occidental, esto dio probablemente como resultado la formación de fallas inversas tales como las de Chocontá, Teatinos y Boquerón. (Fabre 1983).

Finalmente en cenozoico en el mioceno medio y superior, importantes fases de tectónica compresiva interrumpen la subsidencia de las dos cuencas, cuyos sedimentos son plegados y fallados, esto se conoce también como la orogenia intraterciaria. La nueva cordillera Oriental emerge y es interesante notar que las zonas más subsidentes de las dos cuencas del valle medio del Magdalena y de los llanos, forman actualmente los dos flancos cabalgantes de la cadena. Las profundas paleofallas normales, que limitaban las cuencas durante la fase de extensión parecen haber sido reactivadas como fallas inversas durante las fases de compresión del mioceno, puesto que representaban planos de debilidad preferenciales a lo largo de los cuales la cordillera Oriental pudo cabalgar respectivamente hacia el Este (sobre el borde de los llanos orientales) y hacia el Occidente (sobre el valle medio del Magdalena) (Fabre 1983).

Figura 10. Modelo secuencial del desarrollo tectónico regional para la Cordillera Oriental.



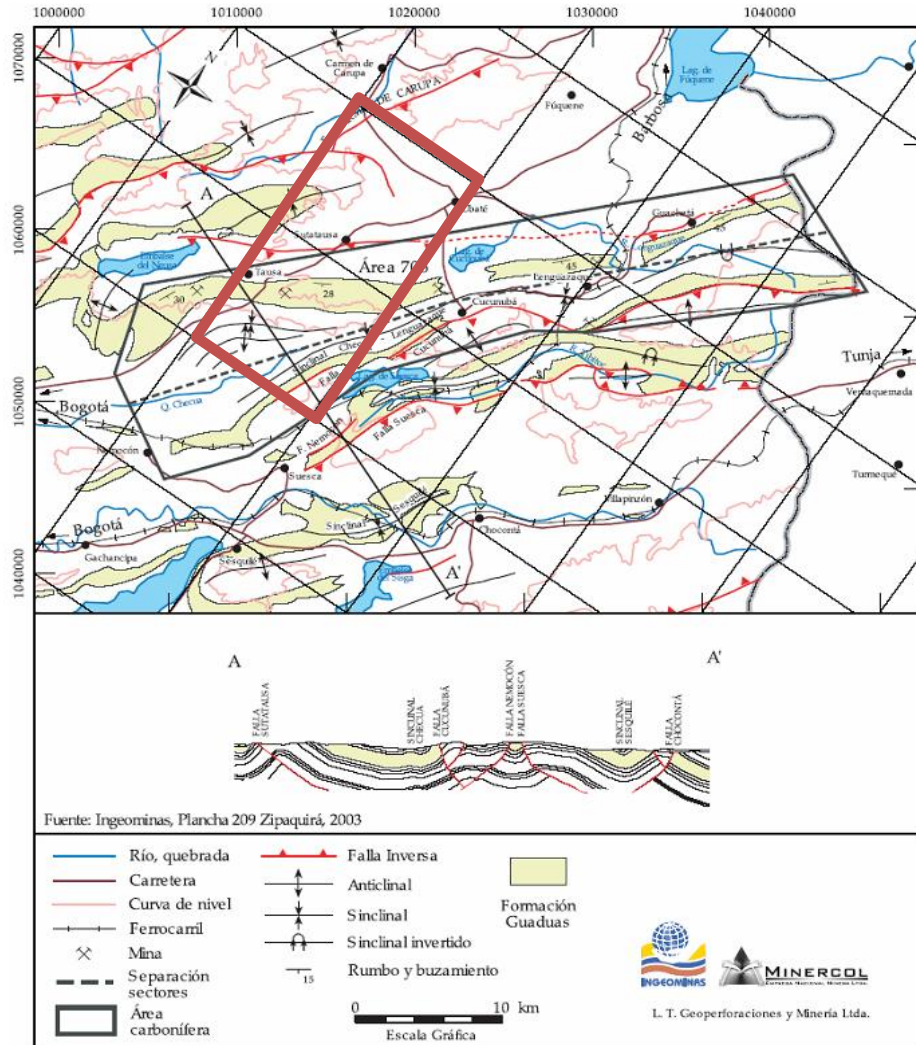
Fuente: Tomado de Cooper M.A, Basin development and tectonic history of the llanos basin, Eastern cordillera, and middle Magdalena valley Colombia, 1995.

## 7. MARCO GEOLOGICO LOCAL

### 7.1 SECCION DEL TRIUNFO

**7.1.1 Geología Estructural.** La sección del Triunfo se encuentra localizada entre las provincias de Sutatausa y Cucunuba al Sureste del departamento de Cundinamarca, específicamente sobre el sinclinal de checua-Lenguazaque, el cual es una estructura asimétrica, cuyo rumbo es SW-NE, su flanco occidental presenta buzamientos entre 20° y 65° y su flanco oriental tiene inclinaciones más fuertes y frecuentes inversiones en sus capas, causadas principalmente por efecto de la falla de Cucunuba (ver Figura 11.). Esta estructura se encuentra limitada por dos fallas de tipo inverso, la falla de Cucunubá hacia su flanco oriental y la falla de Sutatausa hacia su flanco occidental.

Figura 11. Mapa geológico y estructural de la sección del Triunfo, dentro del sinclinal de Checua-Lenguazaque.



Fuente: Tomado de El carbón Colombiano, recursos, reservas y calidad, INGEOMINAS, 2004

**7.1.2 Estratigrafía.** El sinclinal de checua-Lenguazaque está constituido hacia su núcleo por rocas de las formaciones Guaduas, cacho, Bogotá y depósitos cuaternarios y hacia la parte de sus flancos por rocas de las formaciones Churuvita ,Simijaca, Frontera, Conejo, Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna (ver Figura 12.). A continuación se hará una breve descripción de la formación Guaduas, sobre la cual se realizó el estudio de esta sección:

## **FORMACION GUADUAS**

La Formación Guaduas posee una edad del Maastrichtiano superior al Paleoceno inferior, según estudios de palinología realizados por Sarmiento en 1992. Fue descrita inicialmente por Hettner (1892, en De Porta, 1974) para referirse a los materiales que afloran en la región de Bogotá y que están por encima del Grupo Guadalupe. Luego fue descrita por Hubach (1931), el cual denominó como piso Guaduas a la secuencia que suprayace al Grupo Guadalupe y es infrayacida por el piso de Bogotá.

Posteriormente la formación es redefinida por Sarmiento (1994), en donde Guaduas está limitada en su parte inferior por la formación Guadalupe y en la parte superior por la formación Cacho. Sarmiento logra diferenciar 5 segmentos importantes de la formación Guaduas con base en características morfológicas de la zona, los cuales se muestran claramente en la columna estratigráfica de la Figura 11, con un espesor total aproximado de 1080m. A continuación serán descritos los segmentos estratigráficos de la formación Guaduas:

El primer segmento, de base a techo, denominado como segmento A, posee un espesor aproximado de 220m y está constituido principalmente por un conjunto de arcillolitas, lodolitas y areniscas hacia la parte inferior, y por un conjunto de rocas de grano muy fino acompañadas del primer sector de mantos de carbón (los cuatro primeros mantos de carbón) e intercaladas a su vez con lodolitas y limolitas hacia la parte superior.

El segmento B, posee un espesor aproximado de 30m y esta constituidos principalmente por capas de areniscas denominada como Areniscas la Guia, cuyas capas son cuneiformes y varían de delgadas a medias.

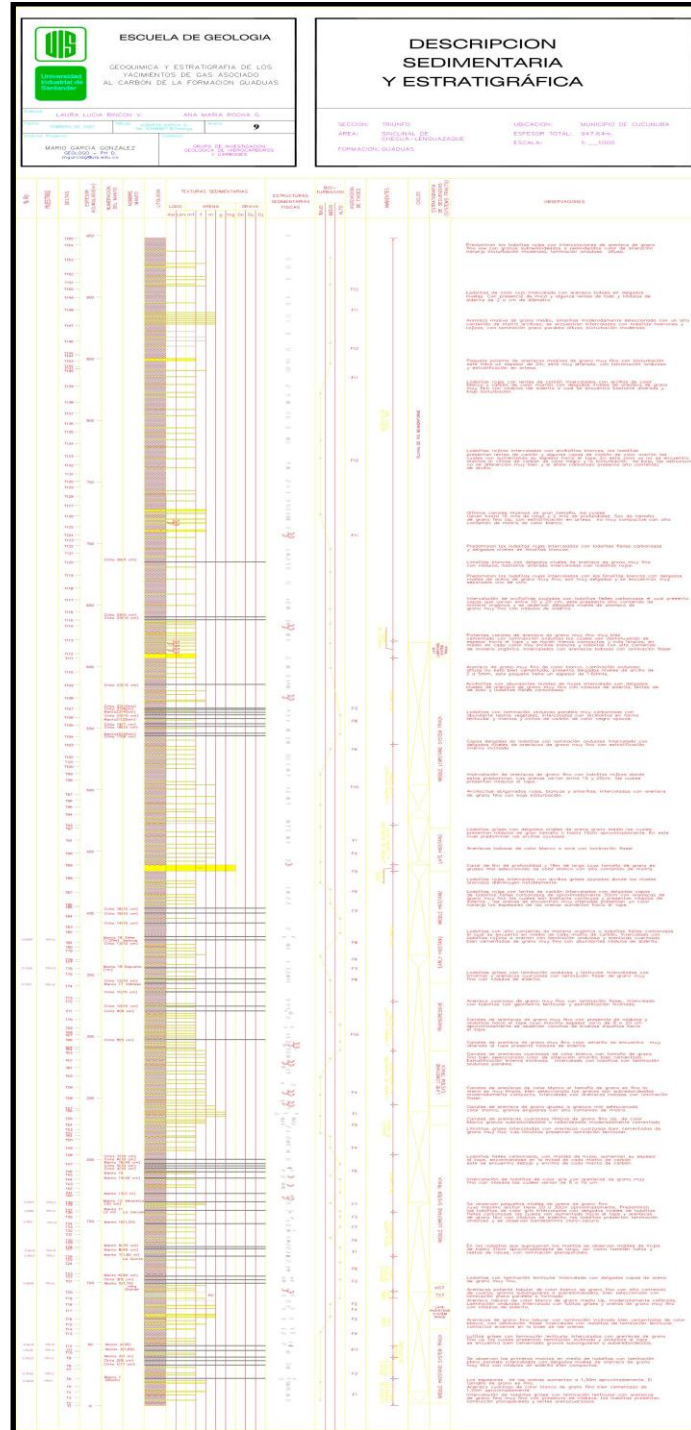
Posteriormente el segmento C, presenta un espesor aproximado de 250m, en este segmento se encuentra el segundo sector de mantos de carbón, cuyo espesores varían de 40cm a 3m, constituyendo así el segundo sector productivo, los mantos de carbón están intercalados a su con lodolitas, limolitas y areniscas de grano muy fino.

El segmento D, muestra un espesor aproximado de 370m, la secuencia de este segmento está dada por una intercalación de areniscas de grano muy fino con lodolitas y limolitas con laminación plana paralela, estas a su vez están intercaladas con mantos de carbón, cuyos espesores varían de 65cm a 1,80m y los cuales constituyen el tercer conjunto productor de la zona.

Finalmente el segmento E, posee un espesor aproximado de 220m y está constituido principalmente por limolitas y arcillolitas dispuestas en capas gruesas y bancos de color rojizo y verdoso.

La formación Guaduas se encuentra en contacto neto y concordante con la formación infrayacente arenisca Labor y Tierna, pertenecientes al Grupo Guadalupe y en contacto erosivo suprayacente con la formación cacho.

Figura 12. Columna Estratigráfica de la Formación Guaduas en la sección del Triunfo (ver anexo C), en el departamento de Cundinamarca, Colombia.

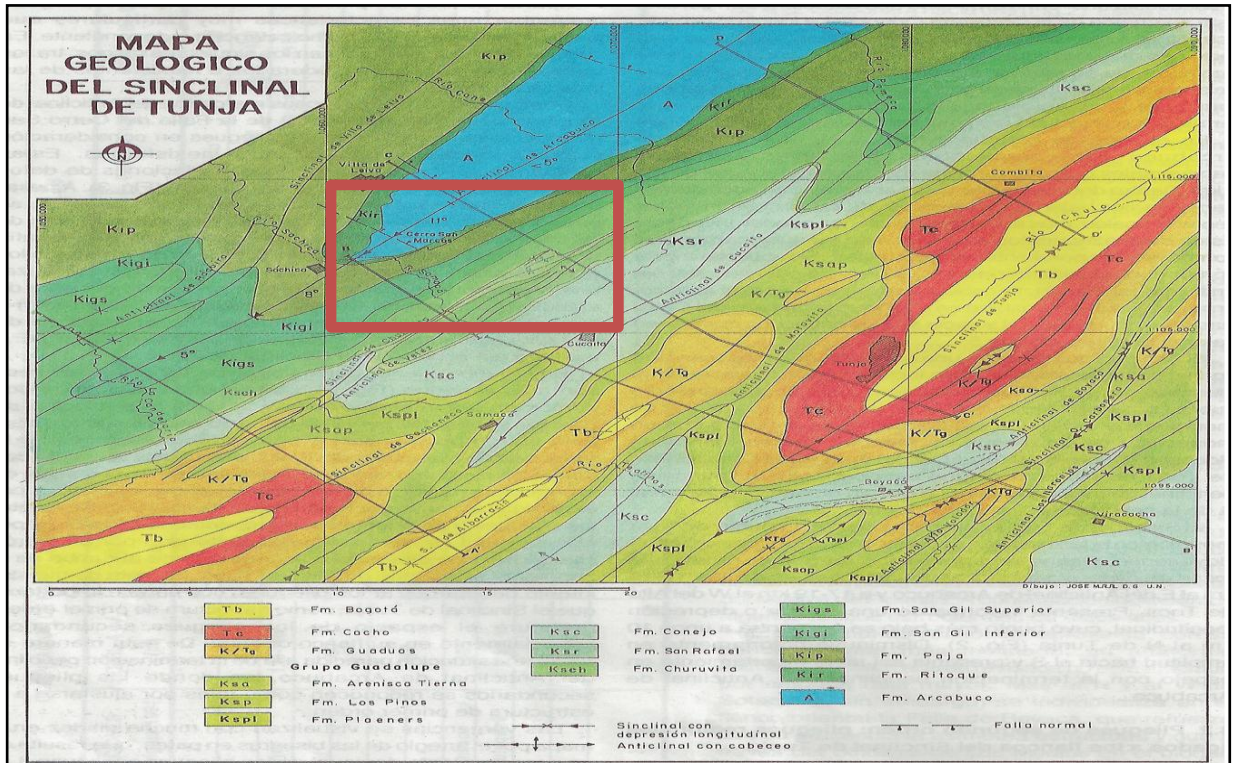


Fuente: Modificada de Rincón L. y Rocha A. 2007.

## 7.2 SECCIÓN TUNJA- VILLA DE LEYVA

**7.2.1 Geología Estructural.** La sección de Tunja-Villa de Leyva se encuentra localizada entre provincias del Centro y Ricaurte, al Noroeste del departamento de Boyacá, específicamente sobre el anticlinal de Arcabuco (Figura 13.), el cual es una estructura asimétrica, cuyo flanco oriental presenta buzamientos que varían entre  $60^\circ$  y  $89^\circ$ , formando así lo que se denomina como antiforme asimétrico, y su flanco occidental que es menos inclinado, con buzamientos que varían entre  $30^\circ$  y  $59^\circ$ . Esta estructura no se encuentra afectada por ningún tipo de falla mayor en esta zona.

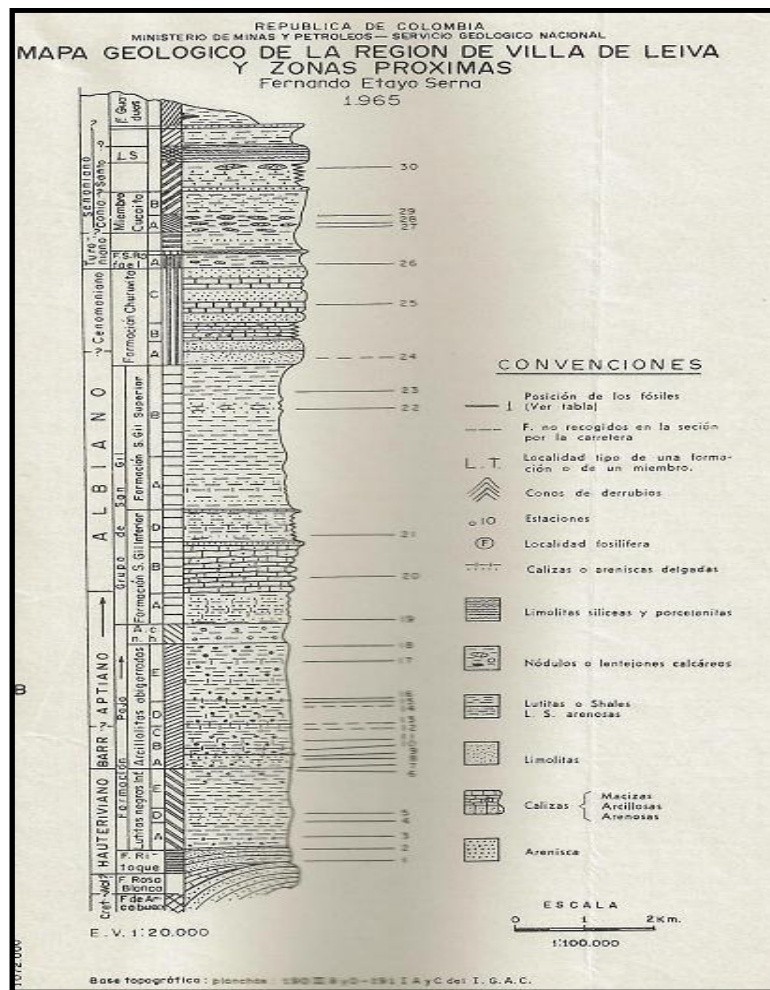
Figura 13. Mapa geológico y estructural de la sección de Tunja- Villa de Leyva dentro del Anticlinal de Arcabuco.



Fuente: Artículo de Kramer A. (1997), Los pliegues del sinclinal de Tunja. Análisis estructural y modelamiento geométrico, Geología Colombiana, vol. 22, pág. 3-25.

**7.2.2 Estratigrafía.** La estratigrafía de la sección de Tunja-Villa de Leyva se basa en la secuencia estratigráfica del Anticlinal de Arcabuco, el cual está constituido principalmente hacia su núcleo por rocas de la formación Arcabuco, y hacia la parte de sus flancos por rocas de las Formaciones (de la más antigua a la más joven): Ritoque, Paja, Grupo San Gil, Churuvita, San Rafael, Miembro Cucaita y Conejo (Figura 14.).

Figura 14. Columna Estratigráfica de la sección de Tunja- Villa de Leyva (ver anexo D), en el departamento de Boyacá, Colombia.



Fuente: Tomada de Etayo F., 1968. Sinopsis estratigráfica de la región de Villa de Leyva y zonas próximas, Boletín de Geología, N°21, pág 19-32.

A continuación se hará una breve descripción de las formaciones que constituyen la sección de Tunja-Villa de Leyva, tomando de referencia la columna estratigráfica realizada y descrita por Fernando Etayo en 1968:

### **FORMACION ARCABUCO**

La formación Arcabuco posee una edad del Cretácico inferior Valanginiense (Etayo 1968). Su nombre fue establecido por A.A Olsson (Fide Taborda, 1952); más comúnmente conocida con el nombre de Arenisca de Arcabuco. Es el elemento litológico más antiguo que aflora en el área.

Esta formación presenta un espesor aproximadamente mayor a 1000m, constituidos principalmente por un conjunto de areniscas cuarcíticas de grano variable en tamaño, fuertemente cementadas en cuarzo y estratificadas en capas gruesas que presentan estratificación entrecruzada.

Se encuentra en contacto neto concordante con la formación suprayacente Rosa Blanca.

### **FORMACION ROSA BLANCA**

La formación Rosa Blanca muestra una edad del Cretácico inferior Valangiano - Hauteriviano (Etayo 1968). El término Rosa Blanca fue utilizado por Wheeler (1929) para referirse a una serie de bancos de caliza. Esta formación es un elemento destacado de la estratigrafía del valle medio del Magdalena, se le reconoce al noroccidente de villa de Leyva por el rio cane donde afloran aproximadamente 100m de calizas estratificadas en capas gruesas de 70cm de

espesor. Estas no se observan sobre el flanco occidental del núcleo del Anticlinal de Arcabuco, salvo 20m que se observan en la quebrada del río cañón.

Se encuentra en contacto neto angular con la formación infrayacente Arcabuco y en contacto transicional (Cardozo y Ramírez en 1985) con la formación suprayacente Ritoque.

### **FORMACION RITOQUE**

Esta formación posee una edad del Cretácico inferior Hauteriviano (Etayo 1968). Su nombre fue propuesto para referirse a las capas que tienen por localidad tipo la quebrada de dicho nombre (Etayo 1964).

La formación Ritoque forma la capa más antigua de los flancos del Anticlinal de Arcabuco, sobre el flanco oriental aparecen unas capas de limolitas y arcillolitas intercaladas con calizas, mientras que sobre el flanco occidental predomina una intercalación de limolitas con areniscas de grano muy fino en mayor proporción. Esta formación presenta un espesor total de aproximadamente 70m.

Se encuentra en contacto neto concordante con la formación infrayacente Rosa Blanca y con la formación suprayacente Paja.

### **FORMACION PAJA**

La formación Paja presenta una edad del Cretácico inferior Hauteriviano – Barromiense- Aptiano. (Etayo 1968). Su nombre fue dado por Wheeler, O.C., en Morales et al. (1958), para designar una sucesión estratigráfica compuesta principalmente por lutitas negras, micáceas con concreciones arenosas,

ligeramente calcáreas, que contienen fauna principalmente de amonitas. Su nombre deriva de la quebrada La Paja, afluente del río Sogamoso entre Bucaramanga y San Vicente (Julivert et al., 1968).

En la sección de Tunja- Villa de Leyva la formación Paja está representada principalmente por tres segmentos, según Etayo (1968):

El primer segmento, de base a techo, posee un espesor que varía entre 340m y 380m, está constituido principalmente por un conjunto de shales o arcillolitas negras, con algunas intercalaciones arenosas hacia la parte yacente, seguidos por una intercalación de shales negros arenosos con areniscas arcillosas hacia la parte superior.

El segundo segmento presenta un espesor de 480m, constituidos por una secuencia de numerosas intercalaciones arcillosas arenosas hacia la parte inferior y una intercalación que pasa de margosa a calcárea hacia la parte superior. Este segmento domina el oriente del núcleo del Anticlinal de Arcabuco (según la poligonal realizada por Etayo, 1968).

Finalmente el último segmento posee un espesor de 80m, está constituido por una intercalación de arcillolitas en mayor proporción con nódulos elipsoidales huecos. Este segmento constituye hacia el oriente una franja paralela a la dirección general nororiental de las capas del núcleo del Anticlinal de Arcabuco (según la poligonal realizada por Etayo, 1968).

Esta formación se encuentra en contacto neto concordante con la formación infrayacente Ritoque y con la formación suprayacente San Gil Inferior.

