

**NUEVAS CONSIDERACIONES ACERCA DEL ESTADO DE MADUREZ
TERMAL DE LA FORMACIÓN LA LUNA EN EL VALLE MEDIO DEL
MAGDALENA, COLOMBIA.**

HUMBERTO CARVAJAL ORTIZ

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

2004



**NUEVAS CONSIDERACIONES ACERCA DEL ESTADO DE MADUREZ
TERMAL DE LA FORMACIÓN LA LUNA EN EL VALLE MEDIO DEL
MAGDALENA, COLOMBIA.**

HUMBERTO CARVAJAL ORTIZ

Tesis de grado para optar al título de Geólogo

DIRECTOR

MARIO GARCIA GONZALEZ

Geólogo Ph.D.

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

2004



DEDICATORIA

Lo plasmado en esta hoja son solo palabras, que para el lector común parecerán como cualquier dedicatoria, para otros como palabras sin sentido y sin vida y eso son, pues no hay forma de que les pueda devolver sus lagrimas, trasnocho y soplos de vida a quienes me han dado todo y de expresarles cuanto los quiero y que seria capaz de morir por ellos en retribución a su amor,..., pero lo intentaré.

A mi madre, Quién ha sido el único ser que durante mi existencia en esta vida ha confiado siempre de lo que soy capaz de hacer, incluso mucho más que yo mismo y que nunca me ha dejado de querer. Gracias mamá.

A mis abuelos Humberto y Francisca, Quienes junto con mi madre sudaron sangre para que nada nos faltara a mi hermana y a mí y para que yo este hoy escribiendo estos fragmentos. Gracias abuelitos.

A mi hermana Ruth Adriana, Quien ha sido para mí además de una gran amiga, como la caballería lo era para las tropas en batallas casi perdidas. Gracias Ruth.

A Juan Manuel padre e hijo, Quienes con su inocencia, nobleza y simplicidad me enseñaron a ser libre,..., por fin. Gracias pequeña familia.

A mi familia en general.

A Mario garcía, mi mentor y guía intelectual, gracias por toda la confianza.

A Arwen, Mi estrella de la tarde, mi musa, por que estas casi tan loca como yo, gracias por darme la oportunidad de creer en el amor de nuevo y de enseñarme a ser humano. Te quiero mucho.

Que Dios nunca les aparte su amor y que los tenga siempre en su gloria, por que yo quisiera tenerlos siempre en la mía.



AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Grupo de investigación en Geología de hidrocarburos y Carbones, por el préstamo de los equipos empleados en este proyecto.

Corporación Geológica ARES, por su apoyo económico, vital para la consecución de los resultados obtenidos.

Mario García González, Geólogo Ph.D. y director de la investigación por su constante aporte de ideas y sugerencias, además de su apoyo incondicional.

Michael Lewan, Geólogo Ph.D., por su aporte crítico e interesantes discusiones, claves en el desarrollo de la investigación.



CONTENIDO

RESUMEN

1. INTRODUCCION

1.1 Planteamiento del Problema

1.2 Estudios Anteriores

1.3Objetivos

1.4 Localización

2. METODOLOGIA

2.1 Selección de Muestras

2.2 Análisis de Laboratorio

2.3 Descripción Petrográfica de Muestras

2.4 Petrografía Orgánica del Kerógeno

2.5 Reflectancia de Vitritina (Ro)

2.6 Carbono Orgánico Total (COT)

2.7 Azufre Total

2.8 Experiencias de Hidropirólisis

2.9 Cromatografía de Gases

3. MARCO GEOLÓGICO

4. RESULTADOS

4.1 Análisis Facial de la Formación La Luna

4.2 Petrografía Orgánica

4.2.1 *Análisis de la Materia Orgánica*

4.2.2 *Análisis de la M.O. Sometida a Hidropirólisis*



4.3 Carbono Orgánico Total y Azufre Total

4.4 Reflectancia de Vitrinita

4.5 Cromatogramas

4.6 Tmax e IH

4.7 Hidropirólisis (HP)

4.7.1 Productos Obtenidos en la H.P.

4.7.2 Cuantificación de Gases Generados

4.7.3 Moles de Gas Hidrocarburo Generado (C1-C5)

5. INTERPRETACION Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Paleoambiente Depositional de la Formación La Luna.

5.2 Problemas en la identificación de partículas de kerógeno tipo III en la formación La Luna.

5.3 Supresión de Reflectancia de Vitrinita en la Formación La Luna

5.4 Madurez Termal de la formación La luna

6. CONCLUSIONES

7. REFERENCIAS CITADAS

ANEXOS



LISTADO DE TABLAS

- Tabla 1** **Relación de los análisis realizados y la cantidad de muestras**
- Tabla 2** **Análisis de Carbono Orgánico Total Carbono Total Y Azufre Total Para las Muestras de la Formación La Luna**
- Tabla 3** **Número de moles totales generadas en cada experiencia de HP**
- Tabla 4** **Moles De Hidrocarburos Gaseosos Generados en la HP de la Formación La Luna**



LISTADO DE FIGURAS

- Figura 1** *Mapa de localización de la sección Lebrija, departamento de Santander*
- Figura 2** *Microscopio de luz reflejada Carl Zeiss*
- Figura 3** *Analizador Leco SC-144DR*
- Figura 4** *Reactor de presión Parr 4680*
- Figura 5** *Columna estratigráfica del VMM*
- Figura 6** *Borings*
- Figura 7** *Bolivinoide y Ortokarslenoide con cámaras rellenas de aceite.*
- Figura 8** *Bolivinoide con las cámaras rellenas de M.O.*
- Figura 9** *Globigerinoides en matriz de textura fina*
- Figura 10** *Morfologías Heterohelix*
- Figura 11** *foraminíferos bentónicos reemplazados por calcita*
- Figura 12** *Bioclastos*
- Figura 13** *partículas vitrinoides en intercrecimiento con calcita*
- Figura 14** *M.O. fluorescente de origen liptinitico*
- Figura 15** *Intercrecimientos de calcita con vitrinoides*
- Figura 16** *Pirita framboidal generada dentro de una partícula vitrinoide*
- Figura 17** *Foraminífero con las cámaras de su conchula rellenas de M.O. fluorescente*
- Figura 18** *M.O.A. fluorescente en el residuo sólido a 290°*
- Figura 19** *Partícula de inertinita de gran tamaño*
- Figura 20** *Partículas de inertinita esparcidas sobre la matriz mineral*



- Figura 21** Distribución espacial de % De COT en la sección de la Q. La sorda
- Figura 22** Distribución del contenido de azufre dentro de la sección de la Q. La Sorda
- Figura 23** Tendencias de %Ro de la formación La Luna en la sección de la Q. La Sorda
- Figura 24** Histograma de la distribución de Ro de la formación La Luna en la sección de la Quebrada La Sorda
- Figura 25** Histograma de distribución de Ro en los 3 miembros de la formación La Luna en la sección de la Quebrada La Sorda
- Figura 26** Histograma de distribución de Ro en los mantos de Carbón y shale carbonoso de las mediciones realizadas a la formación Umir en la sección de la Quebrada Mata de Cacao
- Figura 27** Histograma de distribución de Ro en el residuo sólido de la experiencia de Hidropirólisis a290°C realizada a la formación La Luna en la sección de la Quebrada La Sorda
- Figura 28** Histograma de distribución de Ro en el residuo sólido de la experiencia de Hidropirólisis a360°C realizada a la formación La Luna en la sección de la Quebrada La Sorda
- Figura 29** Cromatograma de la mezcla de gases obtenida en la HP para la formación La Luna en la sección de La Sorda
- Figura 30** Tendencias de los valores de Tmax par las muestras de la formación La Luna en la sección de la Quebrada La Sorda



- Figura 31** Distribución de los valores de IH para la formación La Luna, sección de la quebrada La Sorda
- Figura 32** Moles De Hidrocarburos Gaseosos Generados En La HP De La Formación La Luna
- Figura 33** Heterohelix reemplazado completamente por calcita
- Figura 34** Lituolaceos con contenido de M.O.A. Fluorescente dentro de las cámaras de sus conchulas
- Figura 35** pirita reemplazando a foraminíferos planctónicos y pirita framboidal dentro de un vitrinoide
- Figura 36** Ambiente de deposito de la formación La Luna, sección la Sorda
- Figura 37** Vitrinoides intercrecidos con calcita
- Figura 38** Histograma perteneciente al primer manto de carbón de la formación Umir
- Figura 39** Diagrama de modelo de corrección de valores de Ro
- Figura 40** Diagrama de tendencia de los valores de Ro corregidos para la sección de La Sorda
- Figura 41** Mapa de madurez termal de la formación La Luna y formaciones equivalentes
- Figura 42** Esquema estructural y valores promedio de Ro para el VMM y el flanco occidental de la cordillera oriental
- Figura 43** *Mapa de madurez termal corregida de la formación La Luna en el VMM*
- Figura 44** Distribución de Ro, Rocooregida, IH, y Tmax en los 3 miembros de la sección de la Quebrada La Sorda





RESUMEN

TITULO: Nuevas Consideraciones Acerca Del Estado De Madurez Termal De La Formación La Luna en el Valle Medio Del Magdalena, Colombia*.

AUTOR: Humberto Carvajal Ortiz **

PALABRAS CLAVES: Formación La Luna, Madurez Termal, Reflectancia de Vitrinita, Supresión de Reflectancia de Vitrinita, Hidropirólisis.

Los análisis de madurez termal realizados sobre la formación La Luna, (VMM), han empleado a la Reflectancia del maceral vitrinita como principal parámetro de madurez termal, sin consideración de los múltiples problemas que presenta este indicador (supresión de Reflectancia, meteorización, ambiente de depósito, etc.). Consecuentemente, es frecuente hacer interpretaciones erradas de cocinas de generación de petróleo en una cuenca.

Las muestras de roca, analizadas de la sección de la quebrada La Sorda, en cercanías al municipio de Lebrija, Santander, Colombia, donde afloran los tres miembros de esta formación (Salada, Pujamana y Galembó), presentan fenómenos de supresión de la Ro.

Iniciando con un estudio petrográfico, se realizó una reinterpretación ambiental la cual, combinada con una calibración principalmente de la Ro contra otros parámetros como la fluorescencia de la materia orgánica (Wilkins, 1992) y se corrigieron los valores de Ro suprimidos, explicando así la presencia de crudo en shales y calizas inmaduras. La técnica de maduración artificial, conocida como la hidropirólisis (Lewan, 1985 y 1993), ofreció el medio para obtener muestras "maduradas" a así, determinar el monto de la supresión para cada estado de generación de gas y aceite. Estas pruebas permitieron medir las moles(n) de gas/g de roca, generado a un máximo de 0,097n.