## **GRUPO SAN GIL**

Este grupo posee una edad del Cretácico inferior Aptiano- Albiano (Etayo 1968). Este nombre fue establecido por Hubach para referirse a rocas que afloraban en la región de San Gil (Departamento de Santander) y que se prolonga cartográficamente (1953) hasta la región de Villa de Leyva, este grupo consta de dos formaciones:

### **FORMACION SAN GIL INFERIOR**

Esta formación posee 365m aproximadamente, dispuestos de la siguiente manera: Hacia la parte inferior los primeros 140m están constituidos por una intercalación de arcillolitas grises, arenosas y muscovíticas, con nódulos arcillosos; los siguientes 200m hacia la parte yacente constan de calizas macizas, arenosas y fosilíferas en alternancia con arcillolitas; luego los 25m siguientes están integrados por una fuerte intercalación de areniscas cuarzosas grises de grano fino con shales grises oscuros; finalmente los últimos 125m hacia la parte superior están constituidos por una alternancia de bancos calcáreos con shales y areniscas arcillosas.

La formación San Gil Inferior constituye una faja que corre paralelamente al margen oriental del núcleo del Anticlinal de Arcabuco y se encuentra en contacto neto concordante con la formación infrayacente Paja y un contacto neto concordante con la formación suprayacente San Gil Superior.

### **FORMACION SAN GIL SUPERIOR**

La formación San Gil superior presenta la misma distribución general de la formación anterior, sin embargo su espesor aproximado es de 620m. Esta

formación se encuentra constituida hacia la parte inferior por una intercalación de areniscas y calizas de aproximadamente 230m de espesor, mientras que hacia la parte superior presenta un dominio neto de shales oscuros, frecuentemente con nódulos arcillosos, de aproximadamente 390m de espesor.

Esta formación se encuentra en contacto neto concordante con la formación infrayacente San Gil Inferior y un contacto neto concordante con la formación suprayacente Churuvita.

## **FORMACION CHURUVITA**

Esta formación posee una edad del Cretácico inferior-superior, Albiano-Cenomaniano, respectivamente (Etayo 1968). Su nombre fue asignado por Etayo (1968) para referirse a la unidad litológica que es infrayacida por la Formación San Gil Superior y suprayacida por la Formación San Rafael. La localidad tipo está ubicada entre Sáchica y Puente Samacá con un espesor de 323m.

En esta sección la unidad fue dividida en tres segmentos; el segmento A, con un espesor de 105m aproximadamente, esta constituidos principalmente por una alternancia de areniscas grises, cuarzosas y muscovíticas, calizas y algunas intercalaciones arcillolíticas y limolíticas.

El segmento B, con un espesor aproximado de 75m, consta de una secuencia de bancos lumaquéllicos calcáreos intercalados con arcillolitas y areniscas cuarzosas de grano subangular. Las areniscas se presentan en 19 bancos con 92cm de espesor promedio cada uno, y los bancos lumaquéllicos tienen un espesor de 71cm cada uno. Finalmente el segmento C, presenta un espesor aproximado de 225m, constituidos por una alternancia de arcillolitas con bancos macizos de areniscas de grano fino y medio, y con bancos calcáreos macizos.

La formación Churuvita se encuentra en contacto neto concordante con la formación infrayacente San Gil Superior, y en contacto neto concordante con la formación suprayacente San Rafael.

## **FORMACION SAN RAFAEL**

La formación San Rafael presenta una edad del cretácico superior Turoniano (Etayo 1968). Su nombre fue propuesto para referirse a aquellas capas que afloran en la localidad tipo, por el Zanjón sito 200m al occidente del Chircal San Rafael (Etayo 1968).

Esta formación consta de dos segmentos estratigráficos principalmente; el primer segmento hacia la parte inferior fue denominado como segmento A, posee aproximadamente 60m de espesor, constituidos por shales grises con bancos calcareos; el segundo segmento hacia la parte superior fue denominado como segmento B, presenta un espesor aproximado de 14m, consta de una secuencia de limolitas silíceas estratificadas en lechos de 3 a 20cm de espesor y hacia la parte yacente presenta intercalaciones de 3m de shales negros. El espesor total aproximado de la formación San Rafael es de 74m.

Se encuentra en contacto neto concordante con la formación infrayacente Churuvita, y en contacto neto concordante con la formación suprayacente Miembro Cucaita.

## **MIEMBRO CUCAITA**

Esta formación posee una edad del cretácico superior coniaciano (Etayo 1968). Su nombre fue propuesto para referirse a unas capas con localidad tipo a lo largo de la carretera de Cucaita- Tunja (Etayo 1968).

En esta sección de estudio entre Tunja y Villa de Leyva, el Miembro Cucaita consta de dos segmentos, así: el primer segmento ubicado hacia la parte inferior, denominado como segmento A, posee un espesor aproximado de 70m, constituidos principalmente por tres paquetes de calcareoarenosos, con concreciones calcáreas hasta de un metro de diámetro, estos paquetes a su vez están intercalados con shales grises. El segundo segmento, denominado como segmento B, posee un espesor aproximado de 100m, constituidos por arcillolitas que progresivamente hacia la parte yacente se hacen macizas con aumento del contenido arenoso y micáceo.

El Miembro Cucaita se encuentra en contacto neto concordante con la formación infrayacente San Rafael, y en contacto neto concordante con la formación suprayacente Conejo.

## **FORMACION CONEJO**

La Formación Conejo posee una edad del cretácico superior coniaciano-Santoniano (Etayo 1968). Su nombre fue propuesto por Renzoni (1967, publicado en 1981) en el cuadrángulo J-12 Tunja. Sin embargo, la primera publicación donde aparece el nombre Formación Conejo es Etayo (1968b).

Renzoni (1967) designó como Formación Conejo al intervalo estratigráfico comprendido entre el techo de la Formación San Rafael de Etayo (1968a, b) y la base de la Formación Plaeners, constituido por shales de color gris oscuro a amarillento con algunas intercalaciones muy gruesas de arenisca.

Estratigráficamente la Formación Conejo se encuentra integrada por un banco basal de arenisca de aproximadamente 6m de espesor, cuarzosa, con tamaño de grano medio, con una cantidad escasa de cemento calcáreo; presenta también una cantidad considerable de materia orgánica en forma de hilillos que aumentan

hacia el techo de dicho banco. Sobre el banco de arenisca aparecen unas capas de shales con alternancias de areniscas y calizas. El espesor total de este segmento es de aproximadamente 120m.

La formación Conejo se encuentra en contacto neto concordante con el Miembro infrayacente, Cucaita y en contacto neto concordante con la formación suprayacente Plaeners.

## **GRUPO GUADALUPE**

Hettner (1892) propuso el nombre de Guadalupe para referirse a la sucesión litológica comprendida entre la Formación Villeta y la Formación Guaduas (Julivert, 1968). Hubach (1933) eleva a la categoría de grupo a esta unidad, asignándole como límites el Grupo Villeta y el Grupo Guaduas. Posteriormente, Renzoni (1962,1968) redefine esta unidad dando categoría de formación a las unidades que actualmente conforman el Grupo Guadalupe.

El Grupo Guadalupe fue descrito al oriente de Bogotá y está conformado por las formaciones Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna (Pérez y Salazar, 1978).

## **FORMACION PLAENERS**

La edad de la Formación Plaeners ha sido determinada bioestratigráficamente por Etayo F, (1968) del cretácico superior cernomaniano- Santoniano. Posteriormente Follmi et al. (1992) en Vergara y Rodríguez (1997) considera a la formación Plaeners de la edad del Campaniano Superior a Maastrichtiano temprano.

Inicialmente fue llamado Nivel Plaeners y fue ubicado dentro de la que fue llamada Formación Guadalupe por Julivert (1962a, 1962b, 1963a 1968). Posteriormente en los trabajos de la Sabana de Bogotá realizados por Renzoni (1962, 1968) le dan el

rango de Formación Plaeners. Pérez y Salazar (1978) mantienen el nombre de Formación Plaeners para la unidad constituida por limolitas silíceas.

Esta formación se encuentra constituida principalmente por una secuencia de limolitas silíceas con ruptura prismática, alternadas con lechos irregulares de chert gris, los lechos presentan un espesor de 5 a 20cm aproximadamente. En total el espesor aproximado de la formación Conejo en esta sección está entre 50 a 70m.

La formación Plaeners se encuentra en contacto neto concordante con la formación infrayacente Conejo, y en contacto neto concordante con la formación suprayacente Arenisca Tierna.

### **FORMACION ARENISCA TIERNA**

La formación Arenisca Tierna posee una edad del cretácico superior Maastrichtiano inferior y Maastrichtiano medio para la Formación Arenisca Labor y Tierna (Etayo 1964). Por otra parte Pérez y Salazar (1978) asignan para esta formación una edad Maastrichtiano inferior.

Esta formación consta de una secuencia de Areniscas con un espesor total aproximado de 9.30m, hacia la parte superior, dispuestos en bancos de hasta 2m de espesor, es una arenisca cuarzosa de grano grueso, blanca, las capas inferiores de estas areniscas muestran una estratificación cruzada; hacia la parte inferior los 50m infrayacentes a la secuencia de areniscas, constan de arcillolitas arenosas; algunos bancos tienen ruptura prismática y hacia la parte inferior constituyen un tránsito gradual a las limolitas silíceas.

La formación Arenisca Tierna se encuentra en contacto neto concordante con la formación infrayacente Plaeners, y en contacto neto concordante con la formación suprayacente Guaduas.

## 8. RESULTADOS

### 8.1 NOMENCLATURA ESTRATIGRAFICA

**8.1.1 Sección del Triunfo.** La nomenclatura utilizada en este trabajo para la sección del Triunfo en el departamento de Cundinamarca hace parte de un estudio estratigráfico llevado a cabo 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. Los mantos de carbón muestreados en esta sección corresponden a la parte baja, media y alta de la Formación Guaduas.

Tabla 4. Nomenclatura Estratigráfica para la sección del Triunfo, departamento de Cundinamarca.

SECCION EL TRIUNFO		
NOMBRE UTILIZADO EN EL MUESTREO	NOMBRE DEL MANTO SEGÚN LA MINA	NOMBRE DEL MANTO SEGUN ESTUDIO ESTRATIGRAFICO
TPH-1	Manto 0	Manto 1
TPH-2	Manto 1	Manto 1
TPH-3	Manto 2	Manto 2
TPH-4	Manto 3	Manto 3
TPH-5	Manto 4	Manto 4
TPH-6	Manto Veta Grande	Manto 5
TPH-7	Manto La Quinta	Manto 7
TPH-8	Manto Ciscuda	Manto 11
TPH-9	Manto 8	Manto 8
TPH-10	Manto 10	Manto 10
TPH-11	Manto Veta Chica	Manto 12
TPH-12	Manto Vidriosa	Manto 17
TPH-13	Manto Deposito	Manto 18
TPH-14	Manto 7 Bancos	Manto 19

**8.1.2 Sección Tunja –Villa de Leyva.** La nomenclatura utilizada en este trabajo para la sección de Tunja-Villa de Leyva en el departamento de Boyacá se basó en un estudio estratigráfico detallado llevado a cabo por el profesor Fernando Etayo (1968), en el cual se adoptó una determinada nomenclatura para referirse a las diferentes unidades litoestratigráficas presentes en esta zona. Los resultados de la nomenclatura se resumen en la tabla 5. El muestreo de esta sección corresponde a la parte baja, media y alta de la columna estratigráfica realizada en esta zona por el profesor Fernando Etayo (1968), mediante una poligonal.

Tabla 5. Nomenclatura Estratigráfica para la sección Tunja-Villa de Leyva, departamento de Boyacá.

<b>SECCION TUNJA-VILLA DE LEYVA</b>	
<b>NOMBRE UTILIZADO EN EL MUESTREO</b>	<b>NOMBRE DE LA FORMACION SEGÚN ESTUDIO ESTRATIGRAFICO</b>
TPH-TV-1- SHALE	Miembro Cucaita (A)
TPH-TV-2- SHALE	Miembro Cucaita
TPH-TV-3- SHALE	Miembro Cucaita (B)
TPH-TV-6- SHALE	Formación San Rafael
TPH-TV-4- SHALE	Formación Churuvita
TPH-TV-5- CALIZA	Formación Churuvita
TPH-TV-7- SHALE	Grupo San Gil
TPH-TV-8- SHALE	Formación Paja

## 8.2 RESULTADOS DE ANÁLISIS GEOQUÍMICOS

### 8.2.1 Sección del Triunfo:

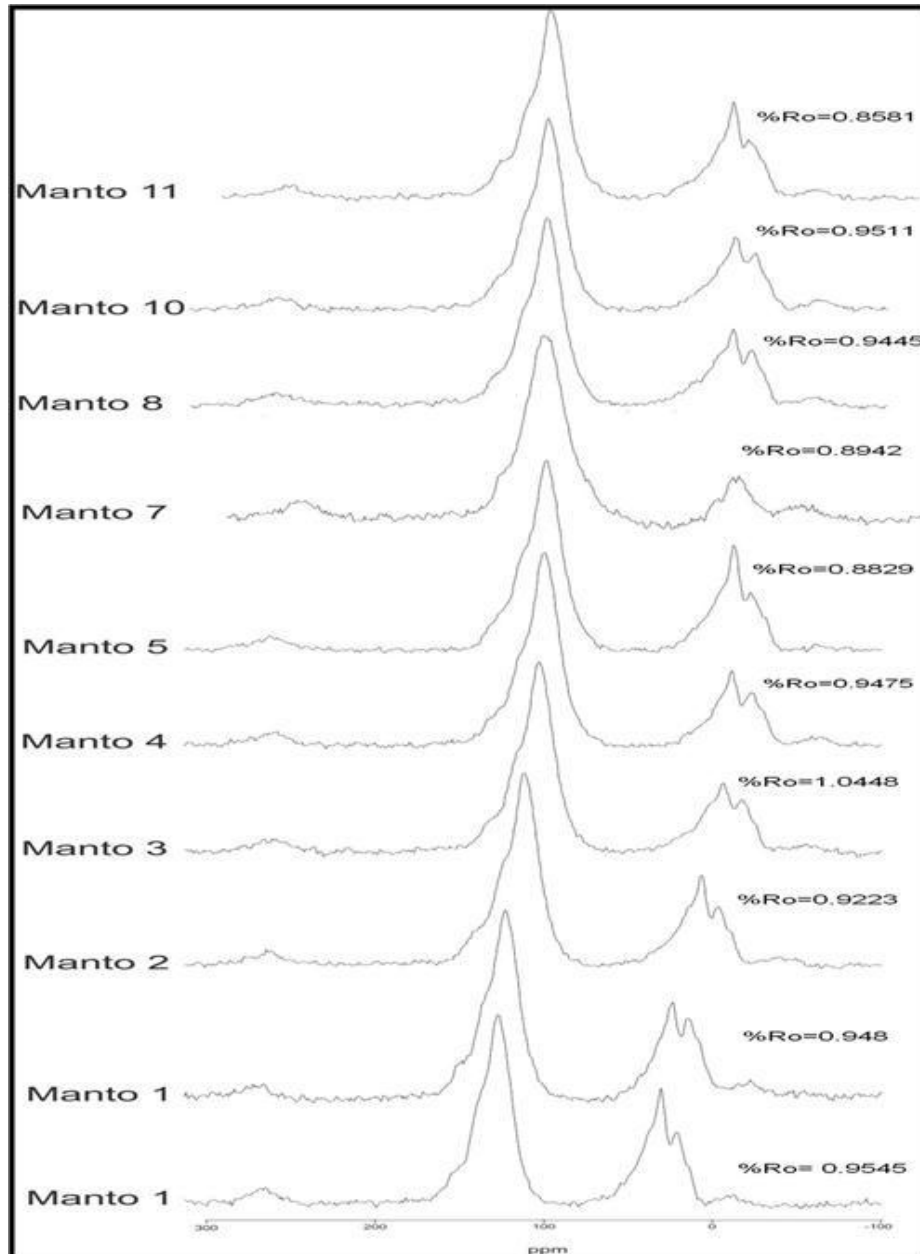
#### 8.2.1.1 Resultados de Carbono Orgánico Total (%TOC):

Tabla 6. Resultados de TOC (%en peso) para la Sección del Triunfo.

SECCION EL TRIUNFO		
NOMBRE DE LA MUESTRA	NOMBRE DEL MANTO	TOC(%en peso)
TPH-1	Manto 1	84.620
TPH-2	Manto 1	83.833
TPH-3	Manto 2	84.342
TPH-4	Manto 3	87.788
TPH-5	Manto 4	87.406
TPH-6	Manto 5	77.735
TPH-7	Manto 7	82.525
TPH-8	Manto 11	70.696
TPH-9	Manto 8	77.351
TPH-10	Manto 10	83.142
TPH-11	Manto 12	83.061
TPH-12	Manto 17	78.053
TPH-13	Manto 18	78.333
TPH-14	Manto 19	76.797

### 8.2.1.2 Resultados de Resonancia Magnética Nuclear (RMN):

Figura 15. Espectros de resonancia magnética nuclear (RMN) para las muestras de carbón de la formación Guaduas, Sección del Triunfo.



Fuente: Espectros resultantes del análisis de las muestras de carbón de la Sección del Triunfo tratados mediante el programa Dmfit de la universidad D'ORLEANS en Francia, en el laboratorio de RMN de la Universidad Industrial de Santander.

Tabla 7. Resultados del Factor de aromaticidad (Fa) para la Sección del Triunfo.

MUESTRA	CARBONOS AROMATICOS	CARBONOS ALIFATICOS	% AROMATICOS	% ALIFATICOS	FACTOR DE AROMATICIDAD (Fa)
TPH- 1	1	0,3	76,92307692	23,07692308	0,769230769
TPH-2	1	0,33	75,18796992	24,81203008	0,751879699
TPH- 3	1	0,28	78,125	21,875	0,78125
TPH- 4	1	0,2	83,33333333	16,66666667	0,833333333
TPH- 5	1	0,26	79,36507937	20,63492063	0,793650794
TPH- 6	1	0,27	78,74015748	21,25984252	0,787401575
TPH- 8	1	0,43	69,93006993	30,06993007	0,699300699
TPH- 9	1	0,31	76,33587786	23,66412214	0,763358779
TPH- 10	1	0,31	76,33587786	23,66412214	0,763358779

**8.2.1.3 Resultados de Reflectancia de Vitrinita (%Ro).** Esta técnica se llevó a cabo teniendo presente la posición estratigráfica de los mantos de carbón muestreados en la sección del Triunfo.

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

- Cálculo del promedio.
- Cálculo de la desviación estándar.
- Valores máximos y mínimos.
- Elaboración de un histograma de frecuencia para cada una de las muestras, mostrando así las tendencias en cuanto al % de reflectancia de vitrinita. Para su elaboración se tomaron los siguientes intervalos del valor de reflectancia de vitrinita en el eje x:
  - Intervalo 1: 0.6 – 0.7 % de Ro
  - Intervalo 2: 0.7 – 0.8 % de Ro

- Intervalo 3. 0.8 – 0.9 % de Ro
- Intervalo 4. 0.9 – 1.00 % de Ro
- Intervalo 5: 1.00– 1.09 % de Ro

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

Tabla 8. Resultados de Ro para los mantos de carbón de la Sección del Triunfo.

MANTO	MANTO 1	MANTO 1	MANTO 2	MANTO 3	MANTO 4	MANTO 5	MANTO 7
<b>PROMEDIO</b>	0.9545	0.9483	0.9223	1.0448	0.9475	0.8829	0.8942
<b>VALOR MAXIMO</b>	0.9910	0.9903	0.9798	1.0805	0.9932	0.9322	0.9500
<b>VALOR MINIMO</b>	0.8914	0.8859	0.8763	0.9631	0.89221	0.8146	0.8471
<b>DESVIACIÓN ESTANDAR</b>	0.0281	0.0284	0.0286	0.0279	0.0280	0.0281	0.0280

MANTO	MANTO 8	MANTO 10	MANTO 11	MANTO 12	MANTO 17	MANTO 18	MANTO 19
<b>PROMEDIO</b>	0.9445	0.9511	0.8581	0.8397	0.7457	0.7456	0.6326
<b>VALOR MAXIMO</b>	0.9843	0.9998	0.9072	0.8881	0.8013	0.7888	0.6953
<b>VALOR MINIMO</b>	0.8835	0.9047	0.8195	0.7982	0.7003	0.7032	0.6092
<b>DESVIACIÓN ESTANDAR</b>	0.0265	0.0287	0.0277	0.0227	0.0288	0.0275	0.0280

#### 8.2.1.4 Resultados del Análisis proximal de Carbones:

Tabla 9. Resultados de los análisis proximales de carbones para la Sección del Triunfo.

SECCIÓN DEL TRIUNFO				
Muestra	Humedad (% en peso)	Cenizas (% en peso)	Volátiles (% en peso)	Carbono Fijo (% en peso)
MANTO 1	0.8357	1.4459	33.4719	64.2463
MANTO 1	1.2894	2.1227	33.7933	62.7944
MANTO 2	0.3108	1.4749	35.6222	62.5920
MANTO 3	0.7474	3.7075	31.3443	64.2006
MANTO 4	1.0640	3.9660	31.0926	63.8773
MANTO 5	1.5410	4.8944	35.4103	58.1541
MANTO 7	0.6057	1.6272	36.6481	61.1188
MANTO 8	0.7824	7,1234	33.3729	58.7212
MANTO 10	0.9370	1.9588	34.0132	63.0908
MANTO 11	0.6366	3.3074	35.6293	60.4265
MANTO 12	0.7499	1.9997	38.5708	58.6795
MANTO 17	0.8705	5.5064	39.1905	54.4324
MANTO 18	1.1646	4.3021	39.4025	55.1306
MANTO 19	1.3033	5.9848	40.5221	52.1896

### 8.2.1.5 Resultados de Pirolisis Rock Eval:

Tabla 10. Resultados de Pirolisis Rock Eval para los mantos de carbón para la Sección del Triunfo.

MUESTRA	MANTO	PESO(mg)	S1(mg/g)	S2(mg/g)	S3(mg/g)	Tmax(°C)	TOC			
							(%)	PI	HI	OI
TPH1	MANTO 1	15	3,64	238,32	0,45	459	86,29	0,02	276	1
TPH2	MANTO 1	14,2	4,17	221,87	0,66	453	81,27	0,02	273	1
TPH3	MANTO 2	11,2	4,43	241,71	0,69	453	85,64	0,02	282	1
TPH4	MANTO 3	10,4	3,98	224,52	0,51	454	93,14	0,02	241	1
TPH5	MANTO 4	11,7	3,09	208,21	1,93	453	87,21	0,01	239	2
TPH6	MANTO 5	11,9	4,36	239,13	1,54	452	84,18	0,02	284	2
TPH7	MANTO 7	12,6	5,22	241,92	1,46	449	83,68	0,02	289	2
TPH8	MANTO 11	14,1	4,71	228,66	2,44	447	81,52	0,02	280	3
TPH9	MANTO 8	12	4,54	209,42	2,2	451	77,44	0,02	270	3
TPH10	MANTO 10	12,5	3,59	221,82	1,65	451	89,44	0,02	248	2
TPH11	MANTO 12	12,1	4,79	249,88	0,98	451	84,44	0,02	296	1
TPH12	MANTO 17	14,1	7,94	241,18	0,87	440	74,06	0,03	327	1
TPH13	MANTO 18	13	5,96	250,56	2,62	439	83,38	0,02	301	3
TPH14	MANTO 19	13,2	8,84	260,1	2,38	439	79,26	0,03	328	3

**8.2.1.6 Resultados del modelamiento geoquímico.** Los siguientes parámetros fueron fundamentales para el desarrollo del modelamiento geoquímico en la sección del Triunfo: un flujo de calor transitorio de  $60 \text{ mW/s}^2$  dato hallado por temperaturas de fondo en el pozo Suesca – 1 en trabajos anteriores, una temperatura superficial estimada de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Los datos de flujo de calor tomados tienen en cuenta el tipo de cuenca y la evolución termal a la cual ha estado expuesta.