Esta calibración permitió establecer el valor de Ro de la formación La Luna en la cuenca del Valle Medio del Magdalena en 0.8%, ubicándola dentro de la ventana de generación de aceite. Estas nuevas apreciaciones permitirán adelantar modelos geoquímicos y cálculos más precisos del potencial de petróleo y gas en los diferentes prospectos de exploración en el VMM.

*Trabajo de investigación

**Facultad De Ingenierías Físicoquímicas, Escuela De Geología, Director Mario García González



ABSTRACT

TITLE: An update to the thermal maturity Level of La Luna Formation, Middle Magdalena Basin, Colombia*.

AUTHOR: Humberto Carvajal Ortiz **

KEYWORDS: La Luna Formation, Maturity Level, Vitrinite Reflectance, Vitrinite reflectance Suppression, Hydrous Pyrolysis (HP).

Thermal maturity analysis made upon La Luna formation in the Middle Magdalena Basin (MMB), Colombia, have employed the Vitrinite Reflectance measurements (Ro) and the Tmax as thermal maturity indicators, regardless the whole kind of problems this indicators presents. (Suppression, weathering, depositional paleoenvironment, etc). This results in the immature thermal level of the formation in the MMB. (García & Parra, 2003; Mora et al, 2002) However, oil impregnation on the rocks in outcrop, and petrographic evidences such as filling of the Foraminifera test cameras with oil , show the presence of Ro suppression phenomena; Consequently, it leads to the search of Stratigraphic older source rocks and thereby to wrong interpretations about the petroleum system of the MMB.

The rock samples come from the La Sorda creek section, nearby Lebrija town, Santander, Colombia, where the three members of the La Luna formation (Salada, Pujamana and Galembó) are very well preserved in a complete outcrop.

A fine petrographic study combined with a Ro calibration against fluorescence, Hp products, Tmax and HI Content, allow making some reinterpretation upon the depositional environment of the organic matter (O.M.) and corrections on the suppressed Ro values, as a mean to explain the presence of oil in shales and marlstones presumably thermally immature. The technical procedure to produce artificially oil and gas from a rock, known as hydrous Pyrolysis (Lewan, 1985 y 1993), was the way to obtain "matured" samples and thus, make quantifications about the amount of Ro suppression for the samples of the la Sorda creek.

After calibrations, a mean Ro value of 0.8% was established for La Luna Formation, classifying the rock as thermally mature and into the oil window. These appreciations could lead to more accurate geochemical modeling and reserves calculations about hydrocarbon potential on the exploration prospectus in the MMB.

*Trabajo de investigación

**Facultad De Ingenierías Físicoquímicas, Escuela De Geología, Director Mario García González



1. INTRODUCCION

Durante el Cenomaniano tardío al Santoniano, se presentó un nivel máximo de transgresión marina, desarrollándose condiciones anóxicas en los océanos al rededor del planeta. Durante este periodo de tiempo tuvo lugar la depositación de aproximadamente el 29% de las rocas generadoras de hidrocarburos (rocas fuente) de todo el mundo. (Zapata et al, 2003)

La Formación La Luna en Colombia y Venezuela y sus formaciones correlacionables como son: Grupo Villeta en la Cordillera Oriental (CO) y Valles Superior y Medio del Magdalena (VSM, y VMM); Formaciones Chipaque y Gacheta en la CO, y Piedemonte Llanero; Formaciones Napo y Chonta en La Cuenca de Oriente de Ecuador; y Perú entre otras, han sido consideradas como las principales rocas generadoras de Hidrocarburos en el norte de Suramérica y es posiblemente una de las formaciones más productivas del mundo (Zapata et al, 2003; Villamil & Pindell, 1998; Villamil et al, 1999). Por esta razón el estudio geoquímico de las formaciones antes mencionadas es de vital importancia para entender el sistema petrolífero del Valle Medio del Magdalena.

Este estudio tiene como objetivo central, la evaluación del grado de madurez termal de la Formación La Luna, en el VMM. Esta evaluación se adelantó utilizando parámetros tradicionales indicadores de madurez termal como lo son la reflectancia de la vitrinita (R_o), la temperatura máxima de pirólisis anhídrica (T_{max}), y la fluorescencia. Estos parámetros fueron calibrados entre sí empleando datos de petrografía orgánica observados en muestras de roca sometidas a pruebas de Hidropirólisis.



Las muestras estudiadas en esta investigación provienen la sección de la Quebrada la Sorda (Municipio de Lebrija en Santander), la cual fue dividida en tres miembros: Salada, Pujamana y Galembó por Morales et al. (1958).

1.1 Planteamiento Del Problema

Los estudios geoquímicos de madurez termal realizados a la Formación La Luna en el VMM son escasos y no han abordado los problemas de medición de la madurez termal de esta formación. Se pretende con este trabajo de investigación discutir el grado de madurez termal alcanzado por la Formación La Luna en el VMM, la cual de acuerdo a las evidencias de campo, y a evidencias petrográficas indican que esta formación esta en la ventana de generación de petróleo y por tanto es la fuente de los principales pulsos de generación de hidrocarburos en el VMM. Estas observaciones contrastan con las de Mora et al. (2002) y García & Parra (2003), quienes no reconocieron los problemas de supresión de los de datos de R_o y T_{max} y concluyeron en forma errónea que la Formación la Luna es termalmente inmadura en gran parte de la Cuenca del VMM.

De acuerdo a lo anterior, en el VMM se han presentado diferentes pulsos de generación y expulsión de hidrocarburos que involucran a la Formación la Luna y por consiguiente a las demás formaciones generadores del VMM entre las cuales se incluyen las Formaciones Simití, Tablazo, Paja y Rosablanca.

Los resultados de los análisis de R_o se han empleado como principal parámetro de madurez termal, sin considerar los múltiples problemas que presenta este indicador (supresión, meteorización, contenido de Hidrógeno (HI), y ambiente de depósito). La Formación la Luna se presentan varios de estos problemas como son la escasez de los fragmentos del maceral vitrinita, el alto contenido de HI el cual suprime los valores de Reflectancia (Price & Barker, 1985) y el ambiente de



depósito en el cual no se encuentran plantas superiores que constituyen la fuente del maceral vitrinita. Las anteriores consideraciones dificultan obtener un valor real de madurez termal a partir de R_o , los cuales deben ser calibrados pues de otra manera conlleva a erradas interpretaciones.

De otra parte ninguno de los estudios geoquímicos adelantados en el VMM presentan un soporte metodológico de las mediciones de R_o , lo cual ha llevado a reinterpretaciones del grado de madurez termal alcanzada, llegando a concluirse que la Formación Luna solo ha aportado una pequeña parte de todo los Hidrocarburos recuperados y por recuperar en la cuenca del VMM. Este trabajo pretende demostrar como estas interpretaciones son erradas por no haber considerado los fenómenos de supresión de la Reflectancia de vitrinita y de T_{max} en el VMM.



1.2. Estudios Anteriores

A continuación se reseñan los principales trabajos realizados sobre la Geoquímica de la Formación La Luna en el VMM:

TRABAJO	AÑO	AUTOR
Áreas Con Mayor Potencial De Carga De Petróleo: Cuenca Valle Medio Del Magdalena (VMM) Y Occidente De La Cordillera Oriental, Colombia	2003	García, D. et al.,
¿Is The Luna Formation The Main Hydrocarbon Source Rock In Colombia? 8th Latin American Congress On Organic Geochemistry	2002	<i>Mora, C. A. et al</i>
Problemas En La Identificación Del Origen De La Materia Orgánica Amorfa (M.O.A) En Los Estudios De Palinofacies En La Formación La Luna - Cuenca Valle Medio Del Magdalena. 8th Latin American Congress On Organic Geochemistry, Cartagena, Colombia.	2002	<i>Giraldo, Blanca N. et al</i>
The Luna Formation: Chemostratigraphy and organic facies in the Middle Magdalena Basin. Organic Geochemistry.	2000	Rangel et al
La Luna Formation: Chemostratigraphy and organic facies in the Middle Magdalena Basin. 19th international meeting on organic Geochemistry, Istanbul Turkey	1999	Rangel et al
Calidad de roca fuente de petróleo y facies orgánicas del cretáceo superior: formación La Luna (cuenca del Valle medio del Magdalena), formación Conejo y grupo Guadalupe (Cordillera Oriental). Universidad Industrial de Santander. Tesis de grado.	1999	Pineda et al
Petroleum Geochemistry of Middle Magdalena Valley, Colombia. Organic Geochemistry, 30.	1999	Ramon J.C. et al
Source Rocks of the La Luna Formation in the MMV, Colombia. AAPG studies in Geology.	1984	Zumberge J.
General Geology And Oil Occurrences Of Middle Magdalena Valley, Colombia. AAPG	1958	Morales L.



1.3 Objetivos

El objetivo central de este trabajo es discutir la calibración de los parámetros de R_o y T_{max} empleados para medir el estado de maduración termal de la Formación la Luna en el VMM.

Para desarrollar este objetivo, se llevaron a cabo las siguientes tareas:

- Descripción sedimentológica y petrográfica de las muestras para buscar evidencias sobre el origen del crudo presente en los afloramientos de la Formación la Luna estudiados.
- Reinterpretación de los ambientes de depósito de la Formación al Luna con el fin de mostrar las condiciones de depositación y preservación de la Materia Orgánica presente en la Formación la Luna.
- Medición de la reflectancia de la vitrinita (R_o) a las muestras de la Formaciones La Luna y Umir con el fin de comparar los datos de la secuencia La Luna Umir del flanco Oriental del VMM.
- Análisis cualitativo de la fluorescencia de la materia orgánica en la Formación La Luna (en la sección de la Quebrada la Sorda) VMM con el fin de comparar la fluorescencia con los datos de R_o .
- Adelantar experiencias de hidropirólisis de muestras de la Formación la Luna con el objeto de observar y medir los cambios de los valores de R_o y T_{max} de muestras artificialmente maduras.