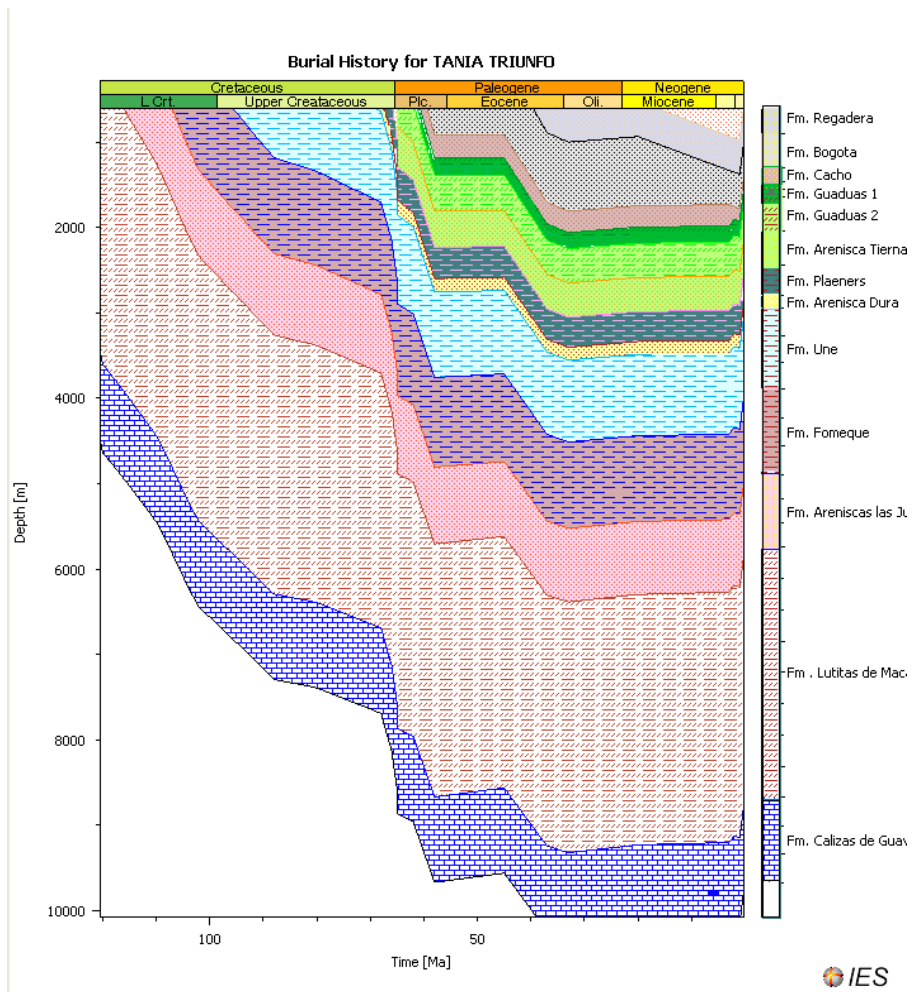
El grado de maduración termal para esta sección esta dado por 5 rangos, basados en los porcentajes de Ro: Zona inmadura, con valores que varían entre 0,2 y 0,6% Ro; zonas de maduración temprana, con valores que oscilan entre 0,6 y 0,65 %Ro; zonas de pico de generación, con valores que varían entre 0,65 y 0,9% Ro; zonas de maduración tardía, con valores que oscilan entre 0,9 y 1,35% Ro y zonas de generación de gas, con valores superiores o iguales a 1,3 %Ro.

Inicialmente se construyeron historias de enterramiento 1D, mediante el programa PetroMod versión 11, las cuales se reconstruyeron con base en 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.

Tabla 11. Datos utilizados para el modelamiento geoquímico del centro del Sinclinal de Checua-Lenguazaque, en la sección del Triunfo.

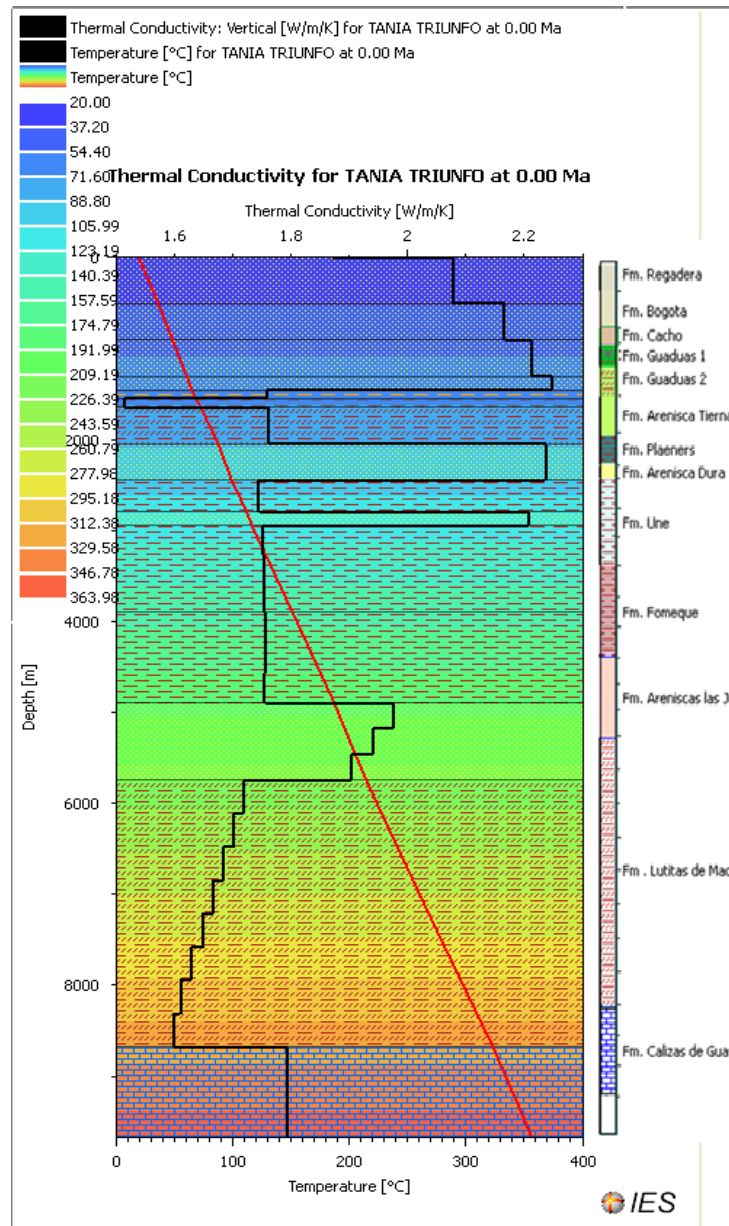
SECCIÓN DEL TRIUNFO								
FORMACIÓN	TOPE (m)	BASE (m)	Espesor (m)	Erosión (m)	TIEMPO DE DEPOSITACIÓN		LITOLOGIA	%TOC
					DESDE (Ma)	HASTA (Ma)		
Fm. USME	0	500	500	500	37.00	0.00	SANDSTONE	
Fm. Regadera	500	900	400	400	45.00	37.00	SANDSTONE	
Fm. Bogota	900	1300	400	400	62.00	58.00	SANDSTONE	
Fm. Cacho	1300	1450	150	100	65.00	62.00	SANDSTONE	
Fm. Guaduas	1450	1540	90		65.01	65.00	SILT&SHALE	85.59
Fm. Guaduas 1	1540	1640	100		65.03	65.01	SHALEcoal	82.52
Fm. Guaduas 2	1640	2040	400		66.00	65.03	SHALE&SILT	78.33
Fm. Arenisca T	2040	2440	400		68.00	66.00	SANDSTONE	
Fm. Plaeners	2440	2790	350		80.00	68.00	SHALE	
Fm. Arenisca D	2790	2940	150		88.00	80.00	SANDSTONE	
Fm. Une	2940	3890	950		102.00	88.00	SHALE	
Fm. Fomeque	3890	4890	1000		110.00	102.00	SHALE	
Fm. Areniscas	4890	5740	850		120.00	110.00	SANDSTONE	
Fm . Lutitas de	5740	8675	2935		131.00	120.00	SHALE&SILT	3.00
Fm. Calizas de	8675	9675	1000		135.00	131.00	LIMESTONE	3.00

Figura 16. Diagrama de Soterramiento decompactado para el centro del Sinclinal de Checua-Lenguazaque, en la sección del Triunfo.



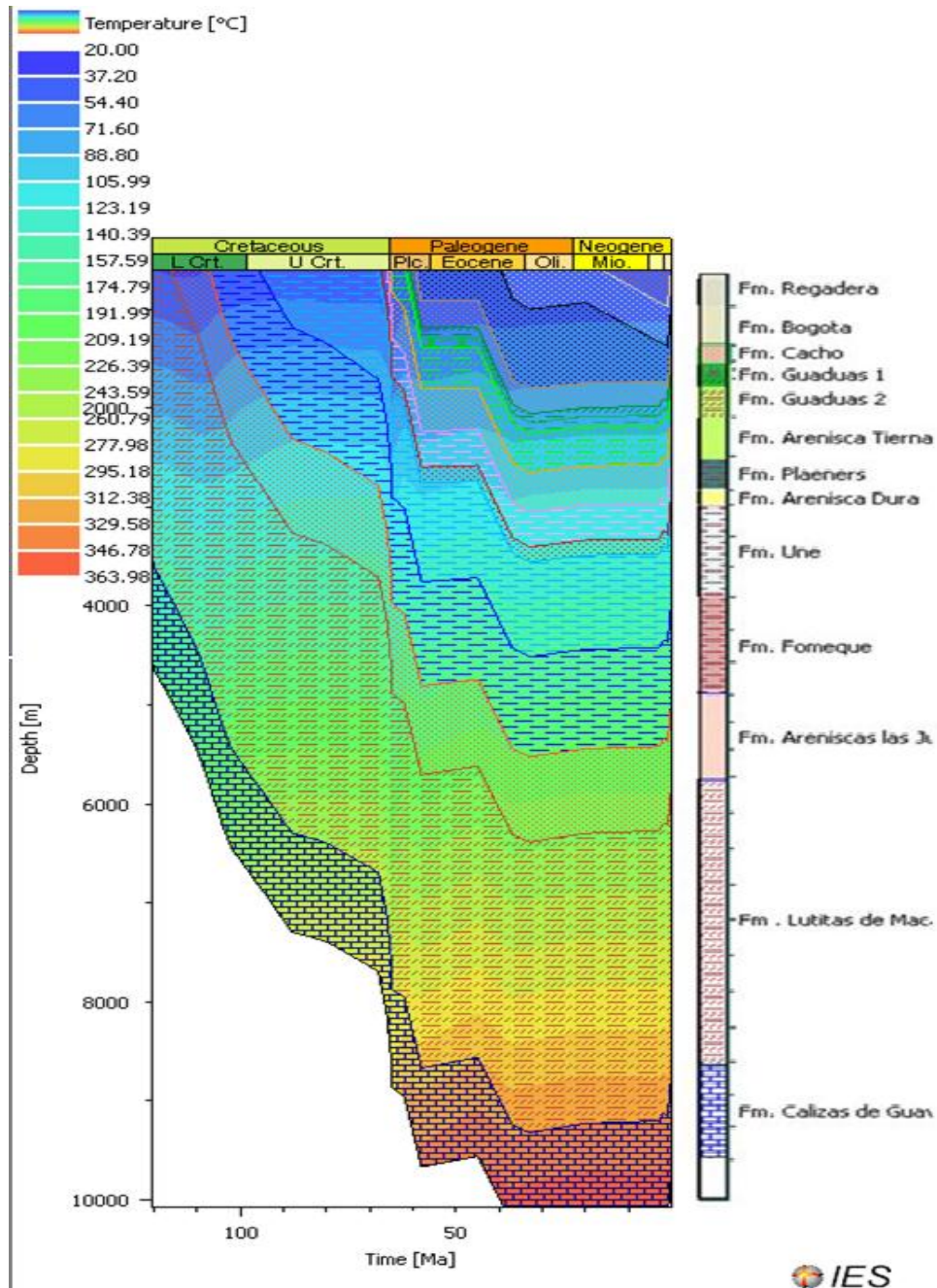
Fuente: Modelamiento geoquímico para la sección del Triunfo mediante el programa PetroMod versión 11.

Figura 17. Variabilidad de la conductividad térmica por edades para cada formación de la sección del Triunfo, en relación con la profundidad de las mismas.



Fuente: Modelamiento geoquímico para la sección del Triunfo mediante el programa PetroMod versión 11.

Figura 18. Variabilidad de la temperatura para cada Formación de la sección del Triunfo, teniendo en cuenta la edad y la profundidad.



Fuente: Modelamiento geoquímico para la sección del Triunfo mediante el programa PetroMod versión 11.

## 8.2.2 Sección Tunja-Villa de Leyva:

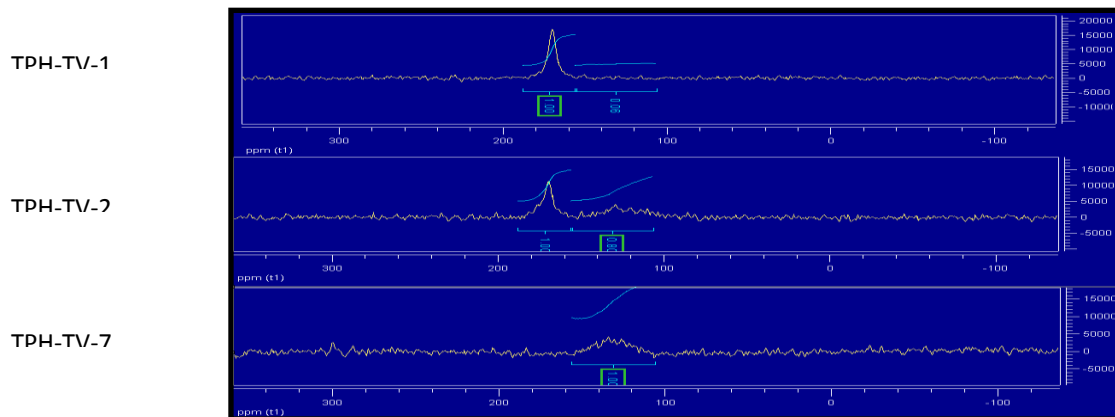
### 8.2.2.1 Resultados de Carbono Orgánico Total (%TOC):

Tabla 12. Resultados de TOC (%en peso) para la Sección de Tunja-Villa de Leyva.

SECCION DE TUNJA-VILLA DE LEYVA	
NOMBRE DE LA MUESTRA	TOC(%en peso)
TPH-TV-1- SHALE	0.9113
TPH-TV-2- SHALE	1.9816
TPH-TV-3- SHALE	1.8780
TPH-TV-4- SHALE	0.5250
TPH-TV-5- CALIZA	0.6073
TPH-TV-6- SHALE	1.1304
TPH-TV-7- SHALE	3.3455
TPH-TV-8- SHALE	0.7619

### 8.2.2.2 Resultados de Resonancia Magnética Nuclear (RMN):

Figura 19. Espectros de resonancia magnética nuclear (RMN) para las muestras de shales de la Formación San Gil Superior (TPH-TV-7) y el Miembro Cucaita (TPH-TV-1 y 2), Sección de Tunja-Villa de Leyva.



Fuente: Espectros resultantes del análisis de las muestras de shales de la Sección de Tunja-Villa de Leyva, tratados mediante el programa Mestre-c versión 4.9.9.6.

### 8.2.2.3 Resultados de Reflectancia de Vitrinita (%Ro):

Tabla 13. Resultados de Ro para las muestras de shales de la Sección de Tunja-Villa de Leyva.

FORMACIONES	SAN RAFAEL	SAN GIL SUPERIORR	PAJA
PROMEDIO	0.3416	0.6517	0.6613
VALOR MAXIMO	0.3765	0.6984	0.6997
VALOR MINIMO	0.3056	0.6292	0.6346
DESVIACIÓN ESTANDAR	0.023466	0.031044	0.025739

### 8.2.2.4 Resultados de Pirolisis Rock Eval:

Tabla 14. Resultados de Pirolisis Rock Eval para la Sección de Tunja-Villa de Leyva.

MUESTRA	PESO(mg)	S1(mg/g)	S2(mg/g)	S3(mg/g)	Tmax(°C)	TOC (%)	PI	HI	OI
TPH-1	30,5	0,08	0,11	0,82	386	0,37	0,43	30	222
TPH-2	30,5	0,11	0,11	1,05	380	1,27	0,5	9	83
TPH-3	31,1	0,26	0,13	0,59	380	0,31	0,68	42	190
TPH-6	38,7	0,06	0,05	0,69	389	0,45	0,56	11	153
TPH-4	36	0,06	0,01	0,47	382	0,28	0,82	4	168
TPH-5	31,3	0,2	0,12	0,35	356	0,09	0,63	133	389
TPH-7	33,5	0,3	0,09	0,23	381	3,49	0,77	3	7
TPH-8	39,2	0,35	0,13	0,26	307	0,67	0,73	19	39

**8.2.2.5 Resultados del modelamiento geoquímico.** Los siguientes parámetros fueron fundamentales para el desarrollo del modelamiento geoquímico en la sección de Tunja-Villa de Leyva: un flujo de calor transitorio de  $60 \text{ mW/s}^2$  dato hallado por temperaturas de fondo en el pozo Tunja-1 en trabajos anteriores, una temperatura superficial estimada de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Los datos de flujo de calor tomados tienen en cuenta el tipo de cuenca y la evolución termal a la cual ha estado expuesta.

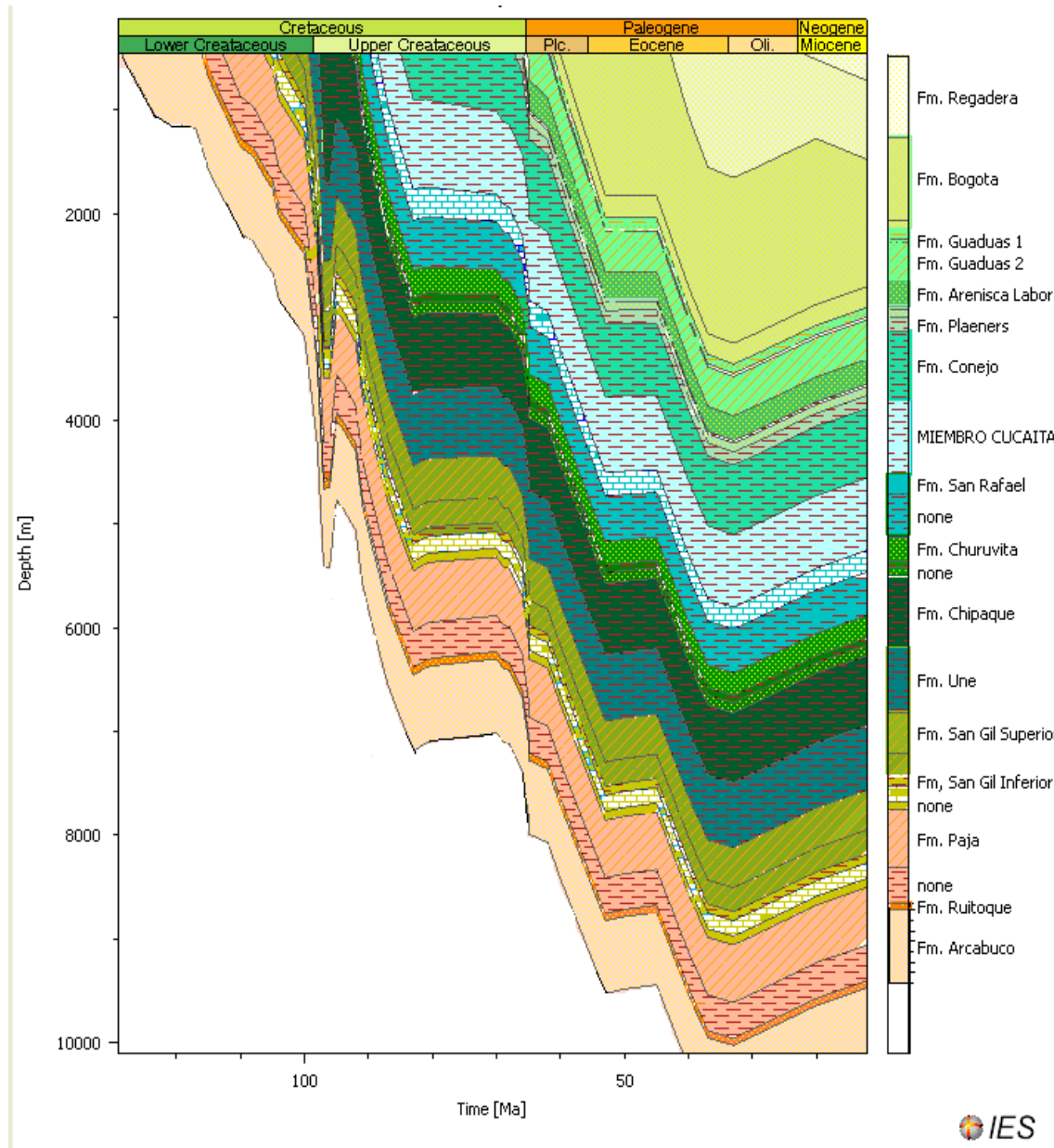
El grado de maduración termal para esta sección está dado por 5 rangos, basados en los porcentajes de  $R_o$ : Zona inmadura, con valores que varían entre 0,2 y 0,6%  $R_o$ ; zonas de maduración temprana, con valores que oscilan entre 0,6 y 0,65 % $R_o$ ; zonas de pico de generación, con valores que varían entre 0,65 y 0,9%  $R_o$ ; zonas de maduración tardía, con valores que oscilan entre 0,9 y 1,35%  $R_o$  y zonas de generación de gas, con valores superiores o iguales a 1,3 % $R_o$ .

Inicialmente se construyeron historias de enterramiento 1D, mediante el programa PetroMod versión 11, las cuales se reconstruyeron con base en 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.

Tabla 15. Datos utilizados para el modelamiento geoquímico del centro del Anticlinal de Arcabuco, en la sección del Tunja- Villa de Leyva.