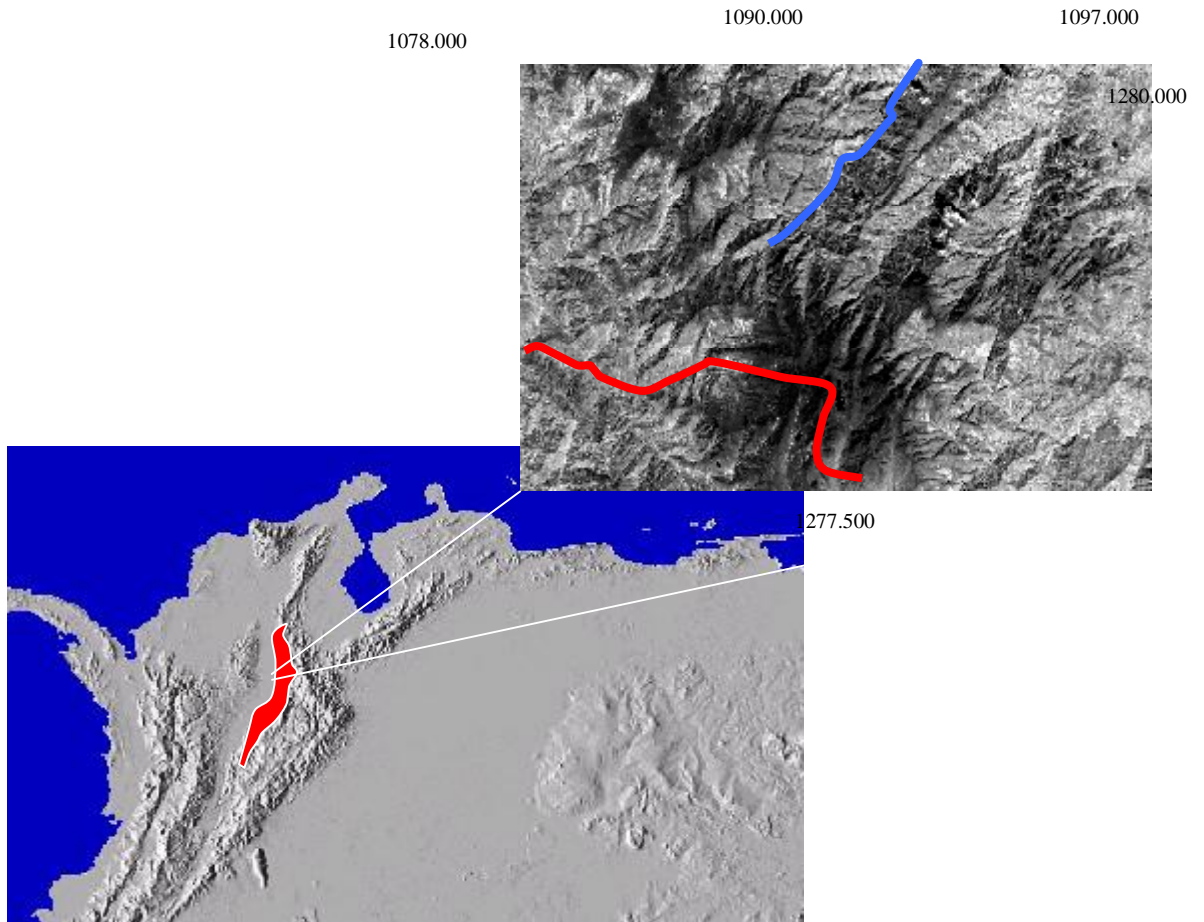
1.4 Localización

Este proyecto trabajó el área comprendida entre las quebradas la Sorda y Mata de Cacao localizadas en el municipio de Lebrija en Santander con las siguientes coordenadas planas X: 1`285.000 y Y: 1`085.000. Esta área de estudio presenta una sección completa no fallada de la Formación la Luna lo cual permitió adelantar un muestreo metódico de esta formación con el fin de hacer un estudio detallado de los fenómenos de maduración termal (Figura 1)

El acceso al área de estudio se hace por la carretera de Bucaramanga a Barrancabermeja, en el sitio denominado La Azufrada se desvía por la vía alterna que conduce al municipio de Sabana de Torres la cual se intercepta con la Quebrada la Sorda a 5 Km. del desvío antes mencionado.



Figura 1. Mapa de localización de la sección Lebrija, departamento de Santander. Escala 1:1'000.000 (Modificado de NASA web site)



2. METODOLOGIA

La metodología empleada incluyó los siguientes análisis y actividades que brevemente se reseñan a continuación.

2.1 RECOLECCION DE MUESTRAS

La recolección de muestras se llevó a cabo sobre las quebradas la Sorda y Mata de Cacao en donde se recolectaron muestra las formaciones La Luna y Umir respectivamente.

Las muestras seleccionadas para los análisis geoquímicos y petrográficos cubren estratigráficamente los tres Miembros del Formación La Luna. Las muestras de la Formación Umir cubren la media y superior de esta Formación. También se trabajó con muestras seleccionadas del estudio realizado por García González y Cruz Guevara. (2002)

Fueron seleccionadas 30 muestras de la Formación La Luna, de acuerdo a los siguientes parámetros:

- Muestras representativas de las diferentes facies litológicas, y que presentan una buena distribución estratigráfica en la Formación la Luna.
- Facies litológicas indicativas de altos valores de TOC.
- Altos valores de HI > 300, de acuerdo con el rango de valores enunciado por Lewan. (1993)

En la formación Umir se seleccionaron 6 muestras para análisis geoquímicos y de reflectancia de vitrinita.



2.2 ANALISIS DE LABORATORIO

Los análisis de laboratorio comprenden:

2.3 Descripción petrográfica de muestras

La tabla 1 indica los análisis efectuados de para cada formación y el tipo de muestra.

Tabla 1. Relación de los análisis realizados y cantidad de muestras.

Formación	TOC	Azufre Total	Ro	Tmax	Petrografía Orgánica	Fluorescencia Cualitativa	Cromatografía de gases
La Luna	30	32	39	3	39	39	2
Umir	5	-	6	-	6	6	-

Se elaboraron 45 secciones pulidas utilizando una pulidora automática BUEHLER PHOENIX BETA, sobre las cuales se adelantaron los análisis petrográficos y de reflectancia. Así mismo se elaboraron 10 secciones delgadas para análisis petrográficos

La descripción y clasificación de muestras en sección pulida y sección delgada se llevo a cabo siguiendo la metodología para la clasificación de rocas calcáreas de Folk (1973) y Dunham. (1978) Los resultados son reportados en el anexo A.

El análisis del registro fósil presente en las muestras se llevó a cabo en base a la metodología propuesta por Cruz (1997), Adams, Mackenzie & Guilford (1997) y Haq & Boersma, (1978) con el fin de hacer una aproximación al ambiente en el cual pudo haberse depositado la materia orgánica de la formación La Luna en la sección de la Quebrada La Sorda. La identificación en sección pulida y sección delgada del registro fósil encontrado se realizo con base en los trabajos de Parra et al(2003), Zapata et al (2003), Bralower y Lorente(2003), Scholle (1998),



Villamil y Arango (1998) y comunicaciones verbales con Luis E. Cruz y Carlos Jaramillo

2.4 Petrografía Orgánica del Kerógeno

La petrografía orgánica utiliza microscopia de luz reflejada blanca, azul y ultravioleta. En este estudio se utilizó un microscopio **ZEISS AXIOTRON** con un fotómetro **MPM 400**, el cual se encuentra en los laboratorios de Geología del campus de Guatiguará.

2.5 Mediciones de Reflectancia

Las mediciones de Reflectancia se realizaron en muestras preparadas de roca total (Whole rock mounts), sobre las partículas de M.O. de origen continental encontradas en las diferentes muestras de los 3 miembros de la formación La Luna del VMM. La identificación y clasificación de estas partículas como Materia Orgánica de origen terrestre (Kerógeno tipo III) se hizo teniendo en cuenta su apariencia visual y su resistencia al ataque con HCl y HF. (Barker, 1982) El mismo procedimiento analítico se llevó a cabo en las muestras de roca que fueron sometidas a Hidropirólisis.



Figura 2. microscopio de luz reflejada Carl Zeiss

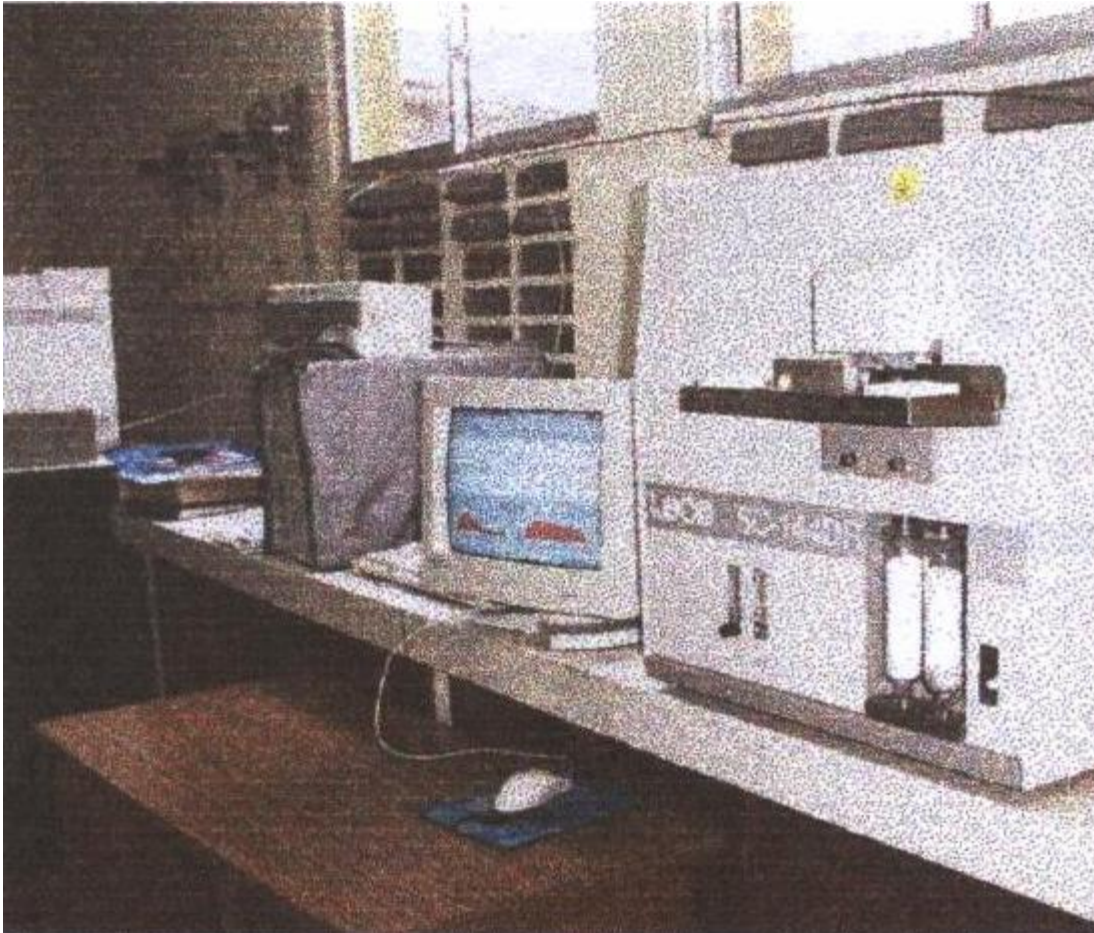


2.6 Carbono Orgánico Total (COT)

La determinación de TOC para las 30 muestras seleccionadas de la formación la Luna, se realizó utilizando un Analizador **LECO SC-144DR** el cual se encuentra en la sede de geología del campus de Guatiguará; el empleo de este método arroja valores de COT mucho más confiables (García – González, 1999). Los resultados son registrados en la tabla 2.



Figura 3. Analizador Leco SC-144DR



2.7 Azufre Total

El contenido de azufre total de las muestras seleccionadas de la formación La Luna en la sección de la Quebrada La sorda se analizó igualmente, utilizando un Analizador **LECO SC-144DR**, empleando un método de análisis experimental para rocas generadoras de petróleo con alto contenido de azufre (Tissot y welte, 1984).



2.8 Experiencias de Hidropirólisis

La maduración termal, generación y expulsión artificial de petróleo de las muestras seleccionadas de la Formación La Luna del VMM, se llevaron a cabo en el laboratorio por medio de la técnica conocida como Hidropirólisis (ó pirólisis Hídrica), desarrollada por primera vez por Lewan et al, (1979), la cual ha cobrado gran importancia en la exploración de hidrocarburos, donde sus productos (los pirolizados), son similares a los aceites crudos naturales (Lewan, 1985; Lewan et al, 1993, 1994, 1997,2001; Hoering, 1984; García-González et al. (1993) Las experiencias se llevaron a cabo teniendo en cuenta la rutina propuesta por García-González, MacGowan y Surdam. (1993)

Las experiencias de Hidropirólisis se realizaron empleando un **Reactor de presión Parr 4680**, equipado con un controlador de temperatura Watlow modelo 4842, el cual se encuentra en la sede de Geología del campus de Guatiguará.



Figura4. Reactor de presión Parr 4680



2.9 Cromatografía de Gases

La cromatografía de gases fue empleada para determinar la composición química de la fase gaseosa generada en las experiencias de HP. Las muestras de gas analizadas de la Formación La Luna, corresponden a las generadas durante las experiencias de Hidropirólisis a 290°C y 360°C. El equipo empleado en dicho análisis fue un HP 6890 Series GC System el cual se encuentra en la sede de Geología del campus de Guatiguará.

La rutina empleada para el análisis de la fracción gaseosa, se baso en la sugerida para gas natural Hidrocarburo, publicada en el catálogo de análisis químico de Hewlett Packard - 1999, al cual se le efectuaron algunas modificaciones.



3. MARCO GEOLOGICO

El área de estudio (sección de la Quebrada La Sorda), esta localizada en la parte oriental de la cuenca del VMM, a mas o menos 20km al occidente de la ciudad de Bucaramanga en el departamento de Santander, Colombia. La columna estratigráfica del VMM se puede apreciar en la figura 5, que consta esencialmente de areniscas fluviales del jurásico, calizas y shales de ambientes de plataforma somera a pantanos del Cretácico y rocas sedimentarias fluviales del Terciario.

El marco tectónico del VMM, esta estrechamente relacionado con el marco de evolución tectónica de la cordillera oriental. La cordillera oriental consiste en una cobertera sedimentaria (clástica y carbonática) que sobreyace rocas del Precámbrico y el Paleozóico; el desarrollo de la cuenca se inició durante el Triásico – Cretácico temprano con una mega secuencia sin-rift, relacionada directamente con la separación entre norte y Suramérica, en el protocaribe, como ha sido resaltado por diferentes estudios (Montes, 2003; Taboada et al ,2000; Cooper et al, 1995; Dengo & Covey, 1993). Durante el Cretácico temprano, una transgresión marina dio lugar al relleno de la cuenca de Back-arc con una cuña progradante. La máxima superficie de inundación se alcanzó para el Turoniano-Santoniano, estableciendo los depocentros a través de la Cordillera Oriental, VSM y VMM, con cuencas marginales en los llanos orientales y el Putumayo. Fue durante este periodo que se depositó la Formación La Luna y sus equivalentes estratigráficas en las cuencas anteriormente mencionadas.

La acreción de la Cordillera Occidental durante el Maastrichtiano- Eoceno temprano, dio lugar a la formación de una cuenca de Foreland y a su asociada megasecuencia. Finalmente, durante el Terciario tuvo lugar el levantamiento de la cordillera oriental, en lo que se conoce como orogenia



Andina, aislando las cuencas del VMM y de los llanos orientales, la cual propició el desarrollo de secuencias continentales.



Figura 5. Columna estratigráfica del VMM. (Modificado de Cooper et al, 1995)

Periodo	Epoca		Duración (Ma)	VMM			
Terciario	Oligoceno	Chattiano	4.7	23.8	Grupo Chuspa	Colorado	
		Rupeliano	5.2	9.9		Mugrosa	
	Eoceno	Priaboniano	3.3	33.7	Grupo Chorro	Esmeralda	
		Bartoniano	4.3			La paz	
		Lutetiano	7.7	21.1			
		Ypresiano	5.8				
		paleoceno	Tanetiano	3.1	54.8	Lisama	
	Selandiano		3.0	10.2			
	Daniano		4.1	65			
	Cretácico	Tardío	Maastrichtiano	6.3	33.9	La Luna	Umir
			Campaniano	12.2			Galembó
			Santaniano	2.3			Pujamana
Coniaciano			3.2	Salada			
Turoniano			4.5				
Cenomaniano			5.4				
Temprano		Albiano	13.3	43.1	Simiti		
		Aptiano	8.8		Tablazo		
		Barremiano	6.0		Paja		
		Hauteriviano	5.0		Rosablanca		
		Valanginiano	4.5		Basales Clásicos	Cumbre	
		Berriasiano	5.4			Los Santos	
		jurásico	Tardío		Titoniano	8.8	142



4. RESULTADOS

4.1. Análisis facial de la Formación La Luna

El anexo A, incluye los resultados de los análisis petrográficos en donde se registran los siguientes datos: textura, registro fósil, y tipo de materia orgánica.

En la sección de la quebrada la Sorda, se determinaron 7 microfacies para la Formación La Luna. Estas microfacies se describen a continuación, utilizando la terminología de Dunham (1962), Las cuales se describen a continuación:

PACKSTONE DE BORINGS (PBR)

Adicionalmente se observan peloides, que se caracterizan por la ausencia de estructura interna y su coloración marrón oscura y también escasos oncoides que se caracterizan por su forma sub-redondeada irregular (figura 6 c). Está presente principalmente en el segmento superior de la sección de la Sorda y representa el 33% del total de este segmento. También se encuentra en estratos de poco espesor en los segmentos intermedio e inferior, La facies PBR presenta abundante registro fósil, principalmente de fósiles traza, como Borings sobre conchas y fragmentos óseos (Figura 6). Abundan también los ooides con estructura concéntrica que de acuerdo a Le Goff (2004) son formados por el oleaje en las barras coralinas. Le Goff clasifica estos ooides como ooides de origen físico.



Figura 6.a) Borings grabados sobre concha de Bivalvo .b) Borings sobre fragmento óseo. c) peloides asociados con M.O.

a)



b)



c)



En la microfacies facies PBR se encuentran también foraminíferos bentónicos de los géneros Bolivinooides y Ortokarslenoides, los cuales presentan un tamaño que alcanza los 500 μm (figura 7).



Figura 7.a) Bolivinoide con cámaras rellenas de aceite. b) Ortokarslenoide con cámaras rellenas de aceite

a)



b)



PACKSTONE DE BOLIVINOIDES (PB₀)

La facies presenta gran cantidad de foraminíferos bentónicos del genero Bolivinoides, los cuales se observan con tamaños de hasta 500 μm . También se observan abundantes ooides de origen físico, peloides y oncoides.

Es común observar que las cámaras de las cónchulas de los foraminíferos bentónicos se encuentran rellenas de materia orgánica amorfa (M.O.A.), que presenta fluorescencia amarilla a naranja. Como lo ilustra la figura 8.

Figura 8. Bolivinoide con las cámaras rellenas de M.O. a) luz blanca b) luz azul UV



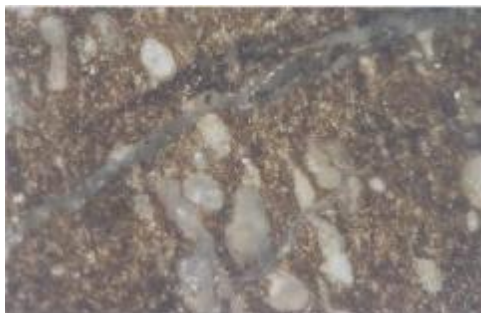
MUDSTONE DE FORAMINIFEROS PLANCTÓNICOS (MFP)

Representa casi el 30% de la sección de la Sorda y se clasificada como micrita fosilífera según Folk (1974). Esta microfacies MFP presenta gran cantidad de foraminíferos planctónicos con algunas morfologías propias de los globigerinoides. Sin embargo la mayoría de los foraminíferos se encuentran reemplazados completamente por calcita.

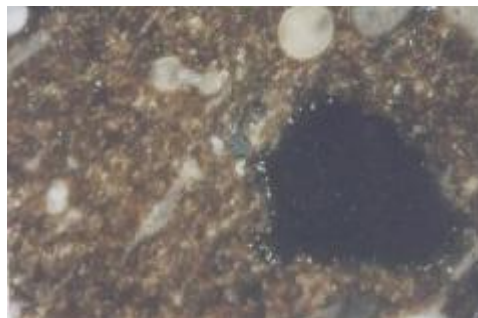
Tanto el registro fósil como las partículas minerales de calcita y cuarzo se encuentran formando laminas alterantes de colores claros y oscuros debidos al alto contenido de materia orgánica de las laminas. (Figura 9)

Figura 9. Globigerinoides en matriz de textura fina. a) parte superior izquierda e inferior derecha. b) parte superior centro-izquierda.

a)



b)



Esta microfacies se encuentra distribuida por toda la sección de la Sorda, con mayor proporción en el miembro intermedio.