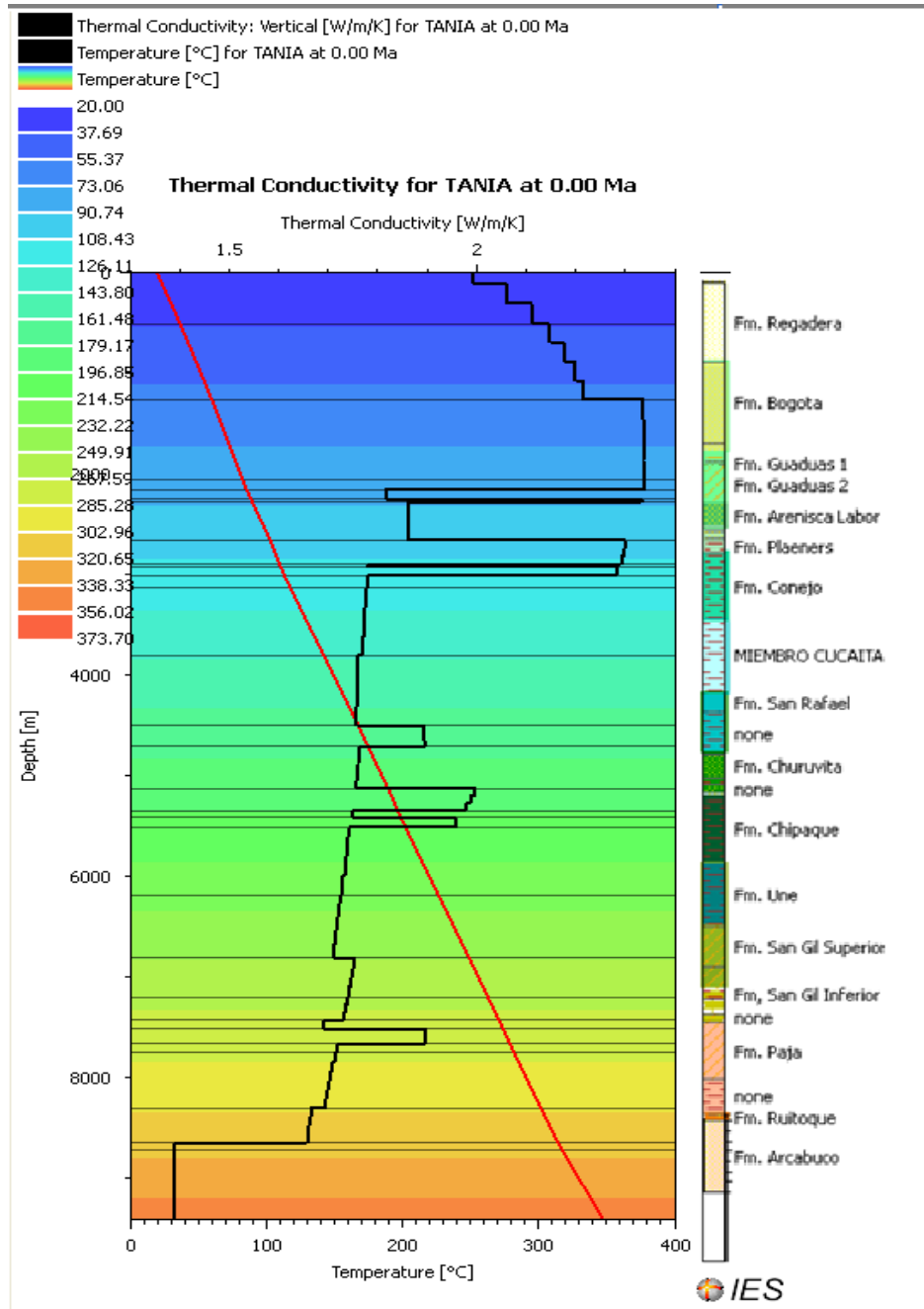
SECCIÓN TUNJA-VILLA DE LEYVA								
FORMACIÓN	TOPE (m)	BASE (m)	Espesor (m)	Erosión (m)	TIEMPO DE DEPOSITACIÓN		LITOLOGIA	%TOC
					DESDE (Ma)	HASTA (Ma)		
Fm. USME	0	500	500	500	37.00	0.00	SANDSTONE	
Fm. Regadera	500	1256	756	756	45.00	37.00	SANDSTONE	
Fm. Bogota	1256	2056	800	800	62.00	53.00	SANDSTONE	
Fm. Cacho	2056	2156	100	100	65.00	62.00	SANDSTONE	
Fm. Guaduas	2156	2246	90		65.01	65.00	SILT&SHALE	
Fm. Guaduas1	2246	2276	30		65.03	65.01	SANDSTONE	
Fm. Guaduas2	2276	2656	380		66.00	65.03	SILTSTONE	
Fm. Arenisca Labor y Tierna	2656	2896	240		68.00	66.00	SANDSTONE	
Fm. Pinos	2896	2922	26		69.00	68.00	SHALE	
	2922	3006	84		70.00	69.00	SANDSTONE	
Fm. Plaeners	3006	3131	125		81.00	70.00	SHALE	
Fm. Conejo	3131	3801	670		87.00	83.00	SHALE	
Miembro Cucaí	3801	4501	700		90.00	87.00	SHALE	0.92
Fm. San Rafael	4501	4711	210		91.00	90.00	Limestone	1.13
	4711	5131	420		92.00	91.00	SHALE	
Fm. Churuvita	5131	5346	215		94.00	92.00	SANDSTONE	0.61
	5346	5418	72		95.00	94.00	SHALE	0.61
	5418	5514	96		97.00	95.00	SANDSTONE	
Fm. Chipaque	5514	6189	675	675	98.00	97.00	SHALE	
Fm. Une	6189	6814	625	325	100.00	98.00	SHALE	
Fm. San Gil Superior	6814	7202	388		104.00	100.00	SILTSTONE	
	7202	7435	233		105.00	104.00	SILTSTONE	
Fm. San Gil Inferior	7435	7519	84		106.00	105.00	SHALE	3.35
	7519	7671	152		108.00	106.00	Limestone	
	7671	7755	84		110.00	108.00	SILTSTONE	
Fm. Paja	7755	8311	556		115.00	110.00	SILTSTONE	
	8311	8655	344		117.00	115.00	SHALE	0.76
Fm. Ruitoque	8655	8725	70		123.00	117.00	SANDSTONE	
Fm. Arcabuco	8725	9425	700		131.00	123.00	SANDSTONE	

Figura 20. Diagrama de Soterramiento decompactado para el centro del Anticlinal de Arcabuco, en la sección de Tunja-Villa de Leyva.



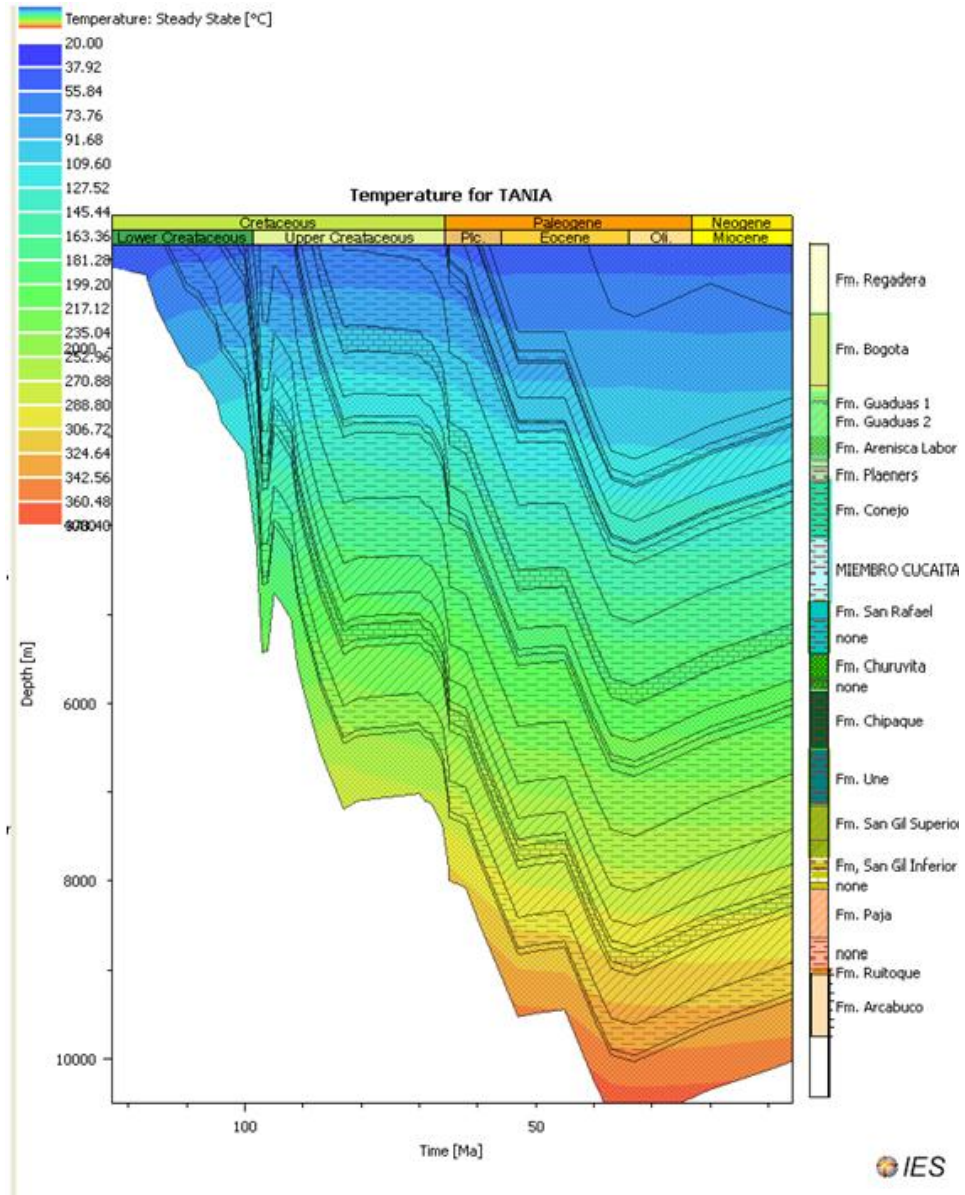
Fuente: Modelamiento geoquímico para la sección de Tunja-Villa de Leyva mediante el programa PetroMod versión 11.

Figura 21. Variabilidad de la conductividad térmica por edades para cada formación de la sección de Tunja- Villa de Leyva, en relación con la profundidad de las mismas.



Fuente: Modelamiento geoquímico para la sección de Tunja-Villa de Leyva mediante el programa PetroMod versión 11.

Figura 22. Variabilidad de la temperatura para cada Formación de la sección de Tunja-Villa de Leyva, teniendo en cuenta la edad y la profundidad.



Fuente: Modelamiento geoquímico para la sección de Tunja-Villa de Leyva mediante el programa PetroMod versión 11.

## GRÁFICAS DE TENDENCIA DE LOS RESULTADOS CON BASE EN LA POSICIÓN ESTRATIGRAFICA DE LAS MUESTRAS DE CADA SECCIÓN ESTUDIADA

### SECCIÓN DEL TRIUNFO:

Figura 23. Gráfica de tendencia de los resultados de Carbono Orgánico Total con respecto a la posición estratigráfica de los mantos de carbón de la sección del Triunfo.

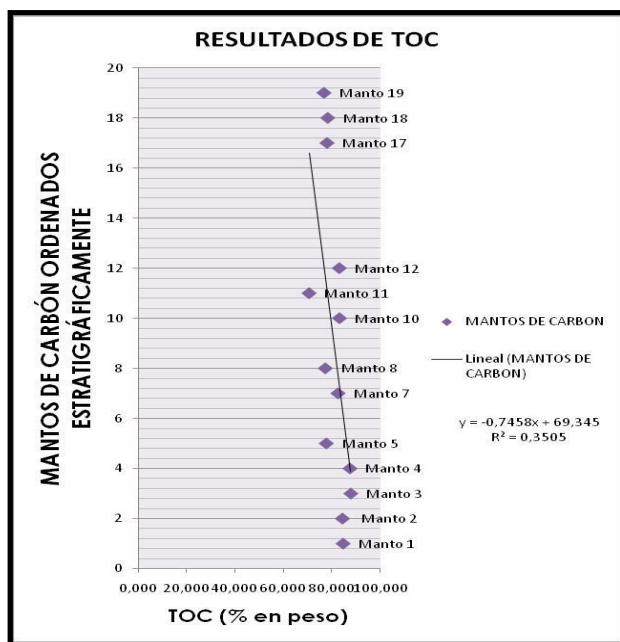
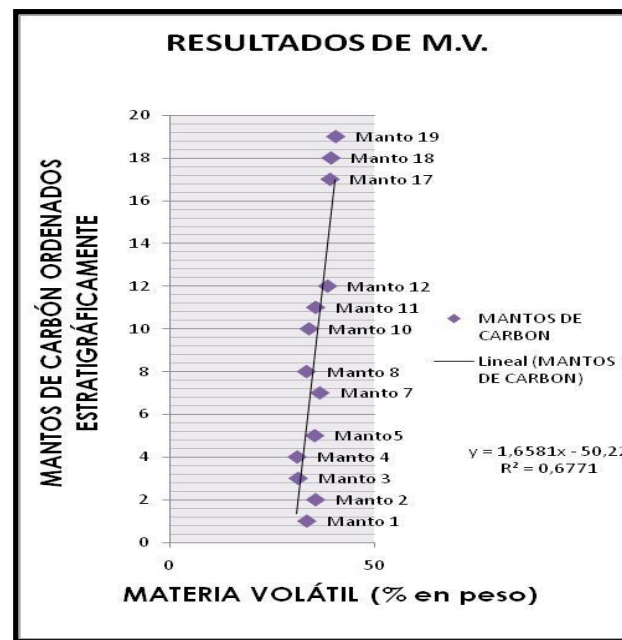


Figura 24. Gráfica de tendencia de los resultados de Materia Volátil con respecto a la posición estratigráfica de los mantos de carbón de la sección del Triunfo.



Fuente: Tendencias de los resultados obtenidos mediante las diferentes técnicas aplicadas en esta investigación para la sección del Triunfo, graficadas mediante Microsoft Office Excel 2007.

Figura 25. Gráfica de tendencia de los resultados de Humedad con respecto a la posición estratigráfica de los mantos de carbón de la sección del Triunfo.

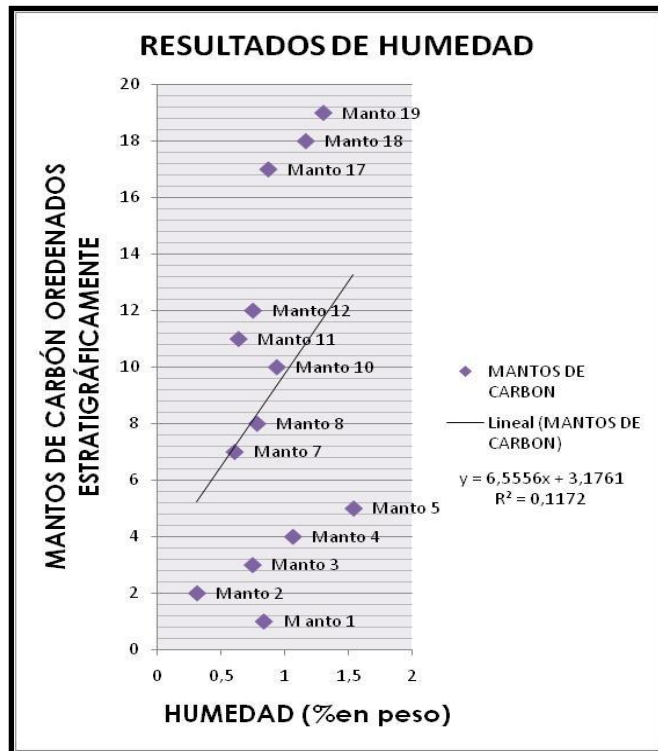
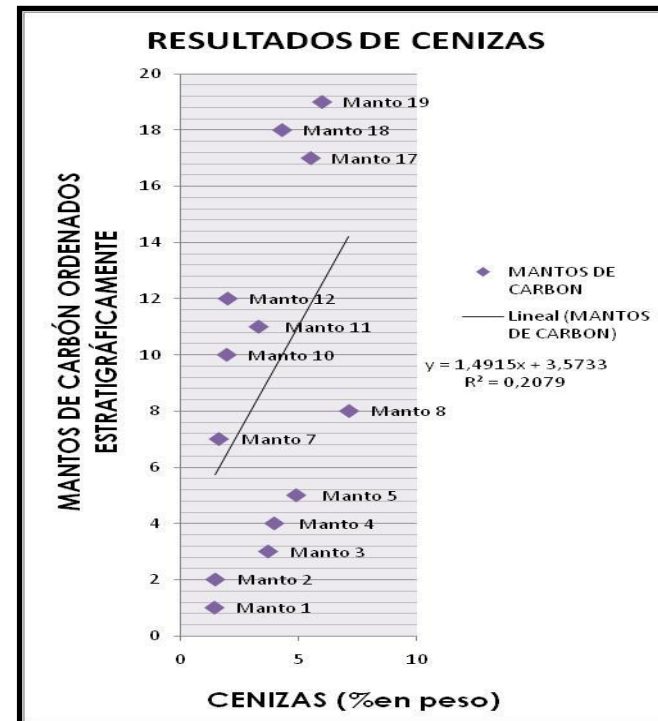


Figura 26. Gráfica de tendencia de los resultados de Cenizas con respecto a la posición estratigráfica de los mantos de carbón de la sección del Triunfo.



Fuente: Tendencias de los resultados obtenidos mediante las diferentes técnicas aplicadas en esta investigación para la sección del Triunfo, graficadas mediante Microsoft Office Excel 2007

Figura 27. Gráfica de tendencia de los resultados de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) con respecto a la posición estratigráfica de los mantos de carbón de la sección del Triunfo.

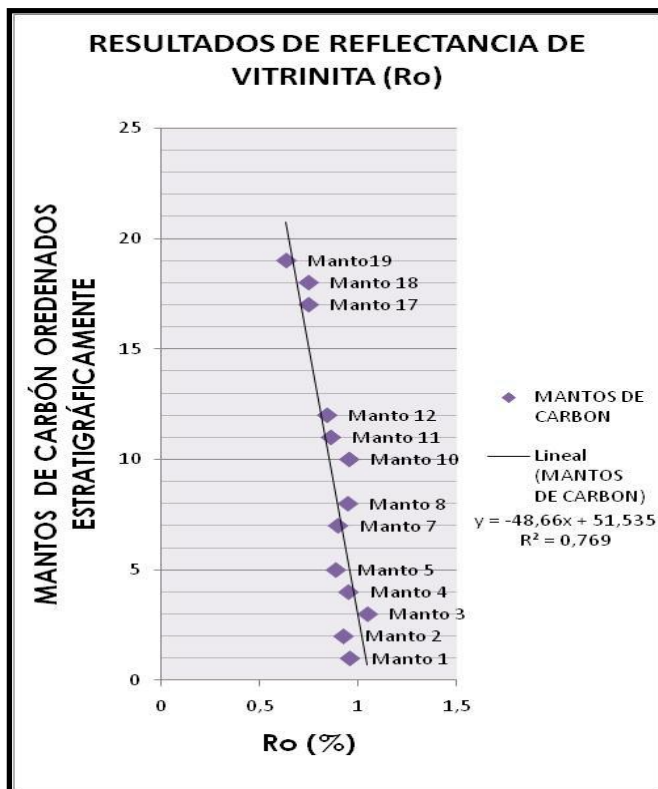
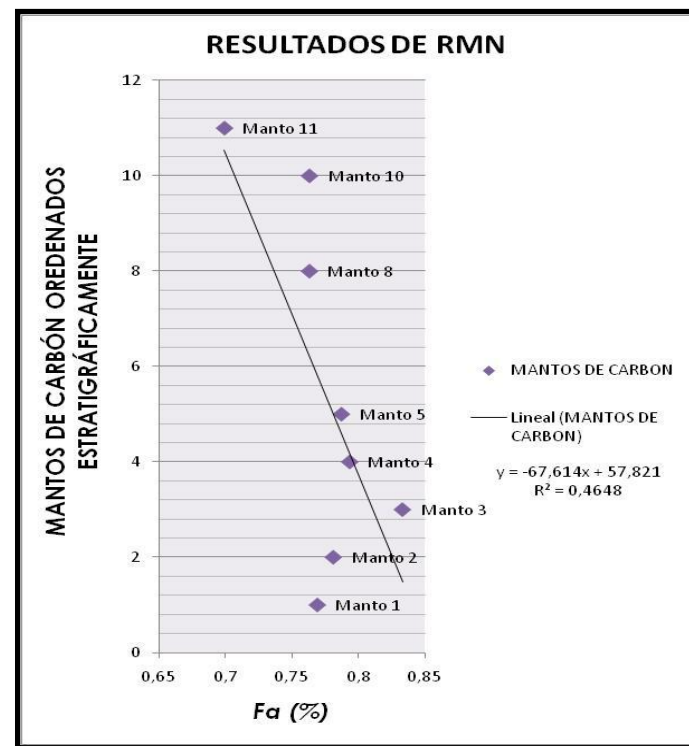
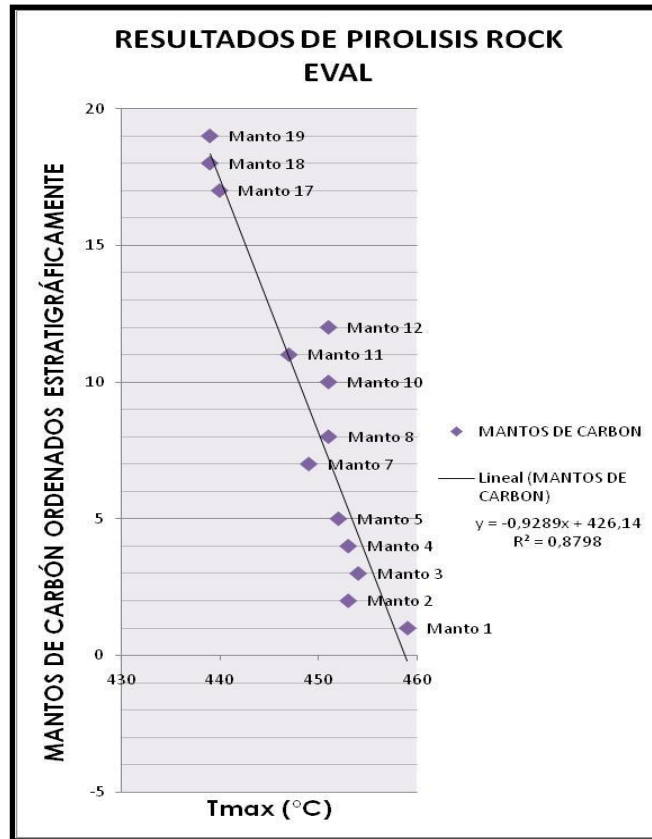


Figura 28. Gráfica de tendencia de los resultados de Reflectancia de Vitrinita (Ro) con respecto a la posición estratigráfica de los mantos de carbón de la sección del Triunfo.



Fuente: Tendencias de los resultados obtenidos mediante las diferentes técnicas aplicadas en esta investigación para la sección del Triunfo, graficadas mediante Microsoft Office Excel 2007

Figura 29. Gráfica de tendencia de los resultados de Pirolisis Rock Eval con respecto a la posición estratigráfica de los mantos de carbón de la sección del Triunfo.



Fuente: Tendencias de los resultados obtenidos mediante las diferentes técnicas aplicadas en esta investigación para la sección del Triunfo, graficadas mediante Microsoft Office Excel 2007.

### SECCIÓN DE TUNJA-VILLA DE LEYVA:

Figura 30. Gráfica de tendencia de los resultados de Carbono Orgánico Total con respecto a la posición estratigráfica de las muestras de cada formación de la sección de Tunja- Villa de Leyva.