***WACKESTONE DE FORAMINIFEROS PLANCTÓNICOS (WFP) Y
WACKESTONE DE FORAMINIFEROS BENTÓNICOS (WB)***

Estas microfácies se presentan como variaciones laterales de la facies wackestone de Foraminífero. La definición de las microfácies WFP y WB obedece a criterios de interpretación ambiental. La microfácies WFP, se caracteriza por el alto grado de reemplazamiento por calcita que presenta los foraminíferos planctónicos. Aunque el registro fósil se encuentra pobremente conservado, se diferenció la especie *Heterohelix* que ilustra la figura 9. Esta microfácies se encuentra principalmente en el miembro basal de la sección de la Sorda, que se correlaciona con el Miembro Salada.

*Figura 10. Morfologías *Heterohelix* en el centro de la fotografía*



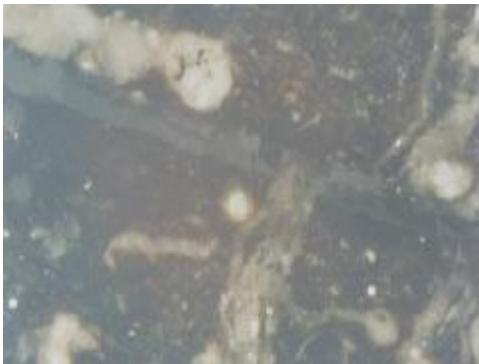
La microfacies WB, se reconoce por la alta densidad espacial de foraminíferos bentónicos del genero Bolivinooides, la cual da origen a su clasificación textural. Según Folk (1972), la textura es típica de Biomicrita empaquetada y se encuentra en proporciones semejantes en los segmentos intermedio y superior de la sección de la Sorda.

MUDSTONE DE FORAMINIFEROS BENTONICOS (MB)

Esta microfacies se encuentra presente en mayor proporción dentro del segmento intermedio de la sección de la Quebrada la Sorda. Su característica principal constituye la presencia de foraminíferos del genero Bolivinooides los cuales están completamente reemplazados por calcita. Los foraminíferos presentan un tamaño promedio de 80 μm .

Figura 11. a) y b) presentan foraminíferos bentónicos reemplazados por calcita en los extremos de las fotografías

a)



b)



MUDSTONE DE BIOCLASTOS (Mbi)

Esta microfacies esta presente en una sola de las muestras analizadas y se caracteriza por la presencia de diversos fragmentos de organismos bentónicos principalmente bivalvos de gran tamaño.

Figura 12.a) y b) Bioclastos de mas de 500µm.

a)



b)



4.2 Petrografía Orgánica

4.2.1 ANÁLISIS DE LA MATERIA ORGÁNICA

Se estudio la materia orgánica en 45 muestras de roca pulida (whole rock mounts), con el objeto de ver la relación entre la materia orgánica y las partículas inorgánicas tales como cónchulas de foraminíferos y peloides. Esta técnica tiene la ventaja de poder ilustrar la presencia de materia orgánica dentro de estructuras fósiles lo cual es evidencia de maduración in situ de MO y no de petróleo migrado (Lewan, comunicación escrita). Las muestras de M.O. aislada por tratamientos químicos, destruye las estructuras orgánicas de composición calcárea haciendo imposible ilustrar la relación entre la M.O. y las estructuras calcáreas.

De igual forma se empleó la petrografía orgánica para observar el comportamiento de la M.O. a través de las experiencias de hidropirólisis la cual se discute mas adelante.

En las muestras estudiadas se observo la predominancia de kerógeno amorfo disperso en la matriz mineral, el cual presenta fluorescencia en el segmento superior de la sección de la Sorda, conocido como miembro Galembo. La presencia de kerógeno continental se restringe a vitrinoides o partículas de vitrodertinita según la terminología de Stach et al (1982).

En la sección de la Quebrada la Sorda, la Formación la Luna presenta dos tipos de materia orgánica: M.O. amorfa también conocida como kerógeno sapropélico, y vitrinoides que consisten a en partículas de vitrinita sin forma definida denominados vitrodertinita por Stach et al. (1982) Adicionalmente se pudo



documentar la presencia de partículas de Liptinita que en la mayoría de los casos se mimetizaba con la materia orgánica amorfa, diferenciándose por su fluorescencia. Las partículas de inertinita se encontraban únicamente como trazas.

El miembro basal, los vitrinoides encontrados presentan tamaños considerables (> 100 Micrómetros), y se encuentran con intercrecimientos de Calcita asociados como se ilustra en la figura 13.

Figura 13. a) b) y c) partículas vitrinoides en intercrecimiento evidente con calcita. En c), los sectores de color gris claro pertenecen a los intercrecimientos de calcita.

a)



b)



c)

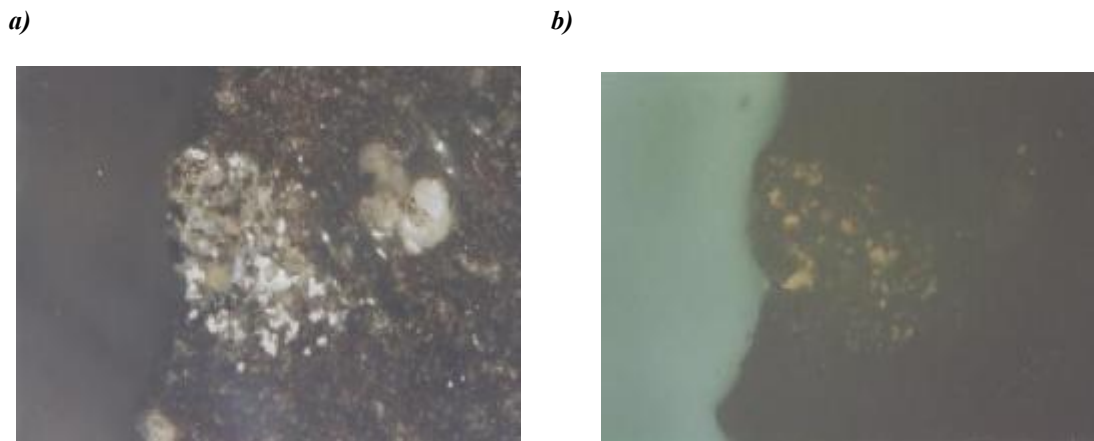


Estos intercrecimientos de Calcita, si bien son ampliamente identificables en este segmento de la sección, se encuentran en toda la sección aunque con frecuencia y tamaño menores. Tales intercrecimientos muestran una apariencia visual gris muy parecida a la que enseña el maceral Vitrinita, así como valores de Reflectancia $> 0,6\%$. Estas partículas dificultaron en distintas ocasiones su diferenciación con respecto a los vitrinoides.

El segmento intermedio de la sección presenta Kerógeno sapropélico y vitrinoides. El Kerógeno sapropélico fue posible identificarlo por la intensa fluorescencia que emiten algunas de sus partículas, especialmente de macerales del grupo de la Liptinita.

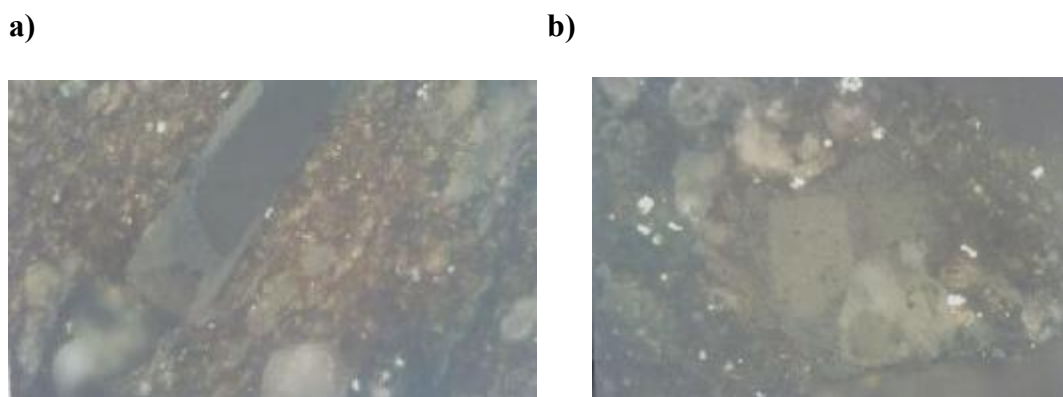


Figura 14. M.O. fluorescente de origen liptinitico. A) luz blanca. B) luz azul UV.



Estas partículas Vitrinoides, a diferencia de las encontradas en el miembro basal de la sección, se encuentran en mayor proporción pero en tamaños mucho menores. En este miembro nuevamente se encuentran partículas vitrinoides con intercrecimientos de Calcita asociados, pero no son comunes a todas las partículas.

Figura 15. a) y b) intercrecimientos de calcita con vitrinoides. Los grises claros pertenecen a los sectores intercrecidos de partículas



La ocurrencia de sulfuros en el miembro (Pirita), es mucho mayor que en el segmento basal, los cuales e muchos casos, se originan a partir de tales partículas vitrinoides. (Pirita Framboidal)

Figura 16. Pirita framboidal generada dentro de una partícula vitrinoide



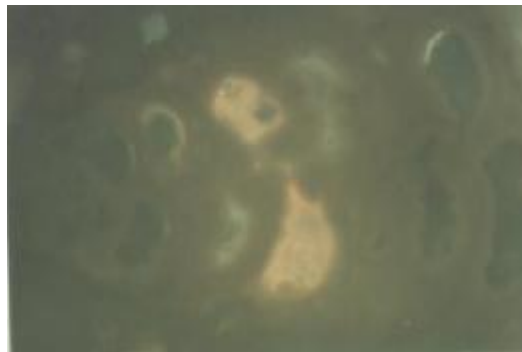
En el miembro superior la M.O. predominante es Kerógeno sapropélico, presente tanto en la matriz mineral, como dentro de las recámaras de muchos foraminíferos, especialmente de los Bolivinoideos.

Figura 17. Foraminífero con las cámaras de su conchula rellenas de M.O. fluorescente. a) y c) luz blanca. b y d) luz azul UV.

a)



b)



c)



d)



4.2.2 ANALISIS DE LA M.O. SOMETIDA A HIDROPIROLISIS

Las muestras utilizadas en las experiencias de Hidropirólisis al pertenecer al miembro intermedio de la formación (Pujamana según Morales, 1958), están compuestas en casi su totalidad de M.O.A. y partículas Vitrinoides. La fluorescencia en las muestras, si bien existe, es muy escasa llegando solamente a coloraciones naranja pálido.

Después de ser sometidas a una isoterma de 290°C por 72h, la fluorescencia de la M.O.A. aumento su proporción, aunque siguió presentando la misma fluorescencia. (Naranja pálido)



Figura 18. M.O.A. fluorescente en el residuo sólido a 290°C. a) partícula de gran tamaño rodeada por pequeñas partículas fluorescentes. b) partículas fluorescentes en el centro y en el extremo inferior izquierdo de la foto.

a)



b)



La presencia del maceral inertinita (kerógeno tipo IV) se hace evidente en cantidades considerablemente mayores que en la muestra original.

Al ser sometidas a una isoterma de 360°C por 72h, la fluorescencia desaparece completamente de las muestras; la presencia del maceral inertinita aumenta, llegando a proporciones entre un 5 – 10%.



Figura 19. Partícula de inertinita de gran tamaño.



Figura 20. Partículas de inertinita esparcidas sobre la matriz mineral.



Este aumento en el contenido de kerógeno tipo IV y la desaparición de la fluorescencia, indican que la M.O.A. se ha transformado en gran proporción a inertinita



4.3 COT Y Azufre Total

Los parámetros de interpretación para COT son (modificado de Tissot & Welte, 1984):

0.00-0.50 Pobre

0.50-1.00 Regular

1.00-2.00 Bueno

2.00-4.00 Muy Bueno

> 4.00 Excelente

La formación La Luna en la sección de la Quebrada la sorda arrojó valores promedio de COT entre 3.80 Y 5.02% que la clasifican en el rango entre muy bueno a excelente, como se aprecia en la tabla 2.

El miembro basal presenta un porcentaje de COT en general de 5,02% el cual lo ubica dentro del rango excelente. El COT se encuentra distribuido dentro de las microfacies del miembro de la siguiente forma:

- *WFP*, presenta un COT excelente con 4,1% en promedio, ocupando mas del 50% del espesor del miembro.
- *MFP*, presenta un COT excelente con 6,19% en promedio.

El miembro intermedio presenta COT excelente de 4,88% en promedio, distribuido en las microfacies así:

- *WFP-WB*, con un COT excelente de 4,45% , ocupan un pequeño
- Porcentaje del miembro (<30%).



Tabla 2. Análisis De Carbono Orgánico Total Carbono Total Y Azufre Total Para Las Muestras De La Formación La Luna.

Numero de muestra	COT %	Carbono total %	Azufre Total %	Miembro
Metro - 1	3.64	8.85	0.18	Galembo
Metro- 20	3.52	5.87	?	Galembo
Metro - 22	3.58	7.28	0.17	Galembo
Metro - 23	5.25	6.24	0.19	Galembo
Metro - 24	7.01	7.41	0.31	Galembo
Metro - 27	4.86	8.09	0.17	Galembo
Metro - 28	4.32	7.63	0.16	Galembo
Metro - 29	0.41	7.20	0.15	Galembo
Metro - 32	3.62	6.03	0.17	Galembo
Metro - 40	1.97	10.49	0.20	Galembo
Metro - 42	3.50	7.01	0.19	Galembo
Metro - 45	3.27	5.68	0.16	Galembo
Metro - 49	4.49	6.84	0.29	Pujamana
Metro - 50	4.54	5.69	1.01	Pujamana
Metro - 57	4.58	5.57	0.14	Pujamana
Metro - 61	4.43	7.20	0.48	Pujamana
Metro - 68	3.92	8.10	0.16	Pujamana
Metro - 74	5.61	7.91	0.18	Pujamana
Metro - 77	4.69	7.66	0.37	Pujamana
Metro - 87	3.79	5.77	0.21	Pujamana
Metro - 90	4.98	7.41	0.20	Pujamana
Metro - 98	5.81	8.10	0.31	Pujamana
Metro - 104	6.15	6.85	0.22	Pujamana
Metro - 108	5.26	9.49	0.23	Pujamana
Metro - 116	6.22	10.87	0.27	Salada
Metro - 119	5.25	7.80	0.45	Salada
Metro - 130	3.76	10.78	0.20	Salada
Metro - 132	4.64	10.51	0.25	Salada
Metro - 135	2.56	10.45	0.20	Salada
Metro - 153	5.59	11.11	0.42	Salada
Metro - 156	7.12	8.14	0.65	Salada



- *MFP*, con un COT excelente de 5,25% y son junto con la microfacies *MB* las microfacies dominantes del segmento intermedio, ocupando casi la totalidad del miembro.
- *MB*, tiene un COT excelente de 4,65%.

El miembro superior presenta valores de COT en promedio de 3.8% repartidos entre las microfacies del miembro así:

- *MFP*, 4,86% de COT excelente, pero con muy poco porcentaje dentro del miembro.
- *WB*, con excelente 4,1% de COT.
- *MB*, con un valor de COT muy bueno de 3,62%, registrada en una sola muestra.
- *PBO-PBR*, con un COT muy bueno de promedio 3,95%, abarcando gran porcentaje de el segmento superior (> 30.%)

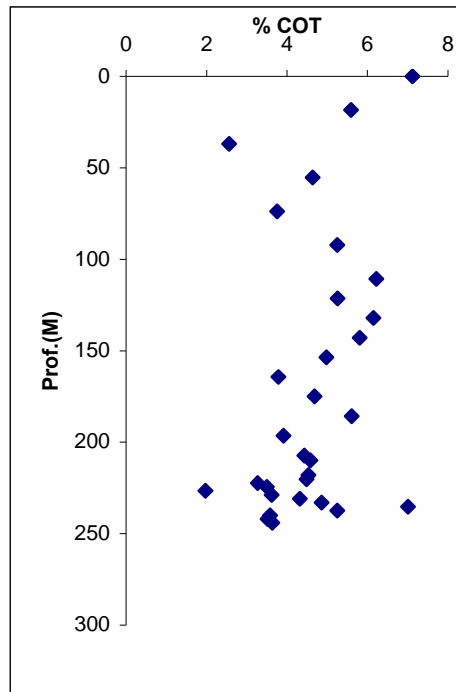
En resumen, las microfacies *MFP*, *WFP*, Y *WB*, comprenden cerca del 75% de la formación La Luna en la Sección de la Quebrada La Sorda. Según estos datos, la Formación La Luna es una roca fuente con un potencial generador de petróleo de muy bueno a excelente según los datos de COT y el tipo de Kerógeno (Tipo II, amorfa principalmente), conclusión a la que también han llegado estudios anteriores (Rangel et al, 2000; Ramón et al, 1999; Pineda & Esparza, 1999; Zumberge, 1984).

De acuerdo a esto, la clasificación de la Formación La Luna como roca generadora de H.C. pasaría de buena a excelente de acuerdo al contenido de COT, ya que el contenido de COT en rocas carbonatadas generadoras de H.C. depositadas en estos ambientes es de 3 a 4 veces mayor que en las rocas generadoras de H.C. clásticas, los Shales, bajando así la cantidad de M.O.



mínima necesaria para generar a 0.25-0.30% de COT. (Reed, 1976; Scholle, 1998). Como se aprecia en la figura 21, el valor de COT en la sección de La Sorda tiende a aumentar con la profundidad, hacia el miembro basal donde como se enuncio anteriormente, se presentan valores de COT de hasta 5%.

Figura 21. Distribución espacial de % De COT en la sección de la Q. La sorda. El segmento superior comprende del metro 0-26, el segmento intermedio comprende del metro 27-133 y el segmento basal del metro 134-244.

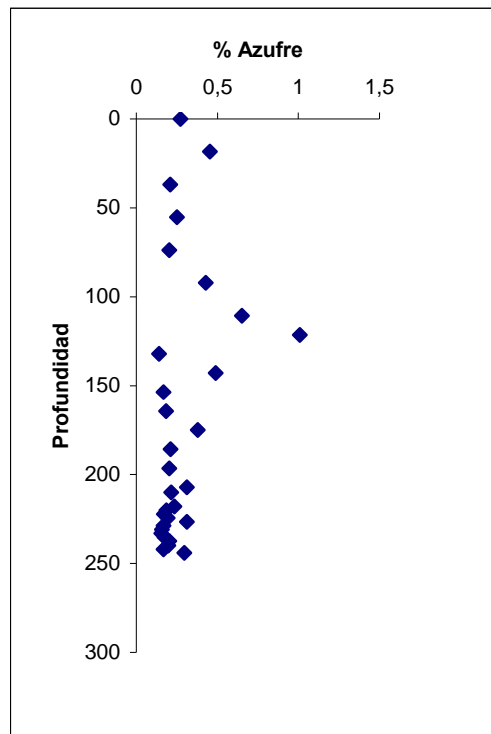


AZUFRE TOTAL

La formación La Luna en la sección de la Q. La Sorda presenta valores de azufre total entre 0,19-0,35% en promedio. Los valores de las muestras analizadas de cada miembro están listados en la tabla 2.

El segmento correlacionable con el miembro salada, presenta un valor de azufre total de 0,35% de promedio, el miembro Pujamana, presenta un valor promedio de azufre total de 0,32% y el miembro Galemba presenta un valor de 0,19%. La microfacies con mayor proporción en la sección es la microfacies *MFP* con 0,5% en promedio y las microfacies *PBR* Y *PBo* presentan las proporciones de azufre mas bajas. En la figura 22, se aprecia la tendencia del contenido de azufre total en la sección.

Figura 22. Distribución del contenido de azufre dentro de la sección de la Q. La Sorda. El segmento superior comprende del metro 0-26, el segmento intermedio comprende del metro 27-133 y el segmento basal del metro 134-244.



4.4 Reflectancia de Vitrinita (R_o)

La Reflectancia de la Vitrinita (R_o), es un parámetro de madurez termal de las rocas generadoras de petróleo, que se incrementa durante la misma debido a las complejas e irreversibles reacciones de aromatización. (Modificado de Peters & Cassa, 1994):

R_o de 0.2 – 0.5%, inmadura,

R_o de 0.5 – 1.35%, madura,

R_o >1.35% postmadura.