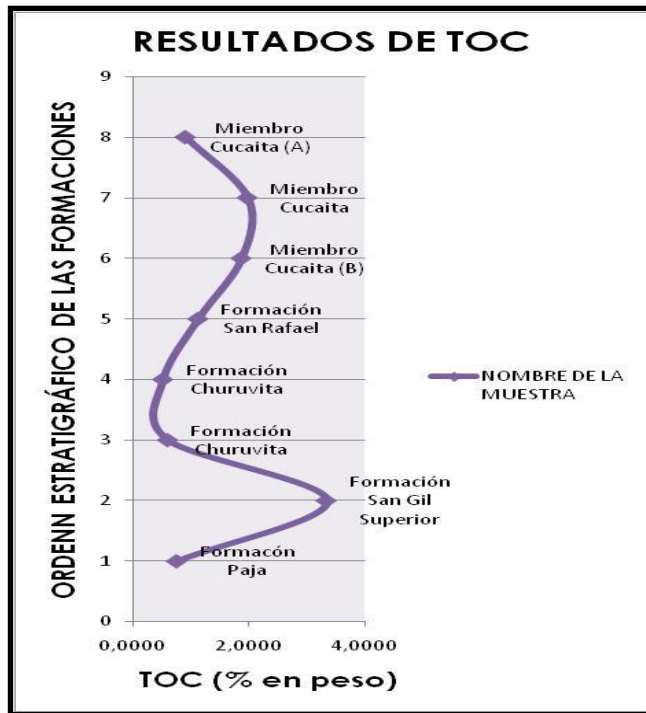
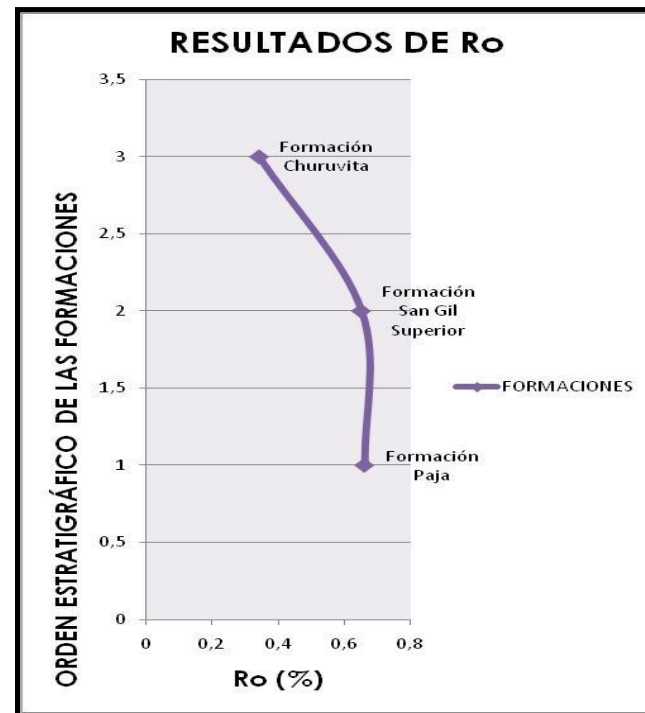
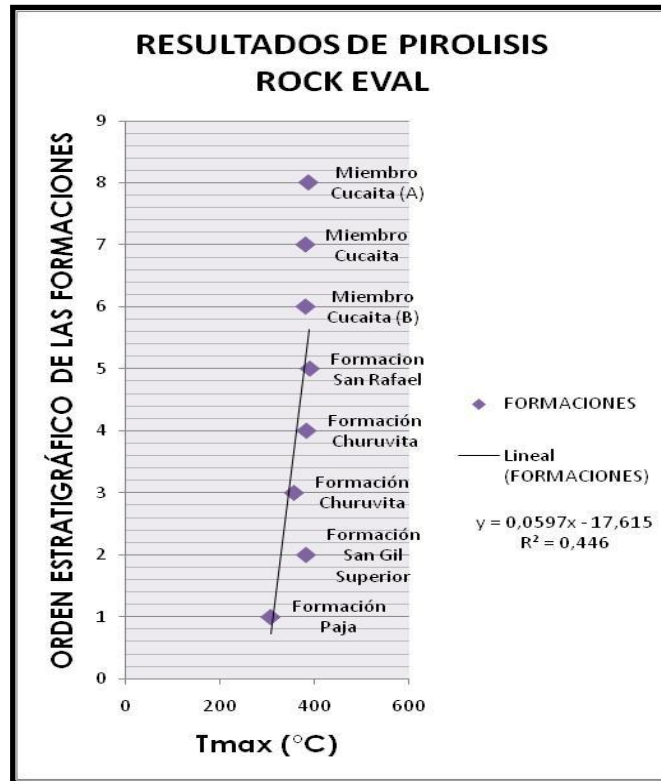


Figura 31. Gráfica de tendencia de los resultados de Reflectancia de Vitrinita con respecto a la posición estratigráfica de las muestras de cada formación de la sección de Tunja- Villa de Leyva.



Fuente: Tendencias de los resultados obtenidos mediante las diferentes técnicas aplicadas en esta investigación para la sección de Tunja-Villa de Leyva, graficadas mediante Microsoft Office Excel 2007

Figura 32. Gráfica de tendencia de los resultados de Pirolisis Rock Eval con respecto a la posición estratigráfica de las muestras de cada formación de la sección de Tunja- Villa de Leyva.



Fuente: Tendencias de los resultados obtenidos mediante las diferentes técnicas aplicadas en esta investigación para la sección de Tunja- Villa de Leyva, graficadas mediante Microsoft Office Excel 2007

## 9. ANALISIS DE RESULTADOS

### 9.1 ANÁLISIS PROXIMALES Y CARBONO ORGANICO TOTAL (TOC)

**9.1.1 Sección del Triunfo.** Los resultados obtenidos en los análisis de carbono orgánico total (TOC) de la sección del Triunfo, muestran que el contenido de carbono orgánico total tiene una fuerte tendencia a aumentar a medida que se descende estratigráficamente, es decir, que aumenta hacia la base de la Formación Guaduas (ver Figura 23.), demostrando que los mantos inferiores (mantos del 1 al 4) poseen un mayor grado de carbonización con respecto a los mantos intermedios (mantos del 5 al 12) y los mantos superiores (mantos del 17 al 19), debido que estuvieron sometidos en tiempo a un prolongado proceso bacteriano anaerobio que se vio influenciado además por las presiones y temperaturas a las que estuvieron sometidos durante la subsidencia de la antigua cuenca de Bogotá.

De acuerdo con los porcentajes de TOC obtenidos para los mantos de carbón de la sección de triunfo se tiene que son rocas potencialmente generadoras de hidrocarburos líquidos y gas.

Por otra parte los resultados de los análisis proximales de carbones, muestran las siguientes tendencias:

Los resultados de materia volátil tienen una fuerte tendencia disminuir hacia la base de la Formación Guaduas (ver figura 24.). Estos resultados permitieron clasificar a los mantos inferiores (mantos del 1 al 4) e intermedios (mantos del 5 al 12) como mantos de carbón de medio a altos en volátiles bituminosos y a los mantos superiores (mantos del 17 al 19) como mantos de carbón altos en volátiles, según la clasificación de Meissner en García González (1992).

Los resultados de Humedad son bastante bajos, con valores menores o iguales a 1.5%, debido a que las muestras pierden su contenido de humedad desde el momento que son sacadas de frente de mina. Aunque los resultados no muestren una tendencia homogénea, se logra observar que tiende a disminuir hacia la base de la Formación (ver Figura 25.).

Los resultados de cenizas tienen una tendencia a disminuir hacia la base de la Formación Guaduas (ver Figura 26.). Estos resultados son bajos, con valores que no superan el 7%. Sin embargo, son los mantos superiores (mantos del 17 al 19) los que presentan los porcentajes de cenizas más elevados, lo cual corrobora que durante la depositación de los mantos superiores de esta Formación ocurrió un gran aporte de sedimentos a la laguna hullera, este hecho se ve evidenciado hacia el tope de la Formación Guaduas de acuerdo con los estudios realizados por Rincón L. y Rocha A. (2007).

Los resultados de carbono fijo muestran una tendencia a aumentar hacia la base de la Formación Guaduas, con valores que oscilan entre 52.18% a 64.24% de techo a base de la Formación, demostrando que los mantos inferiores (mantos del 1 al 4) presentan un mayor grado de carbonización con respecto a los mantos intermedios (mantos del 5 al 12) y a los mantos superiores (mantos del 17 al 19); corroborando así los resultados obtenidos en las mediciones de carbono orgánico total.

**9.1.2 Sección Tunja-Villa de Leyva.** El comportamiento del carbono orgánico total (TOC) en esta sección muestra una gran variabilidad, sin ningún tipo de tendencia aparente (ver Figura 30.); sin embargo, la Formación San Gil Superior presenta el % de TOC más elevado con un valor de 3.34%, seguido por la Formación San Rafael y el Miembro Cucaita, cuyos valores varían entre 1.13 y 1.98%TOC, respectivamente. Estos resultados permiten corroborar que el

contenido de carbono orgánico en cada una de las formaciones estudiadas en esta sección depende exclusivamente del ambiente de depositación de las mismas.

## **9.2 RESONANCIA MAGNETICA NUCLEAR**

**9.2.1 Sección del Triunfo.** La técnica de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) en muestras sólidas, permitió realizar un seguimiento detallado del proceso de maduración termal que sufre la molécula de Kerógeno presente en las muestras de carbones de las Formación Guaduas, comprendiendo diferentes profundidades de enterramiento, lo cual es favorable para entender la forma en la que evoluciona la estructura de la molécula de kerógeno durante el proceso de maduración termal, determinando así el momento en el que se generan hidrocarburos líquidos o gas.

Los análisis de RMN permiten obtener dos tipos de resultados: el factor de aromaticidad ( $f_a$ ), el cual se calcula con el contenido de carbonos aromáticos y alifáticos presentes en las moléculas de kerógenos (como se explico en detalle en la parte metodológica) y los espectros de cada uno de los mantos de carbón estudiados en la sección del Triunfo. Con base en estos resultados se tiene que:

El factor de aromaticidad ( $f_a$ ) tiene una fuerte tendencia a aumentar hacia la base de la Formación Guaduas (ver Figura 27.), lo que demuestra que al aumentar el grado de maduración termal de los mantos de carbón aumenta el factor de aromaticidad en los mismos.

Los espectros de los mantos de carbón obtenidos en RMN para esta sección, muestran de forma generalizada un incremento en tamaño y nitidez en el pico del carbono aromático (ver Figura 15, pico de la izquierda) a medida que aumenta el

grado de maduración termal, el carbono aromático se encuentra ubicado dentro del intervalo de desplazamiento químico de 100 a 180ppm, según Snape(1979); paralelamente se observa un decrecimiento no muy marcado con menor nitidez en el pico del grupo alifático (ver figura 15, pico de la derecha) a medida que aumenta el grado de maduración termal, el carbono alifático se encuentra ubicado dentro del intervalo de desplazamiento químico de 11 a 60ppm, según Snape(1979). Esta interpretación puede corroborarse con el aumento del factor de aromaticidad ( $f_a$ ) en los carbones a medida que aumenta la maduración y la profundidad de enterramiento en los mismos (ver tabla 7); dicho  $f_a$  se determinó mediante una ecuación explicada en la parte metodológica por medio del programa Mestre-c versión 4.9.9.6.

De forma detallada se logro identificar que al aumentar el grado de maduración termal de los mantos de carbón de la Formación Guaduas en esta sección, la cadena de los carbonos alifáticos tiende a tornarse inestable, permitiendo que su estructura se quiebre y se rompa, debido a ciertos procesos de deshidrogenación, dando lugar a que se formen nuevas estructuras cíclicas o aromáticas. Durante este proceso los grupos funcionales y radicales que acompañan al carbono alifático pierden oxígeno, la mayoría de veces este oxígeno pasa a formar parte de las nuevas cadenas aromáticas que se formaron, aumentando así las reacciones de aromaticidad y por ende el pico de los carbonos aromáticos.

Con base en lo anterior, de forma individual y detallada los mantos de carbón muestran diferentes grupos funcionales químicos acompañando a los carbonos aromáticos y alifáticos, tales como: grupos alquilos, cetonas, algunos radicales de alcoholes, esterres, éteres, etc. A continuación se explicaran los diferentes grupos funcionales químicos identificados en cada uno de los mantos de carbón estudiados, comenzando de forma descendente estratigráficamente:

Los mantos superiores (mantos del 19 al 17), muestran con menor tamaño y nitidez el pico del carbono alifático y con mayor tamaño y nitidez el pico del carbono aromático (ver figura 15), dejando ver mediante la deconvolución realizada por medio del programa Dmfit los intervalos de desplazamiento químico de los principales grupos funcionales y radicales que acompañan a los mismos (según Snape 1979), tales como:

- En el intervalo de 11-15 ppm, aparece un  $\text{CH}_3$  ó  $\alpha\text{-CH}_3$  alejados de anillos aromáticos por dos anillos o grupos adyacentes.
- En el intervalo de 15-18 ppm, aparece un  $\beta\text{-CH}_3$  en grupos etilo.
- En el intervalo de 18-20.5 ppm, aparece un  $\alpha\text{-CH}_3$  protegido por un anillo o grupo adyacente.
- En el intervalo de 20.5-22.5 ppm, aparece  $\alpha\text{-CH}_3$  no protegido por ningún anillo o grupo.
- En el intervalo de 22.5-24 ppm, aparece 24-27.5  $\text{CH}_2$  junto a un grupo alquilo,  $\text{CH}_3$  en hidroaromáticos y anillos naftalenicos (18-24 ppm).
- En el intervalo de 24-27.5 ppm, aparece  $\text{CH}_2$  naftalenico, protegido por grupos  $\alpha\text{-CH}_2$  y grupos propilo,  $\beta\text{-CH}_3$  en grupos isopropilos.
- En el intervalo de 27.5-37 ppm, aparece  $\text{CH}_2$  en grupos alquilos,  $\text{CH}_2$  unidos a anillos del grupo etileno,  $\alpha\text{-CH}_2$  y  $\text{CH}$ ,  $\beta\text{-CH}$  en anillos hidroaromáticos; naftalenicos  $\text{CH}_2$ .
- En el intervalo de 37-60 ppm, aparece anillos unidos de metileno (32-43 ppm),  $\text{CH}$  en grupos alquilos y anillos naftalenicos;  $\text{CH}_2$  en grupos alquilos adyacentes a  $\text{CH}$ .
- En el intervalo de 100-129.5 ppm, aparecen principalmente aromáticos C-H con aromáticos ortho C-H a C-OH entre 100-115 ppm.
- En el intervalo de 129 -148 ppm, aparecen principalmente aromáticos de enlace simple C-C y aromáticos C-NH.
- En el intervalo 148-168ppm, aparecen los aromáticos C-O.

Demostran así que a medida que se desciende hacia la base de la Formación Guaduas, los grupos funcionales y radicales que acompañan al pico del grupo alifático tienden a disminuir notablemente con el aumento del grado de maduración termal de los mantos de carbón; y los grupos funcionales que acompañan al pico del grupo aromático tienden a aumentar en tamaño y nitidez, con el aumento del grado de maduración termal de los mantos de carbón, debido al aumento de las reacciones de aromaticidad.

Los mantos de carbón intermedios (mantos del 12 al 5), presentan la misma tendencia en el aumento del pico del grupo aromático y en la disminución paulatina de la nitidez del pico del grupo alifático; sin embargo en estos mantos se observa la evidente disminución de los grupos funcionales que acompañan al pico del carbono alifático (ver anexo F), tales como:

- El  $\beta$ -CH<sub>3</sub> en grupos etilo, en el intervalo de 15-18 ppm.
- El  $\alpha$ -CH<sub>3</sub> protegido por un anillo o grupo adyacente, en el intervalo de 18-20.5 ppm.
- El  $\alpha$ -CH<sub>3</sub> no protegido por ningún anillo o grupo, en el intervalo de 20.5-22.5 ppm.
- El CH<sub>2</sub> junto a un grupo alquilo, CH<sub>3</sub> en hidroaromáticos, en el intervalo de 22.5-24 ppm, y los anillos naftalénicos en el intervalo de 18-24 ppm.

La disminución y pérdida de oxígeno de los grupos funcionales y radicales que acompañan al carbono alifático en los mantos de carbón intermedios, permiten aumentar las reacciones de aromaticidad y por ende pico de los carbonos aromáticos con sus respectivos grupos funcionales, tales como:

- En el intervalo de 100-129.5 ppm, aparecen principalmente aromáticos C-H con aromáticos ortho C-H a C-OH entre 100-115 ppm.

- En el intervalo de 129.148 ppm, aparecen principalmente aromáticos de enlace simple C-C y aromáticos C-NH.
- En el intervalo 148-168, aparecen los aromáticos C-O.

Hacia los mantos de carbón inferiores (mantos del 4 al 1), se observa el notable aumento del pico del carbono aromático, el cual muestra una mayor simetría y nitidez; paralelamente el pico del grupo alifático sigue disminuyendo y perdiendo definición, causando la desaparición de grupos funcionales (ver anexo F), tales como: CH<sub>2</sub> junto a un grupo alquilo, en el intervalo de 24-27.5 ppm, el CH<sub>3</sub> en hidroaromáticos y anillos naftalénicos, en el intervalo de 18-24 ppm; y la notable disminución de los siguientes grupos funcionales:

- El CH<sub>3</sub> ó α- CH<sub>3</sub> alejados de anillos aromáticos por dos anillos o grupos adyacentes, en el intervalo de 11-15 ppm.
- El β- CH<sub>3</sub> en grupos etilo, en el intervalo de 15-18 ppm.
- El α- CH<sub>3</sub> no protegido por ningún anillo o grupo, en el intervalo de 20.5-22.5 ppm.
- Los anillos unidos de metileno en el intervalo 32-43 ppm, el CH en grupos alquilos y anillos naftalénicos, el CH<sub>2</sub> en grupos alquilos adyacentes a CH, en el intervalo de 37-60 ppm.

La desaparición de los grupos funcionales que acompañan al pico del carbono alifático y el aumento del pico del carbono aromático junto con la aparición de otros grupos funcionales que acompañan al mismo, permiten constatar que con el aumento de la maduración termal de los mantos de carbón aumenta la reacción de aromaticidad, formando así más anillos aromáticos a partir de la pérdida de oxígeno de los grupos funcionales que acompañan al carbono alifático; esto puede

ser corroborado con los datos del factor de aromaticidad ( $f_a$ ) calculados (ver tabla 7).

**9.2.2 Sección de Tunja Villa de Leyva.** Para esta sección solo se obtuvieron buenos resultados en las muestras de shales de la Formación San Gil Superior (TPH-TV-7) y del Miembro Cucaita (TPH-TV-1 y TPH-TV-2). Los resultados obtenidos del análisis de RMN en los espectros de los shales de las Formaciones anteriormente nombradas en esta sección, muestran de forma generalizada un incremento en tamaño y nitidez en el pico del grupo aromático (ver Figura 19, pico de la izquierda) a medida que aumenta el grado de maduración termal y la profundidad de enterramiento; los carbonos aromáticos se encuentran ubicados dentro del intervalo de desplazamiento químico de 100 a 180ppm, según Werner Ulrike(2005); paralelamente debería observarse el pico del carbono alifático (hacia la parte derecha), con una continua disminución del mismo a medida que aumenta el pico del grupo aromático, pero estas muestras solo manifestaron un pico aromático bien formado y con buena definición, lo cual podría demostrar que el proceso de maduración termal al que estuvieron sometidas las formaciones de esta sección fue tan elevado que la reacción de aromaticidad se dio casi en un 100%, formando así varios anillos aromáticos.

El factor de aromaticidad ( $f_a$ ) no pudo ser calculado para esta sección debido a la ausencia de los valores del carbono alifático. Sin embargo se lograron identificar las áreas aromáticas en cada uno de los espectros, mediante el programa Mestre-c 4.9.9.6 y en un análisis detallado se lograron observar los algunos grupos funcionales ubicados en los siguientes intervalos de desplazamiento químico.

## 9.3 REFLECTANCIA DE VITRINITA

**9.3.1 Sección del Triunfo.** Los resultados de reflectancia de vitrinita ( $R_o$ ) obtenidos de los 14 mantos de carbón muestreados de la Formación Guaduas en el sinclinal Checua – Lenguaque, permiten deducir de forma general que los valores de  $R_o$  tienden a aumentar hacia la base de la Formación (ver Figura 28.). Para esta sección de estudio la reflectancia de vitrinita fue el mejor indicador del grado madurez termal de los carbones, debido a que la reflectividad de la vitrinita aumentaba proporcionalmente con el aumento del grado de maduración termal.

Con base en los resultados obtenidos en las mediciones de  $R_o$ , se logro clasificar a los mantos de carbón de la sección del Triunfo de la siguiente manera:

Los mantos inferiores (mantos del 1 al 4) están en una etapa de maduración tardía, debido a que sus valores se encuentran en un rango de 0.9 a 1.35 % $R_o$ .

Los mantos intermedios (mantos del 5 al 12) están en una etapa de pico de generación, debido a que sus valores se encuentran en un rango de 0.65 a 0.9% $R_o$ .

Los mantos superiores (mantos de 17 al 19) se encuentran en dos etapas: los mantos 17 y 18 están en un etapa de pico de generación, debido a que sus valores de encuentran en un rango de 0.65-0.9% $R_o$ ; y el manto 19 está en una etapa de maduración temprana, debido a que sus valores lo ubican en un rango de 0.6-0.65% $R_o$ .

Los altos % de  $R_o$  en los mantos inferiores demuestran que su grado de maduración termal es más elevado con respecto a los mantos superiores. Además los elevados % $R_o$  que presentan los mantos de carbón de la sección del

Triunfo, permiten constatar que el ambiente de depositación de los mismos es característico de un depósito en aguas de escasa profundidad.

El control estratigráfico para los valores de  $R_o$  permite deducir que los rangos de madurez termal se alcanzaron justo antes de la exhumación de la Cordillera en la Orogenia Andina.

**9.3.2 Sección de Tunja Villa de Leyva.** Los resultados de reflectancia de vitrinita obtenidos en las muestras de shale y calizas de esta sección no fueron los mejores, debido a que el tamaño de dicho maceral no tenía las dimensiones requeridas por el equipo para poder medir su verdadero poder reflector, además algunas muestras presentaban un alto grado de meteorización.

Con base en lo anterior, para esta sección solo se pudieron tomar mediciones de reflectancia de vitrinita en las muestras de shales de las Formaciones: Paja, San Gil Superior y San Rafael, obteniéndose los siguientes resultados:

La Formación Paja, de acuerdo con los resultados de la muestra de shale, se encuentra en una etapa de pico de generación, debido a su valor de  $\%R_o$  oscila en un rango de 0.65 a 0.95 $R_o$ .

La Formación San Gil Superior, de acuerdo con los resultados de la muestra de shale, se encuentra en una etapa de pico de generación, debido a su valor de  $R_o$  oscila en un rango de 0.65 a 0.95 $R_o$ .

La Formación Churuvita, de acuerdo con los resultados de la muestra de shale, se encuentra en un estado inmaduro, debido a su valor de  $R_o$  oscila en un rango de 0.2 a 0.6 $\%R_o$ .

Se observó además que los valores de  $R_o$  para esta sección tienen una fuerte tendencia a aumentar hacia la base de las Formaciones (ver Figura 31).