Las partículas de M.O. de origen terrestre encontradas en las muestras analizadas de la Formación La Luna fueron denominadas como “Vitrinoides”, por la carencia de estructura interna, hecho que impide su identificación como Telinita, Colinita, factor que se enunció anteriormente.

Las mediciones de R_o realizadas sobre los 3 miembros de la Formación La Luna, se llevó a cabo teniendo en cuenta la metodología propuesta por Barker (1993), donde se reconsidera el estándar clásico de medidas sugerido para tales mediciones (de 50- 100, mediciones por muestra según Teichmüller en Tissot & Welte, 1984). Barker (1993 y comunicación escrita), asegura que con tan solo un mínimo de mediciones de entre 20-30 es suficiente para lograr valores de R_o % confiables en muestras con un alto contenido de materia orgánica diseminada (DOM). La confiabilidad de este número de mediciones esta sujeta al coeficiente de variación (V = Desviación Standard/ Promedio); con $V < 0,2$ el valor de R_o es confiable y para valores de $V > 0,2$ no lo son. Las mismas consideraciones se tuvieron en cuenta en las mediciones realizadas en las muestras de la Formación Umir y el residuo sólido obtenido de las experiencias de Hidropirólisis.



Para la realización de las mediciones, se siguió una metodología experimental que fue la que mejores resultados arrojó y que a continuación se enuncia brevemente:

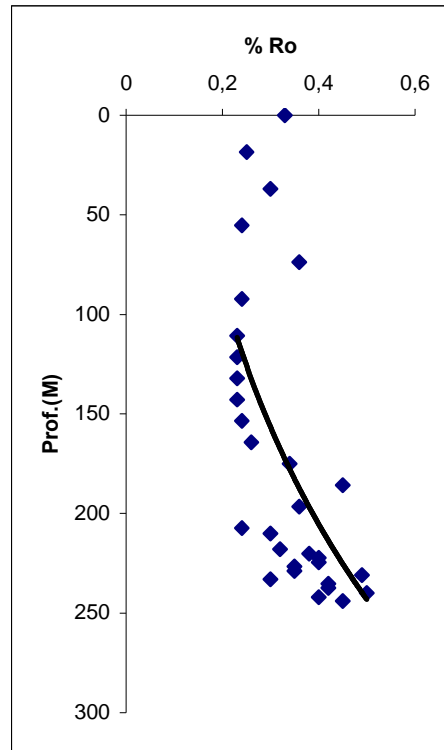
- 1- Encendido de la lámpara CARL ZEISS SNT de 12V y 100w con al menos 2 horas de antelación al comienzo de las mediciones.
- 2- Encendido y calibración Del Fotómetro MPM 400. La calibración se llevó a cabo contra un Standard de vitrinta con un valor de reflectancia de $R_o = 0.57\%$, suministrado por CARL ZEISS.

La realización de manera iterativa de este procedimiento permitió tener valores estables de medición de reflectancia de un mínimo de error máximo de 0.001%.

La formación La Luna, como se aprecia en la figura 23, muestra una tendencia al aumento en los valores de R_o en profundidad, siendo el segmento basal el que mayores valores registró.



Figura 23. Tendencias de %Ro de la formación La Luna en la sección de la Q. La Sorda. El segmento superior comprende del metro 0-26, el segmento intermedio comprende del metro 27-133 y el segmento basal del metro 134-244.



La formación La Luna en la sección de la Quebrada La Sorda, presenta datos de R_o que la clasifican como inmadura termalmente (R_o promedio de 0,36%) y en la etapa de precatagénesis o Diagénesis (<0.5% según Tissot & Welte, 1984), como se muestran en la figura 24.

Los valores de R_o en la Sección de la quebrada La Sorda aumentan hacia la base de la formación (figura 25). El miembro basal de la sección, correlacionable con el miembro descrito por Morales (1958) como Salada, presenta un R_o promedio de 0,42 %. Los valores mas altos se registraron en las partículas asociadas a la microfacies MFP. (0,48%)

En el miembro intermedio se registro un R_o promedio de 0,37%, donde los valores más altos medidos en las partículas vitrinoides (0,39 %), están asociados con la microfacies MFP dominante en todo el miembro.

El segmento superior de la sección de la Quebrada la Sorda es el que mas bajos valores de R_o presenta en promedio, 0,30 %, asociadas estas mediciones a la microfacies MB.

Figura 24. Histograma de la distribución de R_o de la Formación. La Luna en la sección de la Q. La Sorda

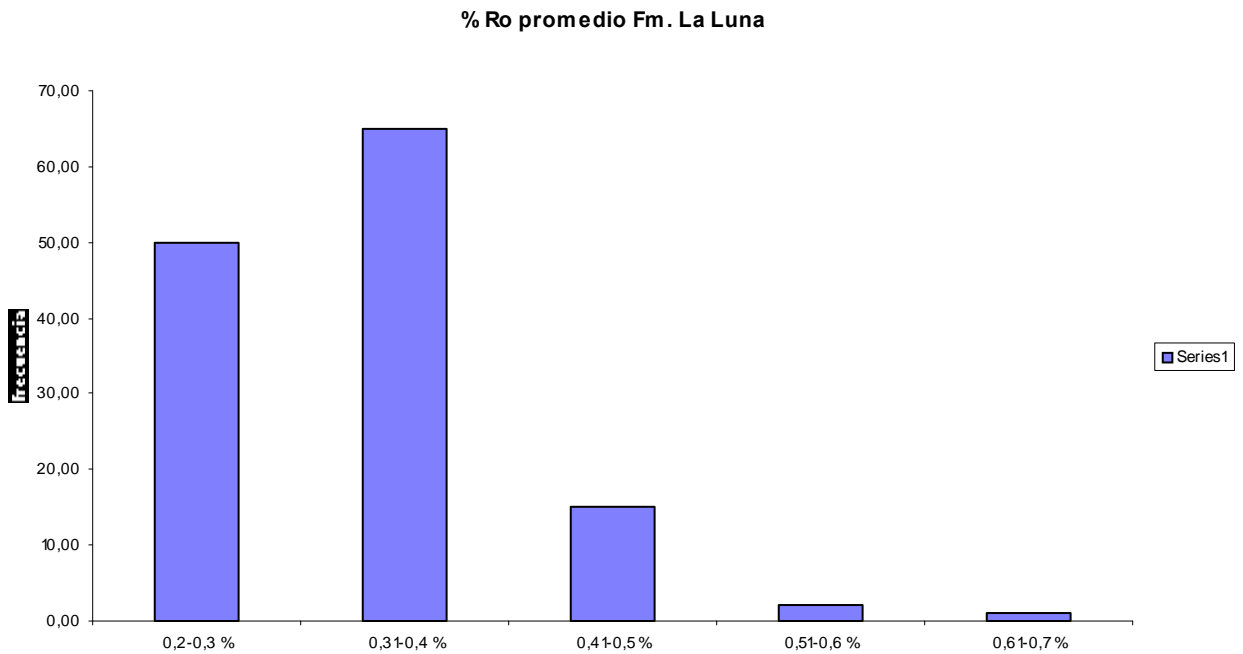


Figura 25. Histograma de distribución de Ro en los 3 miembros de la Formación. La Luna en la sección de la Q. La Sorda.