## 9.4 PIROLISIS ROCK EVAL

**9.4.1 Sección del Triunfo.** Los resultados obtenidos mediante la técnica de pirolisis rock eval en la sección del Triunfo son 8, como se puede observar en la tabla 10 (ver resultados de pirolisis rock eval), dentro de los que están: Pico S1, el cual corresponde a la medida de los hidrocarburos libres; el Pico S2, el cual corresponde a los hidrocarburos producidos durante el calentamiento por craqueo del kerógeno; el Pico S3, corresponde a la medida de  $CO_2$  producido durante la pirolisis; los IH e IO, los cuales corresponden a la cantidad de hidrogeno y oxigeno presente en el kerógeno respectivamente; el IP, que corresponde a la medida del avance de la generación de hidrocarburos líquidos y gas en una roca; y la Temperatura máxima (Tmax), la cual corresponde a la temperatura máxima alcanzada por el horno durante el análisis (S2). Sin embargo, es esta última medida la que me indica el grado de maduración termal del kerógeno, controlada por el tipo de materia orgánica, según Espitalie y otros (1985), pues por medio de los resultados de Tmax se pueden clasificar las rocas de acuerdo con su potencial para generar hidrocarburos.

Con base en lo anterior, los resultados de Tmax muestran una fuerte tendencia a aumentar su temperatura ( $^{\circ}C$ ) hacia la base de la Formación Guaduas en la sección del Triunfo (ver Figura 29.), permitiendo clasificar los mantos de carbón de acuerdo con su potencial para generar hidrocarburos de la siguiente manera:

Los mantos inferiores (mantos del 1 al 5) se encuentran en el final de la ventana de generación de aceite, debido a que sus resultados oscilan en un rango de temperatura entre 450 a 470  $^{\circ}C$ .

Los mantos intermedios (mantos 7 y 11), se encuentran en pico de generación de hidrocarburos, debido a que sus resultados oscilan en un rango de temperatura entre 445 a 470°C.

Los mantos intermedios y superiores (mantos 12, 17, 18 y 19), se encuentran en un estado de inmadurez temprana, debido a que sus resultados oscilan en un rango de temperatura entre 435 a 445°C.

La medida de CO<sub>2</sub> producido durante la pirolisis, representado por el pico S3 (mg/g), aumenta hacia el tope de la Formación Guaduas a causa craqueo y la degradación de térmica del kerógeno.

El índice de producción (IP) obtenido confirma la veracidad de los resultados de S1(mg/g), S2(mg/g) , S3(mg/g) y Tmax, permitiendo determinar que los mantos inferiores e intermedios son los que presentan un mayor potencial para generar hidrocarburos, debido a que se encuentran en las condiciones fisicoquímicas adecuadas. Sin embargo, para verificar y tener una mayor claridad de los resultados obtenidos, se debería llevar a cabo un conteo de macérales de forma detallada en cada una de las muestras estudiadas en esta sección.

Con base en los resultados obtenidos de los índices de hidrogeno y oxigeno, se logro identificar que los mantos de carbón de la Formación Guaduas, a aparte de estar constituidos por un kerógeno tipo III como se observo en los resultados de Ro, también están constituidos por un kerógeno tipo II, de acuerdo con los resultados obtenidos mediante la grafica de IH Vs IO, elaborada por el programa Rockint del equipo de pirolisis (ver anexo G).

**9.4.2 Sección de Tunja-Villa de Leyva.** Al igual que la sección del Triunfo, los resultados obtenidos de la técnica de pirolisis rock eval son 8, como se puede observar en la tabla 14, los cuales corresponden al Pico S1, Pico S2, Pico S3, IP, IH, IO y Tmax, sin embargo son los resultados de la Temperatura máxima (Tmax), los que indican el grado de maduración termal del kerógeno, según Espitalie y otros (1985), ya que medio de estos se pueden clasificar las rocas de acuerdo con su potencial para generar hidrocarburos.

Con base en lo anterior, los resultados de Tmax muestran una tendencia a permanecer constantes a medida que se desciende estratigráficamente en la sección de Tunja-Villa de Leyva (ver Figura32.), permitiendo clasificar las muestras de shales y calizas de las Formaciones de esta sección, como rocas potencialmente generadoras de hidrocarburos, pero inmaduras termalmente, debido a que sus valores oscilan en un rango de Tmax < 435°C.

La medida de CO<sub>2</sub> producido durante la pirolisis, representado por el pico S3(mg/g), aumenta hacia el tope de las Formaciones a causa craqueo y la degradación de térmica del kerógeno, demostrando que la Miembro Cucaita es el que produce mayores cantidades de CO<sub>2</sub> durante la pirolisis.

El índice de producción (IP) obtenido confirma la veracidad de los resultados de S1(mg/g), S2(mg/g) , S3(mg/g) y Tmax, permitiendo determinar que las formaciones con mayor potencial para generar hidrocarburos son: la formación San Gil Superior con un IP de 0.77 (muestra TPH-7) y la formación churuvita con un IP de 0.82 (muestra TPH-4), debido a que se encuentran en las condiciones fisicoquímicas adecuadas. Sin embargo, para verificar y tener una mayor claridad de los resultados obtenidos, se debería llevar a cabo un conteo de macérales de forma detallada en cada una de las muestras estudiadas en esta sección.

Con base en los resultados obtenidos de los índices de hidrogeno y oxigeno, se logro identificar que los shales y calizas de las Formaciones: Paja, San Gil Superior, Churuvita, San Rafael y el miembro Cucaita, están constituidos por un kerógeno tipo III, de acuerdo con los resultados obtenidos mediante la grafica de IH Vs IO, elaborada por el programa Rockint del equipo de pirolisis (ver anexo H); como se observo además en los resultados de Ro.

## **9.5 ANALISIS DE RESULTADOS DEL MODELAMIENTO GEOQUIMICO**

**9.5.1 Sección del Triunfo.** EL diagrama de soterramiento evidencia las ratas de sedimentación que tuvieron lugar a lo largo del tiempo geológico en cada una de las formaciones de esta sección, determinándose así la evolución de la antigua cuenca de Bogotá e identificando los diferentes eventos a los que ha sido sometida (ver Figura16).

Con base en los diagramas de tiempo – Temperatura (ver Figura 18), se determino que la base de la Formación Guaduas alcanza su máxima temperatura (99.51°C) hace aproximadamente 49.90 Ma, actualmente se muestra que la base presenta temperaturas de 96.86°C aproximadamente; mientras que el techo de la Formación presenta menores temperaturas a lo largo de su historia, la diferencia de temperatura entre la base y el techo es de aproximadamente 22°C.

Hacia el centro del sinclinal de Checua-Lenguazaque se observan ciertas variaciones de temperatura generadas por la variación de la rata de levantamiento de la cordillera oriental en este punto específico, sin embargo, se determino que el centro del sinclinal sufrió un menor levantamiento y erosión comparado con los flancos del mismo.

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

Por otra parte, los resultados de madurez termal determinados por la reflectancia de vitrinita calculada mediante el modelamiento geoquímico, permitieron demostrar que los mantos de carbón intermedios (mantos del 5 al 12) y parte de los mantos superiores (mantos 17 y 18) de la Formación Guaduas, en el centro de sinclinal de Checua-Lenguazaque, alcanzan un estado de pico de generación con %Ro que oscilan entre 0,65 a 0,69%.

**9.5.2 Sección de Tunja-Villa de Leyva.** EL diagrama de soterramiento evidencia las tasas de sedimentación que tuvieron lugar a lo largo del tiempo geológico en cada una de las formaciones de esta sección, determinándose así la evolución de la antigua cuenca de Villa de Leyva e identificando los diferentes eventos a los que han sido sometidas (ver Figura 20.).

Con base en los diagramas de tiempo – Temperatura (ver Figura 22), se determino que la base de la Formación Paja alcanzo su máxima temperatura (339.22°C) hace aproximadamente 33 Ma; que la base de la Formación San Gil Superior, alcanzo su máxima temperatura (295.65°C) hace aproximadamente 31.71Ma , que la base de la Formación Churuvita, alcanzo su máxima temperatura (228.73°C), hace aproximadamente 30.84Ma; que la base de la Formación San Rafael, alcanzo su máxima temperatura (215.39°C) hace aproximadamente 30.82Ma ; y que la base del Miembro Cucaita, alcanzo su máxima temperatura (194°C) hace aproximadamente 29.98Ma . Actualmente se muestra que la base de estas Formaciones presentan las siguientes temperaturas (de forma ascendente estratigráficamente): 312.64°C, 269.30°C, 201.90°C, 188.48°C y 166.29°C, respectivamente.

Hacia el centro del Anticlinal de Arcabuco se observan ciertas variaciones de temperatura generadas por la variación de la rata de levantamiento de la cordillera oriental en este punto específico, sin embargo, se determino que el centro del anticlinal sufrió un levantamiento y erosión moderado con respecto a los flancos del mismo.

Esta diferencia de valores para el centro del anticlinal muestra una tendencia normal si se tiene en cuenta que este ha estado sometido a mayores temperaturas.

Por otra parte, los resultados de madurez termal determinados por la reflectancia de vitrinita calculada mediante el modelamiento geoquímico, permitieron demostrar que las muestras de shales y calizas de las Formaciones: Paja, San Gil Superior, Churuvita, San Rafael y Miembro Cucaita, no eran lo suficientemente frescas, es decir que presentaban un alto grado de meteorización, debido a que los valores de %Ro medidos en esta investigación no concuerdan de forma confiable con los valores de %Ro calculados por medio del modelamiento geoquímico para cada una de las Formaciones estudiadas en esta sección.

## **9.6 CORRELACIÓN DE RESULTADOS CON EL MODELAMIENTO GEOQUIMICO**

Con base en los resultados obtenidos en cada una de las técnicas de análisis geoquímico utilizadas en el desarrollo de esta investigación se determino que el mejor indicador de madures termal para las secciones estudiadas fue la medida de reflectancia de vitrinita (Ro).

Con base en lo anterior se estableció que los valores de las mediciones de reflectancia de vitrinita (Ro) obtenidos en esta investigación para los mantos de

carbón de la sección del Triunfo, concuerdan de forma verídicamente confiable con los valores de reflectancia de vitrinita (Ro) calculados mediante el programa de modelamiento geoquímico PetroMod 1D versión 11; pues los valores de Ro medidos en los mantos de carbón de base a techo de la Formación Guaduas oscilan entre 0.95 a 0.63%Ro y los valores de Ro calculados por medio del modelamiento geoquímico mediante el programa PetroMod varían entre de 0.65 a 0.69%Ro.

Por otra parte, los valores de las mediciones de reflectancia de vitrinita (Ro) obtenidos en esta investigación para las muestras de shales y calizas de la sección del Tunja-Villa de Leyva, no concuerdan con los valores de reflectancia de vitrinita (Ro) calculados mediante el programa de modelamiento geoquímico PetroMod 1D versión 11, pues las muestras de shales y calizas de las Formaciones: Paja, San Gil Superior, Churuvita, San Rafael y Miembro Cucaita, pertenecientes a esta sección, se encontraban afectadas por un alto grado de meteorización, es decir, que no eran muestras frescas, ni aptas para la realización de ciertos análisis geoquímicos.

## CONCLUSIONES

### PARA LA SECCIÓN DEL TRIUNFO:

Se determinó que los mantos de carbón de la Formación Guaduas en la sección del Triunfo, presentan una maduración termal que aumenta hacia la base de la formación, como lo indican los datos de reflectancia de vitrinita ( $R_o$ ), análisis proximal para la materia volátil y pirolisis rock eval con  $T_{max}$ .

Se estableció que los mantos de carbón de la Formación Guaduas varían de techo a base su rango de maduración termal de la siguiente manera: los mantos inferiores están en un rango de maduración tardía, los mantos intermedios están en un rango de pico de generación y a los mantos superiores están en un rango de maduración temprana, como lo indican los datos de reflectancia de vitrinita ( $R_o$ ) y pirolisis rock eval con  $T_{max}$ .

Se determinó la evolución estructural que sufrió la molécula de kerógeno en los mantos de carbón de la Formación Guaduas, encontrándose de forma general las siguientes tendencias:

- Aumento de las reacciones de aromaticidad a medida que aumenta el grado de maduración termal.
- Disminución del contenido de carbonos alifáticos a medida que aumenta el grado de maduración termal.

De forma detallada se estableció que las cadenas de carbonos alifáticos de la molécula de kerógeno, tienden a tornarse inestables con el aumento del grado de maduración termal, lo que genera que sus estructuras se quiebren y se rompan, pasando a formar nuevas cadenas cíclicas o aromáticas. Durante este proceso

los grupos funcionales y radicales que acompañan a los carbonos alifáticos pierden el oxígeno de su estructura, este pasa a formar parte (la mayoría de las veces) de las nuevas cadenas aromáticas, aumentando así las reacciones de aromaticidad y por ende las cadenas de los grupos funcionales y radicales aromáticos. Con base en lo anterior se determinó que:

A. Los carbonos alifáticos pierden principalmente el grupo  $\text{CH}_2$  junto a un grupo alquilo,  $\text{CH}_3$  en hidroaromáticos y anillos naftalénicos, ubicados en el intervalo de desplazamiento químico de 22.5-24 ppm, disminuyendo a su vez los siguientes radicales y grupos funcionales con el aumento de la maduración termal de los mantos de carbón:

- $\text{CH}_3$  ó  $\alpha$ -  $\text{CH}_3$  alejados de anillos aromáticos por dos anillos o grupos adyacentes, ubicados en el intervalo de desplazamiento químico de 11-15ppm..
- $\beta$ -  $\text{CH}_3$  en grupos etil, ubicado en el intervalo de desplazamiento químico de 15 a 18ppm.
- $\alpha$ -  $\text{CH}_3$  no protegido por ningún anillo o grupo, ubicado en el intervalo de desplazamiento químico de 20.5 a 22.5ppm.
- Anillos unidos de metileno  $\text{CH}$  en grupos alquilos y anillos naftalénicos;  $\text{CH}_2$  en grupos alquilos adyacentes a  $\text{CH}$ , ubicados en el intervalo de desplazamiento químico de 37 a 60ppm.

B. Los carbonos aromáticos ganan grupos funcionales con el aumento de la maduración termal de los mantos, aumentando las reacciones de aromaticidad en los siguientes grupos:

- Aromáticos ortho C-H a C-OH, ubicados en el intervalo de 100-129.5 ppm.

- Aromáticos de enlace simple C-C y aromáticos C-NH, ubicados en el intervalo de 129 a 148 ppm.
- Aromáticos C-O, ubicados en el intervalo de desplazamiento químico de 148 a 168 ppm.

### **PARA LA SECCIÓN DE TUNJA- VILLA DE LEYVA:**

Se determino que las muestras de shales y calizas de las Formaciones: Paja, San Gil Superior, Churuvita, San Rafael, y Miembro Cucaita, en la sección de Tunja-Villa de Leyva, presentan un kerógeno tipo III, de acuerdo con los resultados de la petrografía óptica y de los índices de hidrogeno (IH) y oxígeno (IO), calculados mediante la pirolisis rock eval.

Se estableció que las Formaciones de la sección de Tunja- Villa de Leyva son rocas potencialmente generadoras, pero inmaduras termalmente, con base en los análisis de reflectancia de vitrinita (Ro) y Tmax mediante la pirolisis rock eval.

Se determino la evolución estructural de la molécula de kerógeno presente en las muestras de shales de la Formación San Gil Superior y del Miembro Cucaita, en la sección Tunja- Villa de Leyva, durante el proceso de maduración termal, encontrándose que las reacciones de aromaticidad aumentan casi en un 100% hacia la base de las formaciones.

### **PARA LAS DOS SECCIONES**

Se establecieron tres ecuaciones con los datos obtenidos mediante las técnicas resonancia magnética nuclear (RMN), análisis proximal de carbones para la

materia volátil y pirolisis rock eval con el Tmax (ver anexo I.), con las cuales se puede hallar el Ro calculado para cada una de las secciones de estudio, así:

- $Ro_{\text{Calculado}} = -0.0333 (M.V) + 2.065$
- $Ro_{\text{Calculado}} = -2.5914 (RMN) + 2.9351$
- $Ro_{\text{Calculado}} = 0.0157(Tmax) - 6.1919$

Donde:

Ro: Reflectancia de vitrinita.

M.V: Materia volátil.

RMN: Equivale a los valores del factor de aromaticidad.

Tmax: Equivale a la Temperatura máxima medida durante la pirolisis rock eval.

El Ro calculado mediante las ecuaciones anteriormente nombradas, es un valor verídicamente confiable debido a que concuerda con los valores de Ro medidos en esta investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

1. BEHAR F.<sup>1</sup>, Vandenbroucke M. <sup>1</sup> y Tang<sup>2</sup>, Marquis F. and Espitalie (1997), Thermal cracking of kerogen in open and closed systems: determination of kinetic parameters and stoichiometric coefficients for oil and gas generation, *Org. Geochem*, Vol.26, N°26, N°5/6, p 321-339.
2. BUENO L. y Moreno M. (2005), Estudio de la estratigrafía, petrografía y geoquímica de la ocurrencia de carbones coquizables de la formación Guaduas en la cuenca de Bogotá; Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Tesis de proyecto de grado; Biblioteca inventario N°117975.
3. BUSTIN R.M., Guio Y., (1999), Abrupt change (jumps) in reflectance values and chemical compositions of artificial charcoals and inertinite in coals, *International Journal of Coal Geology* 38, p. 237-260.
4. COOPER M.A.<sup>2</sup>, Addison F.T. <sup>3</sup> , ALVAREZ R. <sup>3</sup> , Coral M. <sup>3</sup>, Graham R.H. <sup>3</sup> , Hayward A.B. <sup>3</sup> , Howe S. <sup>3</sup> , Martinez J. <sup>3</sup> , Naar J. <sup>3</sup> , Peñas R. <sup>3</sup> , Pulham J. <sup>3</sup> , and Toborda A. <sup>3</sup> , Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia, *AAAPG Bulletin*, V.79, N°10 (October 1995), p. 1421-1443.
5. CORTES Y. y JIMÉNEZ M. (2007). Estudio de la Geoquímica de los yacimientos de gas asociado a carbón en la cuenca de Bogotá; Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología; Tesis de grado; Biblioteca N°122564.

6. ESPITALIÉ J.(1992) and Marquis F. (1985). La pirolyse roc-éval et ses applications, deuxième partie: Revue de l'institute du Petrole, Vol 40, p. 755-784.
7. ETAYO F. (1968). Sinopsis estratigráfica de la región de Villa de Leyva y zonas próximas, Boletín de Geología, N°21, pág 19-32.
8. FABRE, A. (1983<sup>a</sup>), 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.
9. FABRE, A. (1983<sup>b</sup>), 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.
10. GARCIA GONZÁLEZ Mario, MacGowan Donald B. y Surdam Ronald C, (1992) Coal as a Source Rock of Petroleum and Gas –A comparison Between Natural and Artificial Maturation of the Almond Formation Coals, Greater Green River Basin in Wyoming, The Future of Energy Gases, U.S. Geological Survey Professional Paper 1570, p. 405-436.
11. J.R. Harmer, T.G. Callcott, M. Maeder\*, B.E. Smith (2001), A rapid coal characterisation analysis by low-resolution RMN spectroscopy and partial least-squares regression, Department of chemistry, The University of Newcastle, Callaghan, NSW 2308, Australia, Elsevier, Fuel 80(2001), p 1341-1349.
12. KAMMER Andreas (1997), Los pliegues del Sinclinal de Tunja. Análisis estructural y modelamiento geométrico, Geología Colombiana, vol22, p 3-25.

13. MEISSNER F.F (1989) en Garcia González Mario, MacGowan Donald B. y Surdam Ronald C, (1992), Coal as a Source Rock of Petroleum and Gas –A comparison Between Natural and Artificial Maduration of the Almond Formation Coals, Greater Green River Basin in Wyoming, The Future of Energy Gases, U.S. Geological Survey Professional Paper 1570, p. 405-436.
14. MIKNIS, F.P., Sullivan, M., Bartuska, V.J., y Maciel, G.E., (1981), Cross-polarization magic angle spinning  $^{13}\text{C}$  NMR spectra of coals of varying rank: Organic Geochemistry, V.3, p. 19-28.
15. RINCÓN L. y Rocha A. (2007). Estratigrafía de secuencias de la Formación Guaduas en la cuenca de Bogotá, Colombia, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
16. ROSS J.V. y Bustin R.R. (1997), Vitrinite anisotropy resulting from simple shear experiments at high temperature and high confining pressure, International Journal of Coal Geology 33, p 153-168.
17. STÉPHANE G., Patrice R, Jean-Jacques D., Jean C.\* and Patrice V. (1981), Quantitative Carbon-13 and proton nuclear magnetic resonance spectroscopy of crude oil and petroleum products. I. Some rules for obtaining a set of reliable structural parameters, Laboratoire de Chimie Physique Organique, ERA CNRS 222, Université de Nancy I, CO 140.54037 Nancy Cedex, France, Vol 60, p 221-225.
18. STÉPHANE G., Patrice R., Jean-Jacques D., Jean-C.\* and Patrice V. (1981), Quantitative Carbon-13 and proton nuclear magnetic resonance spectroscopy of crude oil and petroleum products. II. Average structure parameters of representative samples, Laboratoire de Chimie Physique Organique, ERA

CNRS 222, Université de Nancy I, CO 140.54037 Nancy Cedex, France, Vol 60, p 226-230.

19. TOUSSAINT J. (1996 y 1999), Evolución geológica de Colombia, Universidad Nacional de Colombia, p.227-242.

20. VANDENBROUCKE M <sup>a\*</sup>, Largeau C.<sup>b</sup> (2007), Kerogen origin, evolution and structure, Organic Geochemistry 38, p 719-833.

21. VAN KREVELEN D.W .(1993). Coal, Typology-Physics-Chemistry-Constitution, third edition, ELSEVIER,p.293-232.

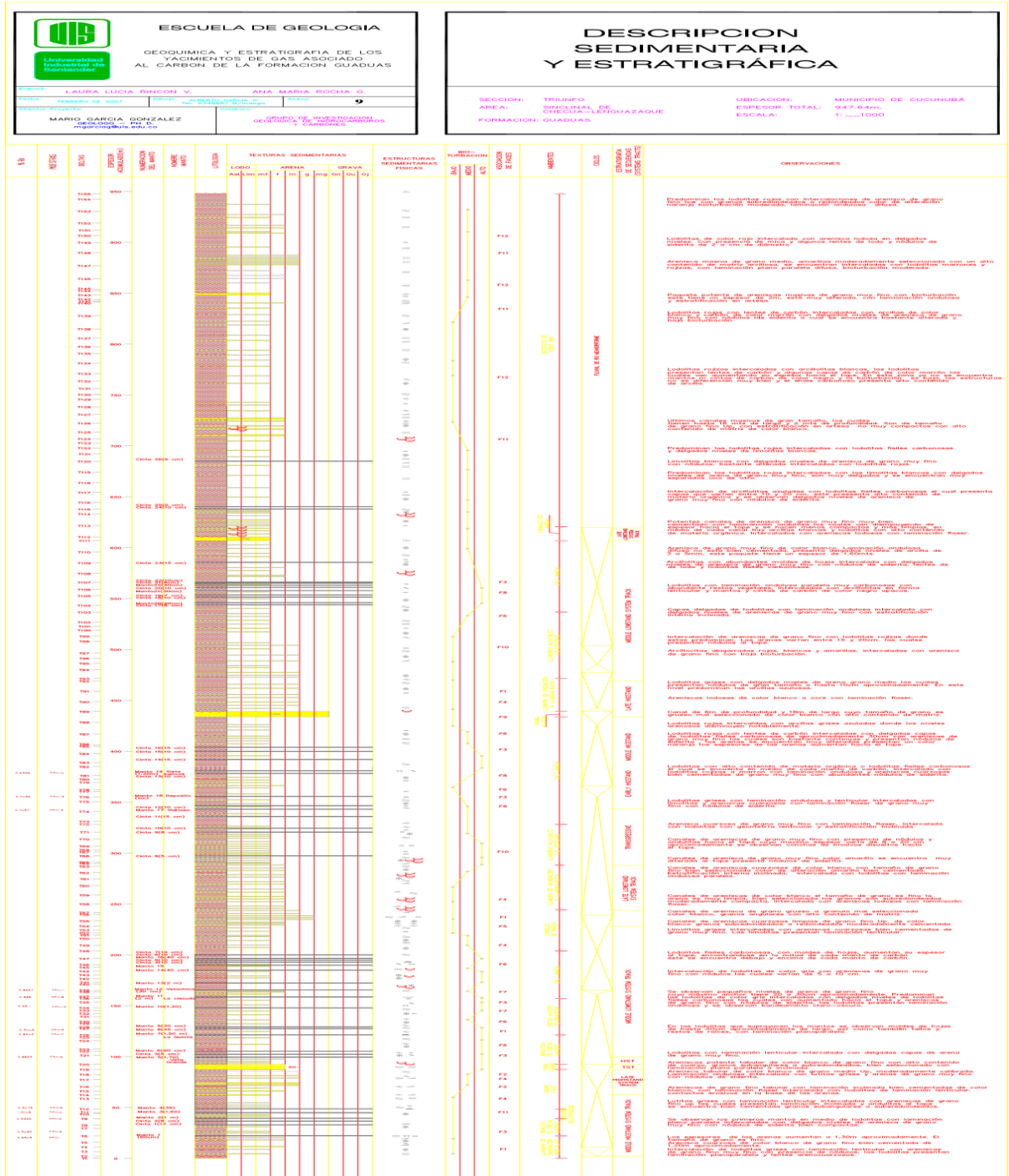
22. WERNER ULRIKE-ZWANZIGER<sup>A\*</sup>, Lis Grzegorz <sup>b</sup>, Mastalerz Maria. <sup>c</sup>, Schimmelmann Arndt <sup>b</sup> (2005), Thermal maturity of type II kerogen from the New Albany Shale assessed by <sup>13</sup>C CP/MAS NMR, Solid State Nuclear Magnetic Resonance 27, p 140-148.

# **ANEXOS**



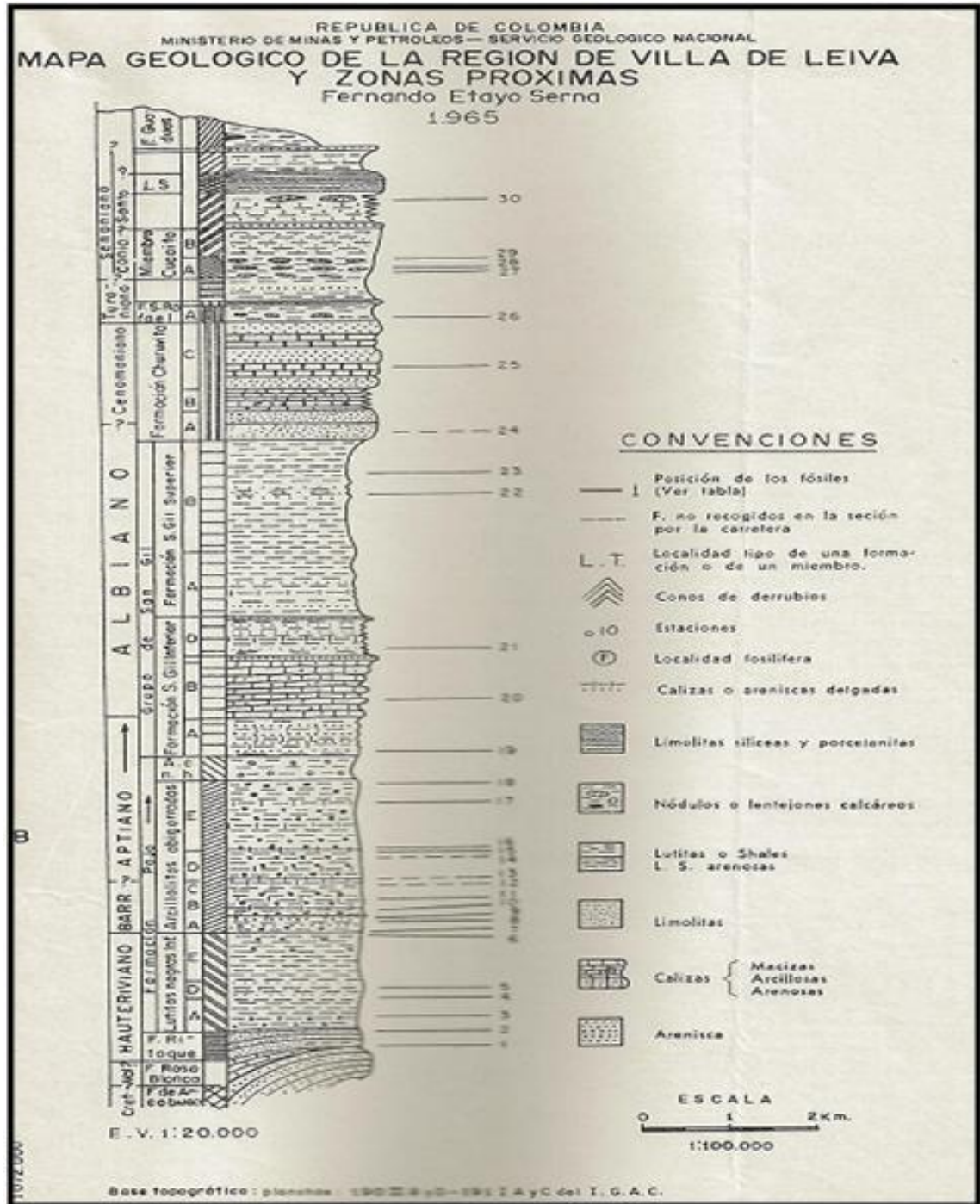


# Anexo C. Columna Estratigráfica de la Formación Guaduas en la Sección del Triunfo, en el Departamento de Cundinamarca, Colombia.



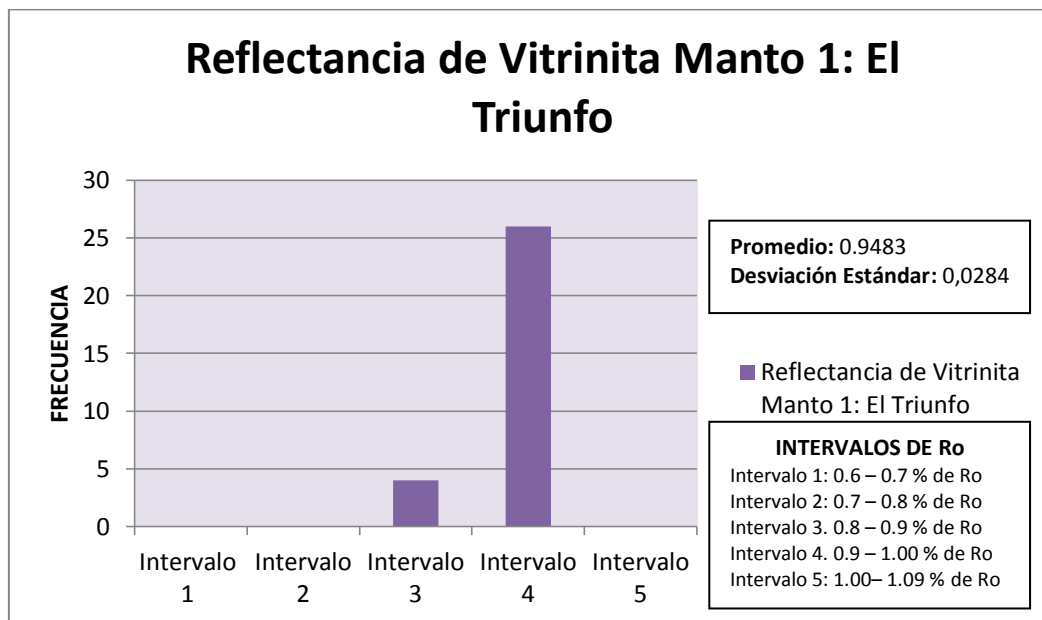
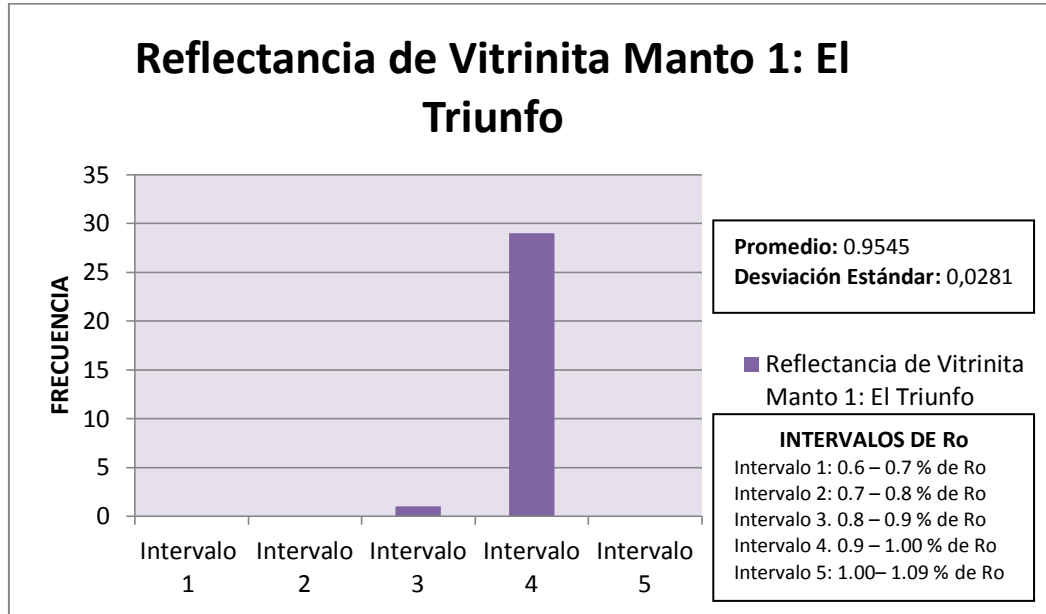
Fuente: Modificada de Rincón L. y Rocha A. 2007.

**Anexo D. Columna Estratigráfica de la Sección de Tunja- Villa de Leyva, en el Departamento de Boyacá, Colombia.**

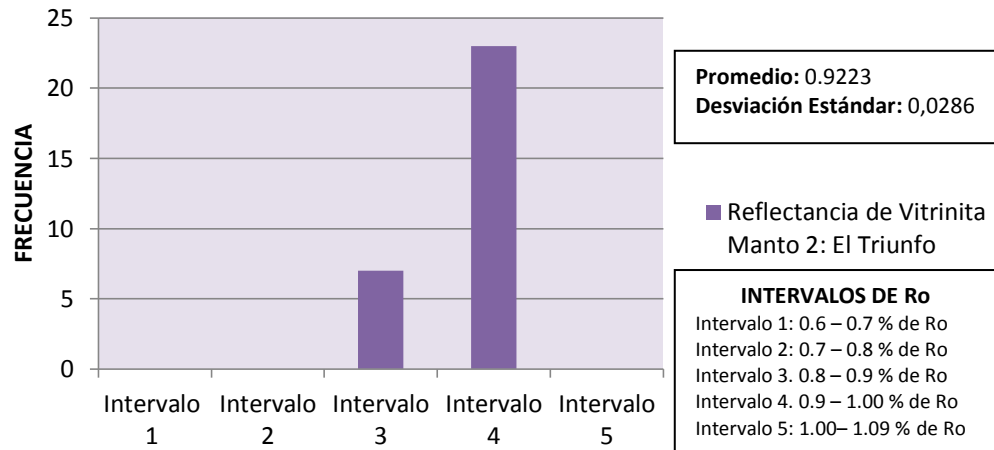


Fuente: Tomada de Etayo F., 1968. Sinopsis estratigráfica de la región de Villa de Leyva y zonas próximas, Boletín de Geología, N°21, pág 19-32.

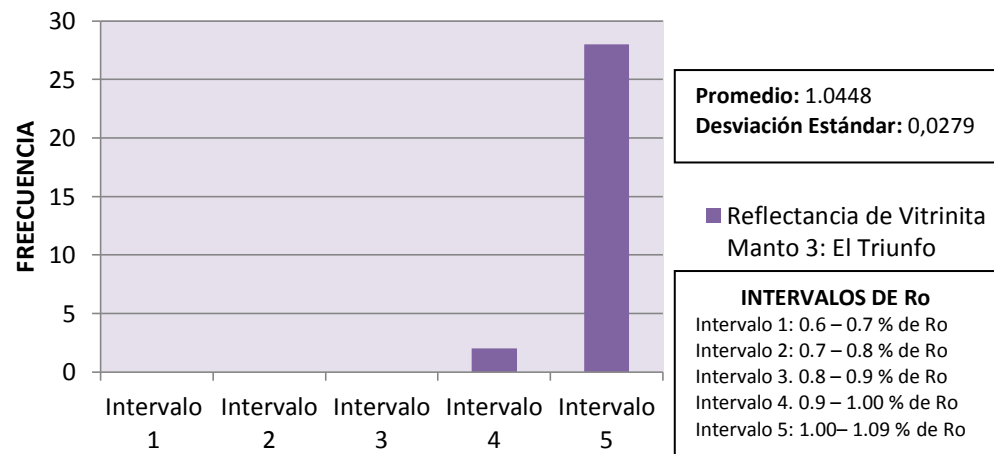
**Anexo E. Histogramas de Frecuencias de Acuerdo con los Resultados de las  
Medidas Estadísticas de Relectancia de Vitrinita (%ro) para la Sección del  
Triunfo.**



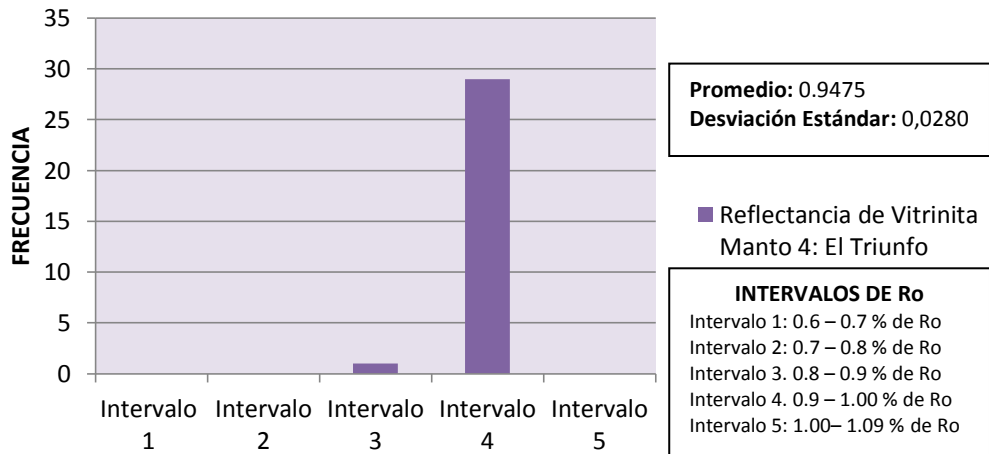
## Reflectancia de Vitrinita Manto 2: El Triunfo



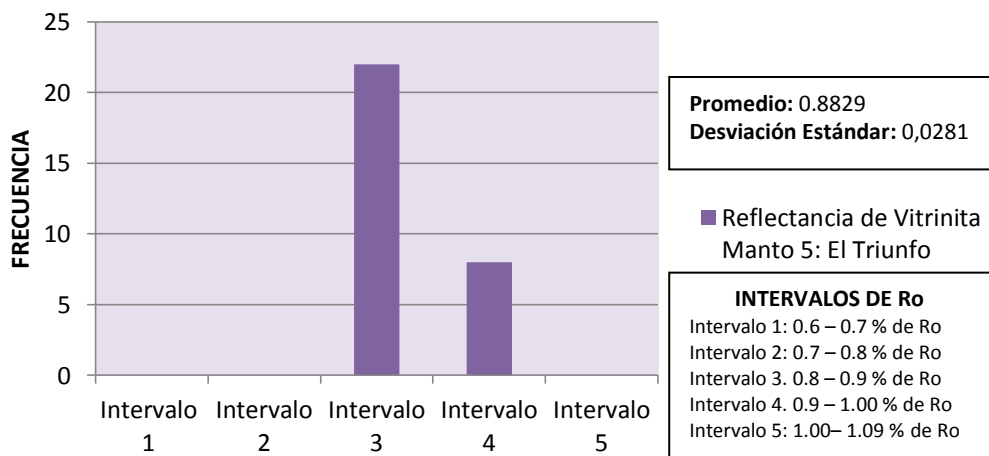
## Reflectancia de Vitrinita Manto 3: El Triunfo



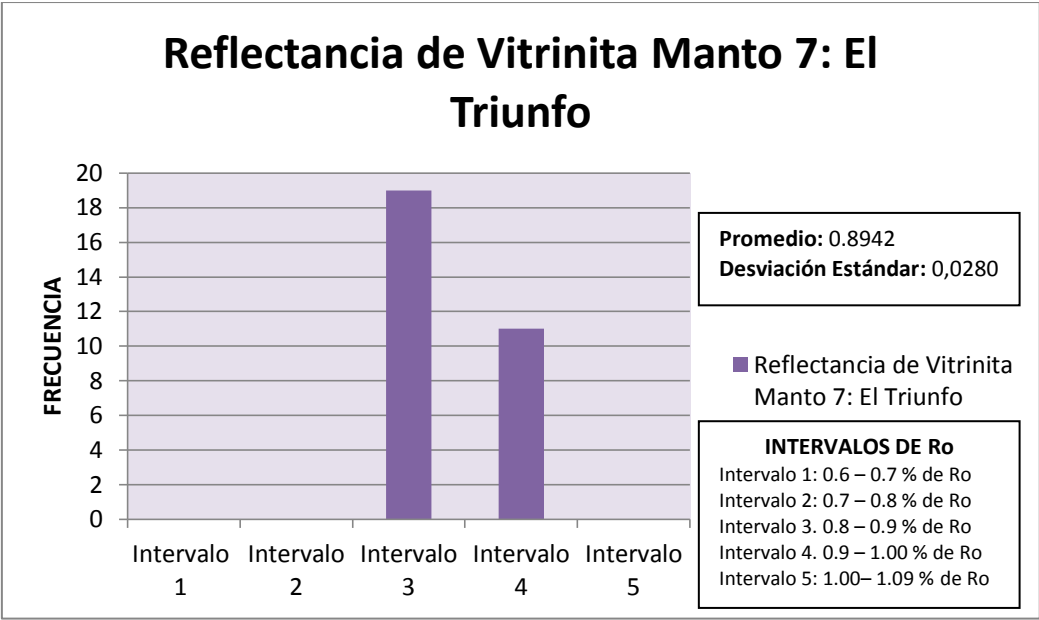
### Reflectancia de Vitrinita Manto 4: El Triunfo



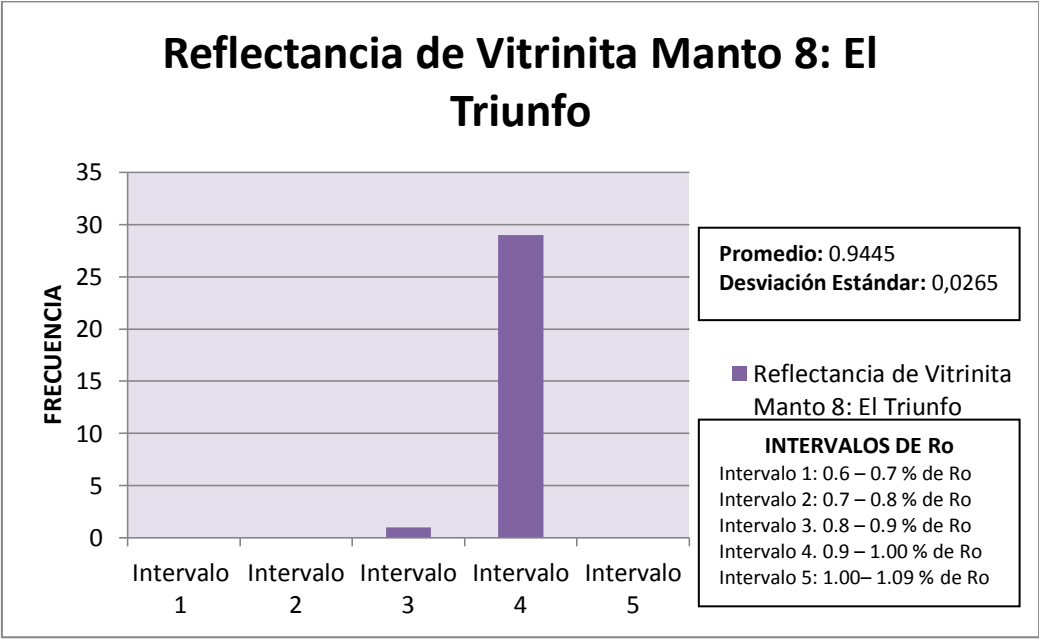
### Reflectancia de Vitrinita Manto 5: El Triunfo



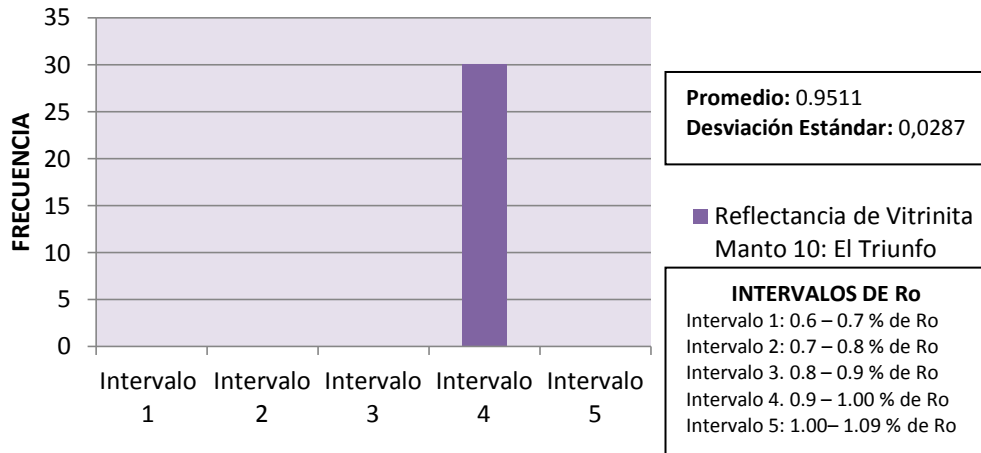
### Reflectancia de Vitrinita Manto 7: El Triunfo



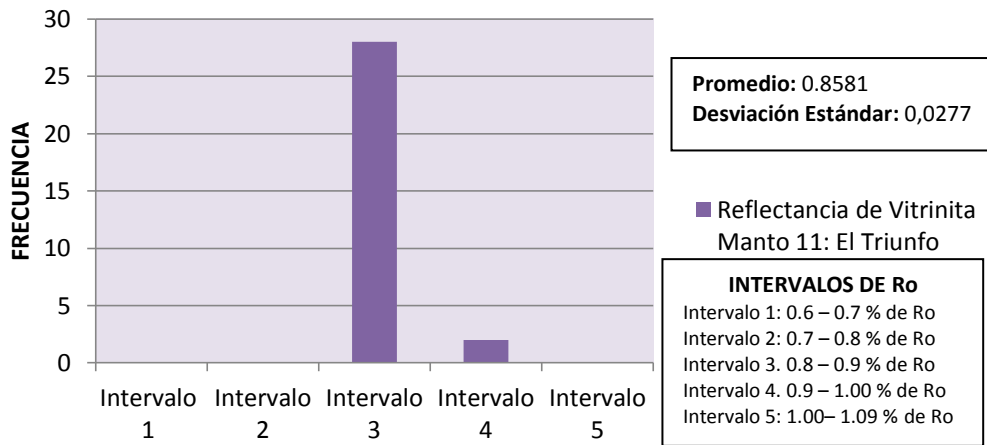
### Reflectancia de Vitrinita Manto 8: El Triunfo



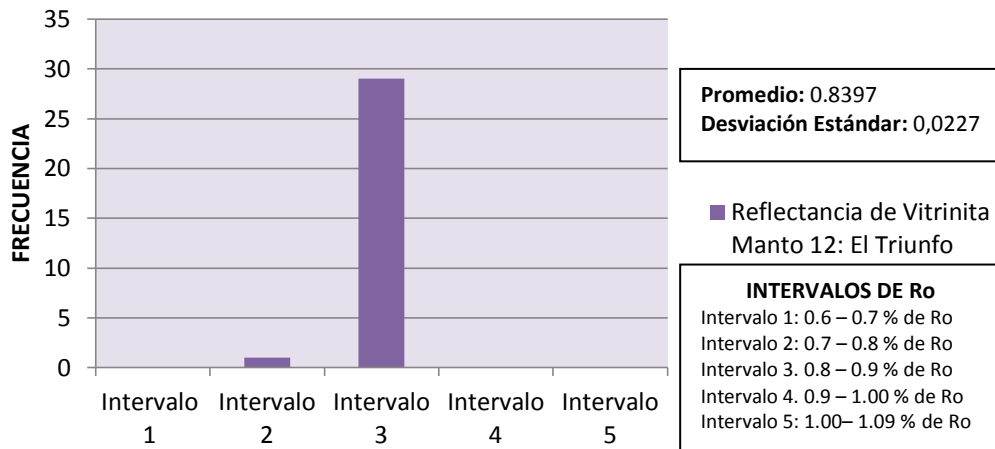
## Reflectancia de Vitrinita Manto 10: El Triunfo



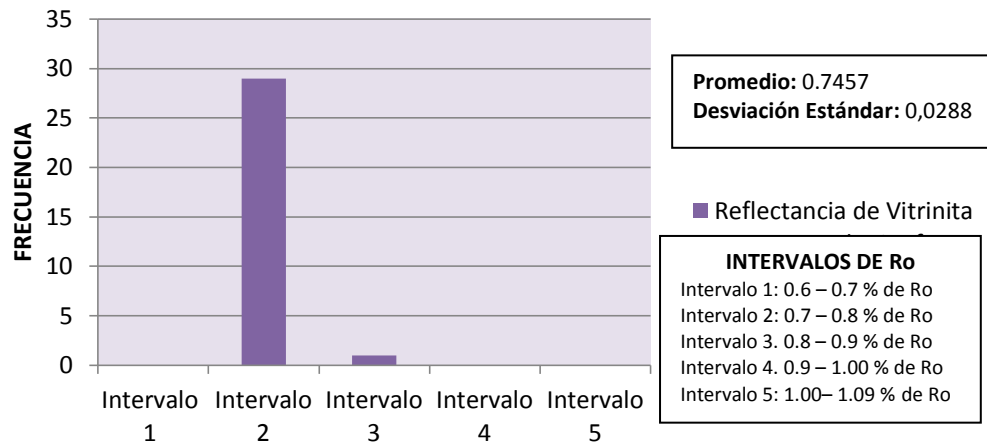
## Reflectancia de Vitrinita Manto 11: El Triunfo



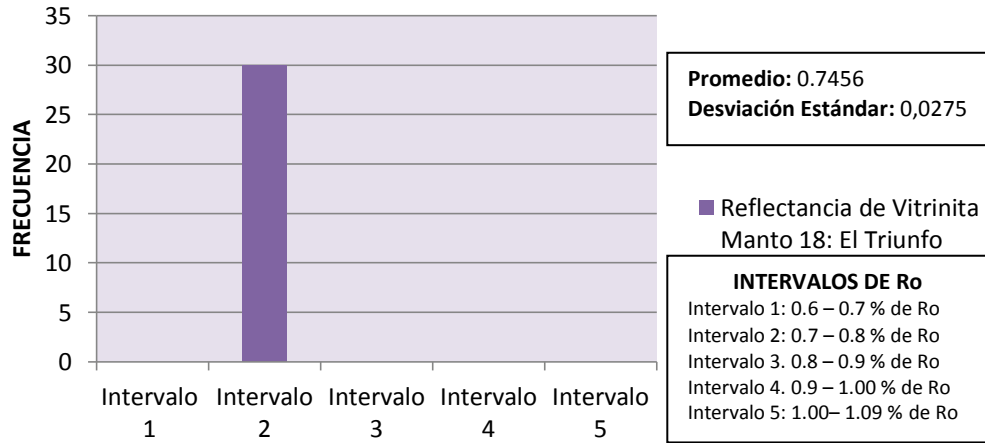
### Reflectancia de Vitrinta Manto 12: El Triunfo



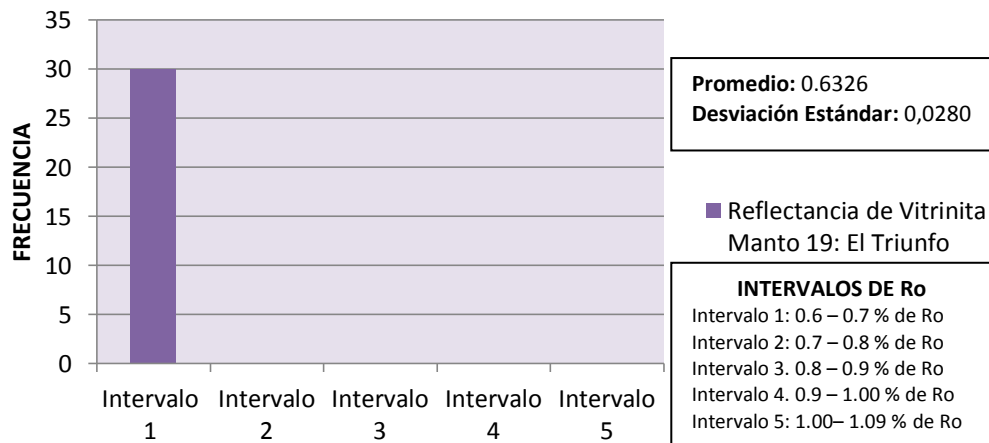
### Reflectancia de Vitrinta Manto 17: El Triunfo



## Reflectancia de Vitrinita Manto 18: El Triunfo

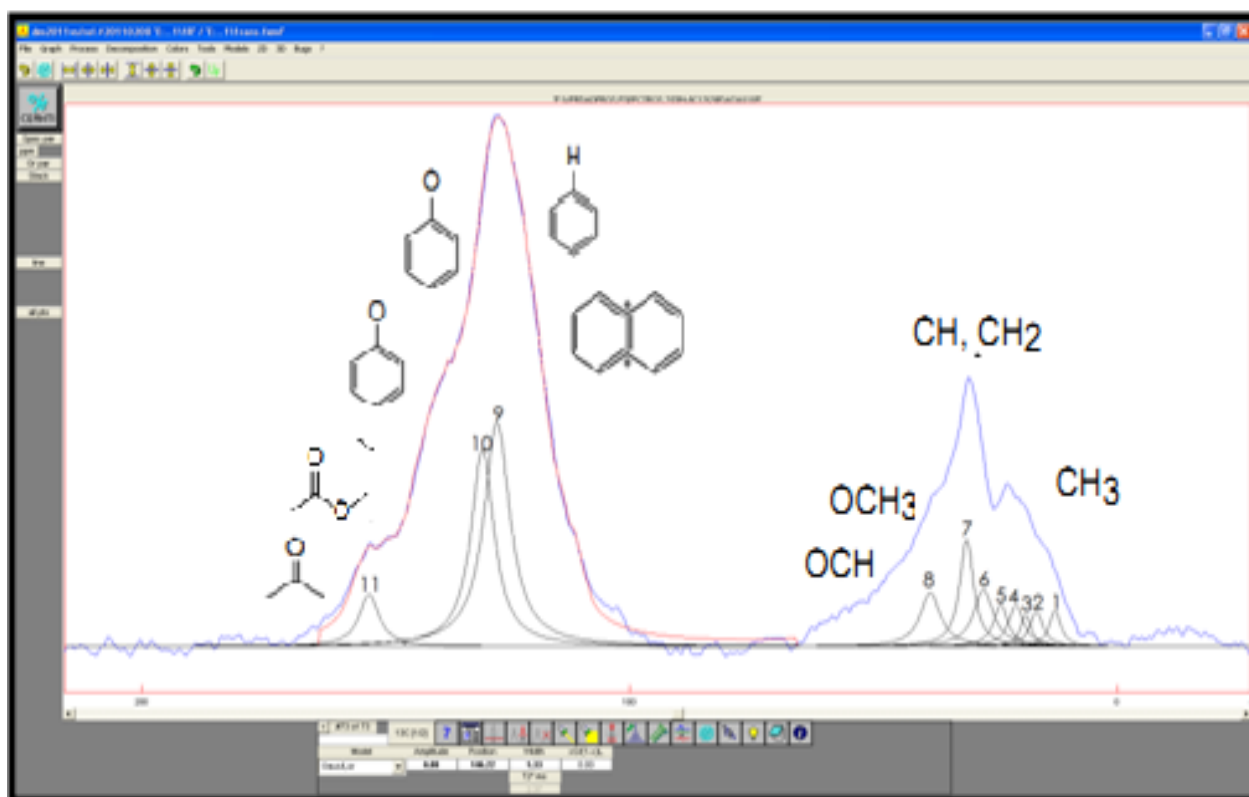


## Reflectancia de Vitrinita Manto 19: El Triunfo

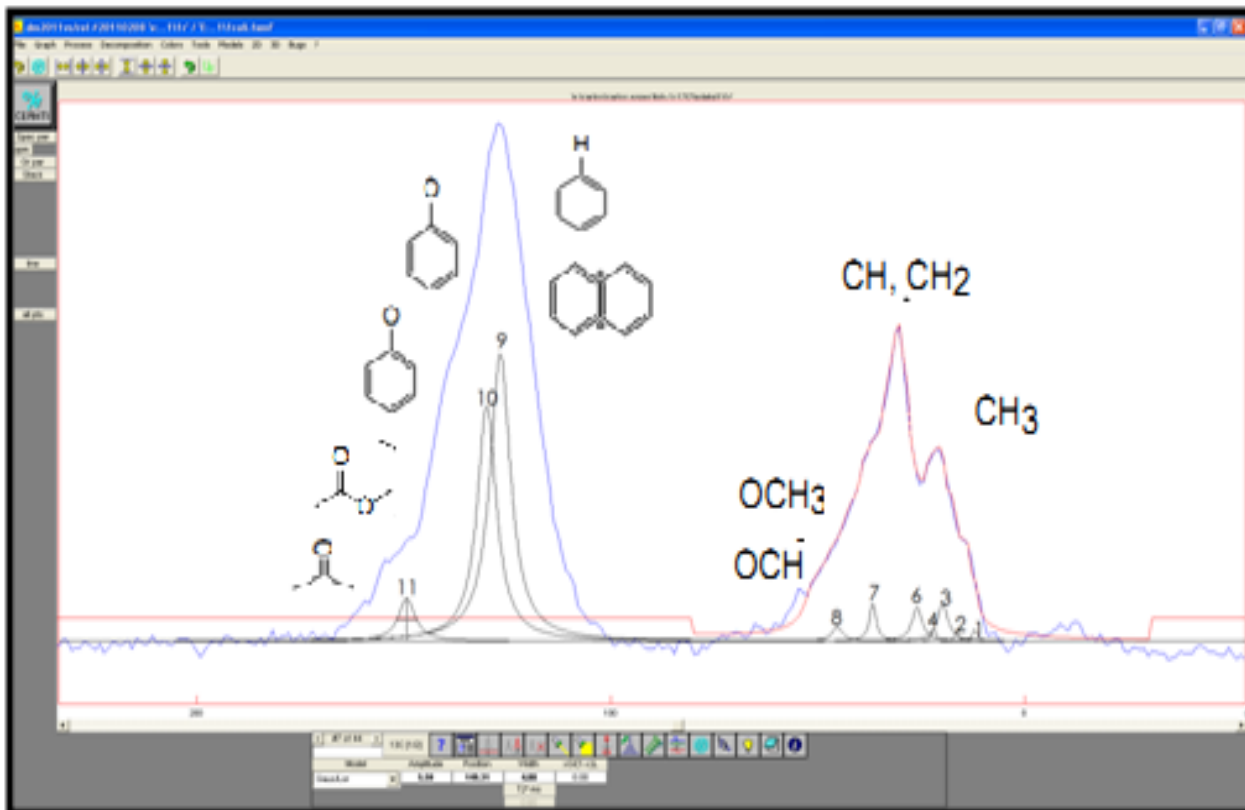


**Anexo F. Ejemplos del Tratamiento de Deconvolución de los Espectros Obtenidos de Resonancia Magnética Nuclear, para dos Muestras de los Mantos de Carbón de la Sección del Triunfo, con Diferente grado de Maduración Termal, Mediante el Programa DMFIT de la Universidad D'orleans de Francia**

Muestra del Manto 8, con un grado de maduración termal intermedio de acuerdo con los resultados de los Porcentajes de Ro.



Muestra del Manto 1, con el grado de maduración termal más elevado de esta sección de acuerdo con los resultados de los Porcentajes de Ro.

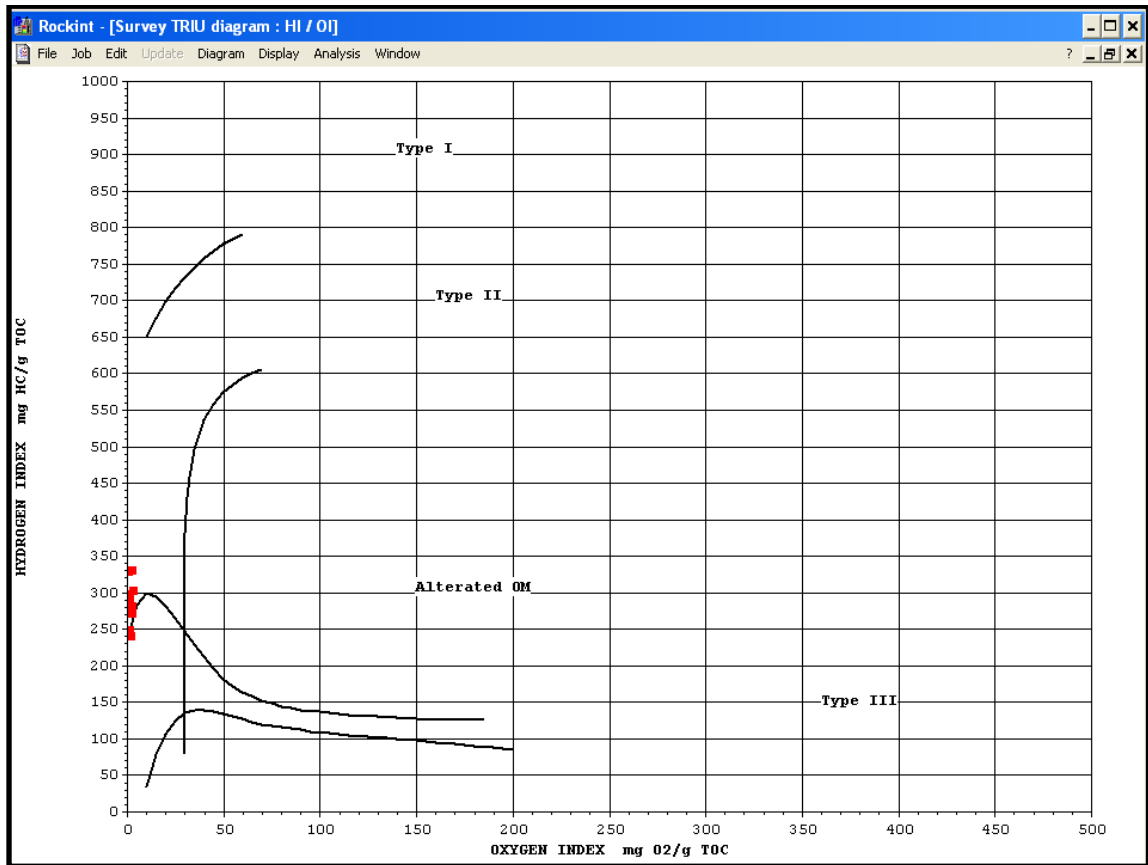


Donde cada pico enumerado corresponde a:

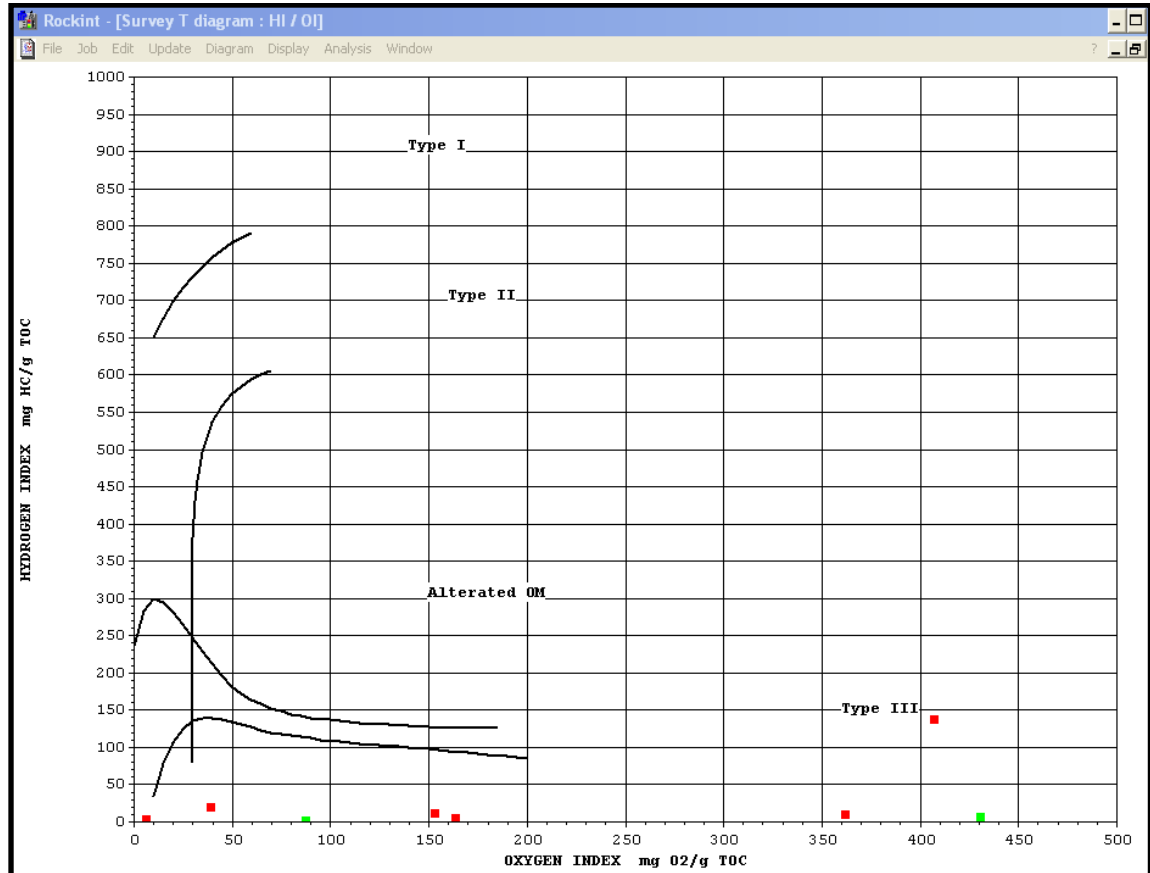
1.  $\text{CH}_3$  ó  $\alpha\text{-CH}_3$  alejados de anillos aromáticos por dos anillos o grupos adyacentes, en el intervalo de 11-15 ppm.
2.  $\beta\text{-CH}_3$  en grupos etilo, en el intervalo de 15-18 ppm.
3.  $\alpha\text{-CH}_3$  protegido por un anillo o grupo adyacente, en el intervalo de 18-20.5 ppm.
4.  $\alpha\text{-CH}_3$  no protegido por ningún anillo o grupo, en el intervalo de 20.5-22.5 ppm.
5.  $\text{CH}_2$  junto a un grupo alquilo,  $\text{CH}_3$  en hidroaromaticos y anillos naftalenicos, en el intervalo de 22.5-24 ppm.

6. CH<sub>2</sub> naftalénico, protegido por grupos  $\alpha$ -CH<sub>2</sub> y grupos propilo,  $\beta$ - CH<sub>3</sub> en grupos isopropilos, en el intervalo de 24-27.5 ppm.
7. CH<sub>2</sub> en grupos alquilos, CH<sub>2</sub> unidos a anillos del grupo etileno,  $\alpha$ -CH<sub>2</sub> y CH,  $\beta$ -CH en anillos hridroaromaticos; naftalénicos CH<sub>2</sub>, en el intervalo de 27.5-37 ppm.
8. Anillos unidos de metileno en el intervalo 32-43 ppm; CH en grupos alquilos y anillos naftalénicos; CH<sub>2</sub> en grupos alquilos adyacentes a CH, en el intervalo de 37-60 ppm.
9. Aromáticos C-H, en el intervalo de 100-129.5 ppm con aromáticos ortho C-H a C-OH entre 100-115 ppm.
10. Aromáticos de enlace simple C-C y aromáticos C-NH, en el intervalo de 129 - 148 ppm.
11. Aromáticos C-O, en el intervalo 148-168ppm

**Anexo G. Clasificación del Kerógeno Presente en los Mantos de Carbón de la Sección del Triunfo de Acuerdo con su Grado de Maduración Termal, Mediante Pirolisis Rock Eval.**



**Anexo H. Clasificación del Kerógeno Presente en las Muestras de Shales y Calizas de la Sección de Tunja-Villa de Leyva de Acuerdo con su Grado de Maduración Termal, Mediante Pirolysis Rock Eval.**



Anexo I. Gráficas de Ro con Respecto a las Sigüientes Variables: Materia Volatil (M.V), Reflectancia de Vitrinita (Ro) y Pirolisis Rock Eval (TMax)