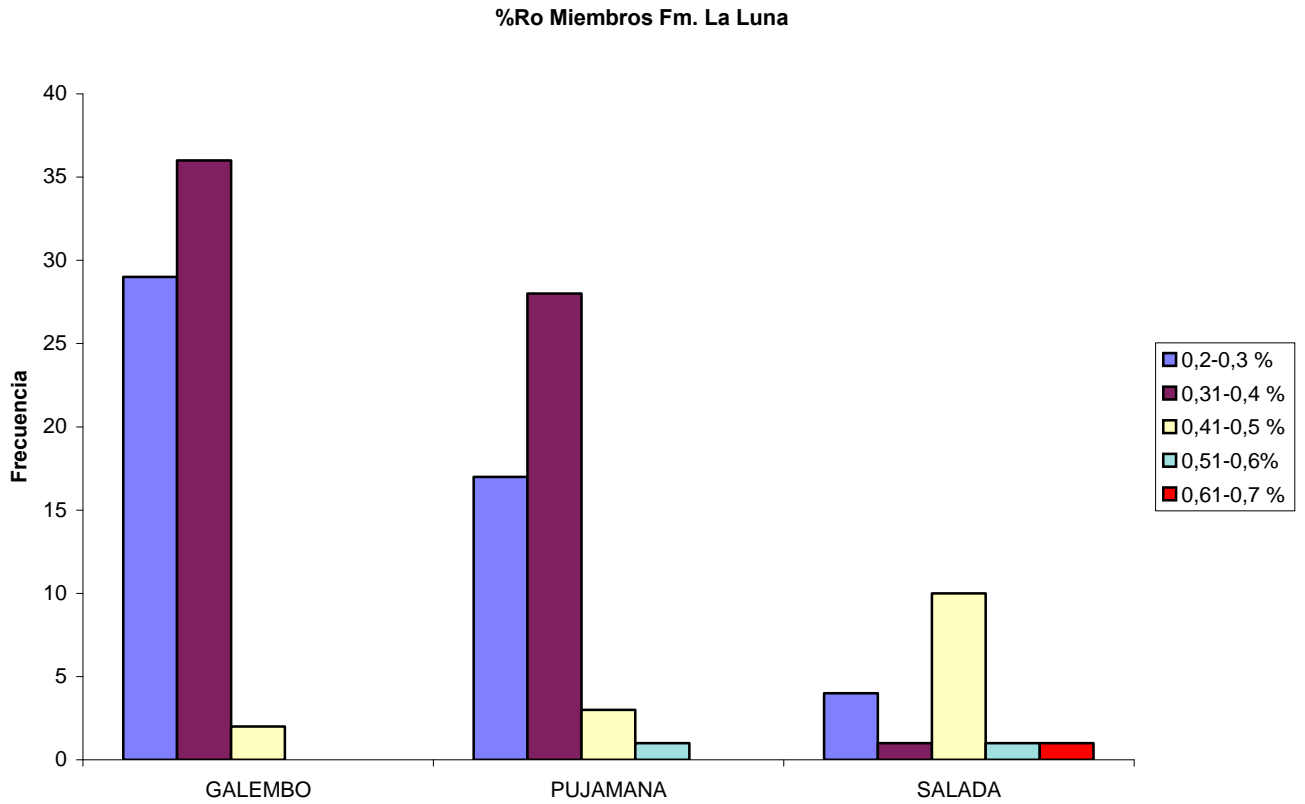
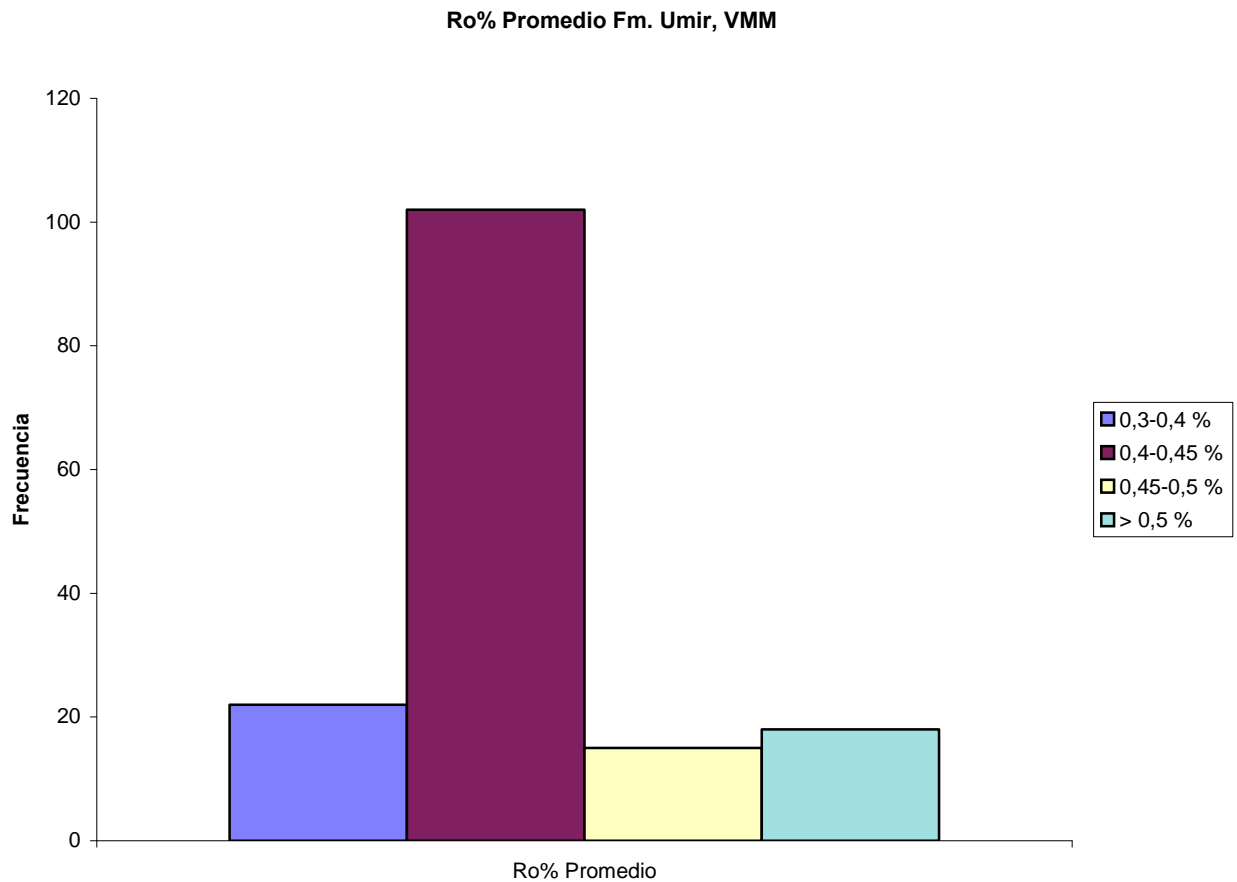
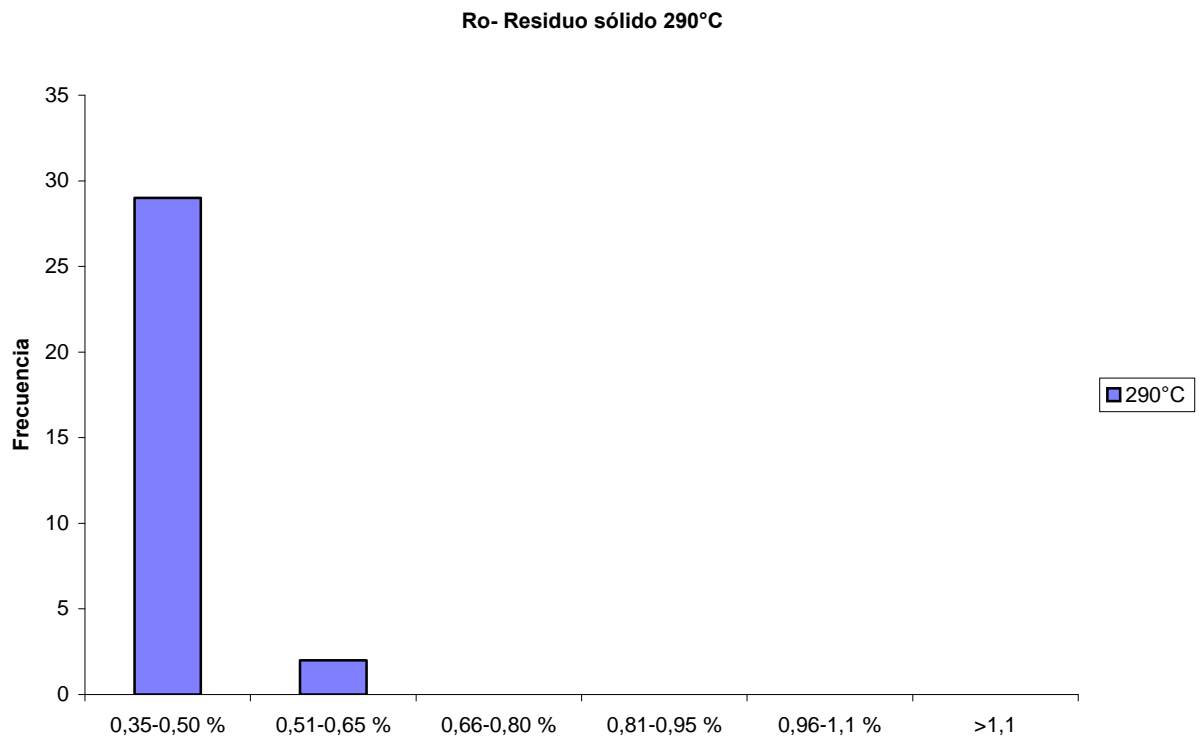


Figura 26. Histograma de distribución de R_o en los mantos de Carbón y shale carbonoso de las mediciones realizadas a la Formación. Umir en la sección de la Q. Mata de Cacao.



Como se aprecia en la figura 26, las muestras analizadas para R_o de la formación Umir, pertenecientes a los mantos de carbón y shale carbonoso de la sección que aflora en la Quebrada Mata De Cacao, presentan valores de R_o en promedio que varían entre 0,40 y 0,49% y que la ubican en un estado termal inmaduro.

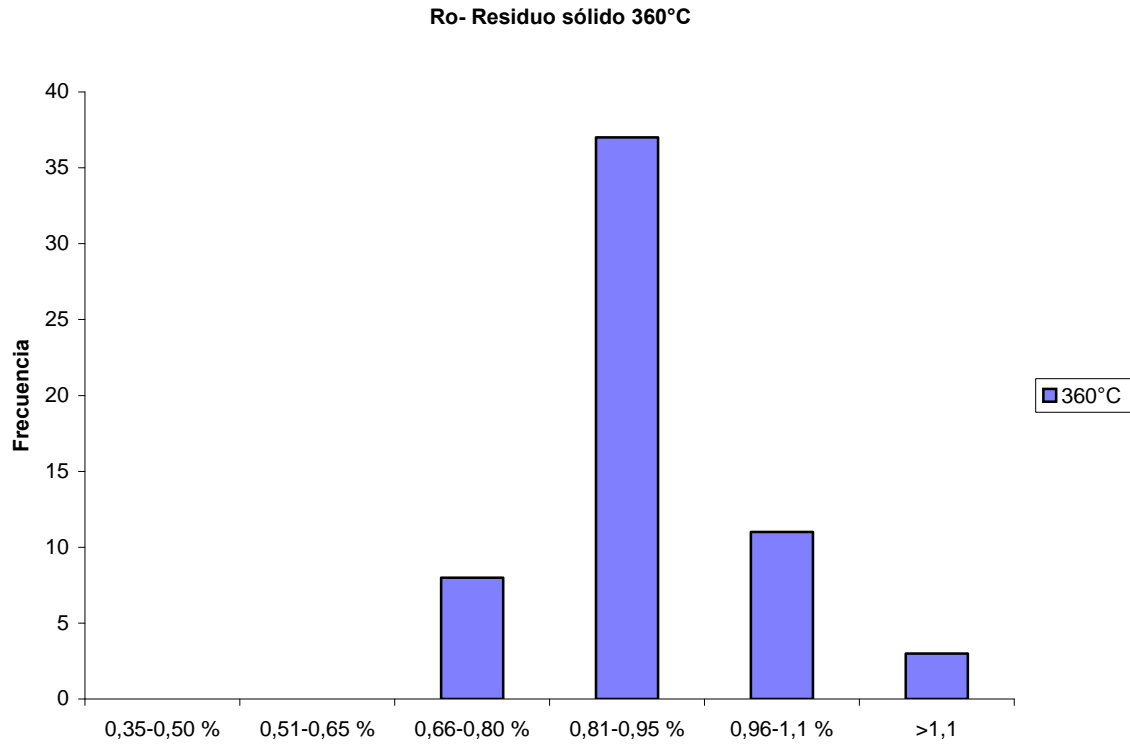
Figura 27. Histograma de distribución de R_o en el residuo sólido de la experiencia de Hidropirólisis a 290°C realizada a la Formación La Luna en la sección de la Q. La Sorda.



Los resultados de las mediciones realizadas al residuo sólido de cada experiencia de Hidropirólisis se aprecian en las figuras 27 y 28.

El residuo sólido de la experiencia a 290°C, perteneciente a una muestra del miembro intermedio y a la microfacies MFP, predominante en el miembro y común en toda la sección, sufrió un incremento en el valor de R_o de 0,36% a 0,42 % en promedio. El residuo sólido de la experiencia a 360°C, experimento un cambio de 0,36% a 0,90% en promedio de R_o .

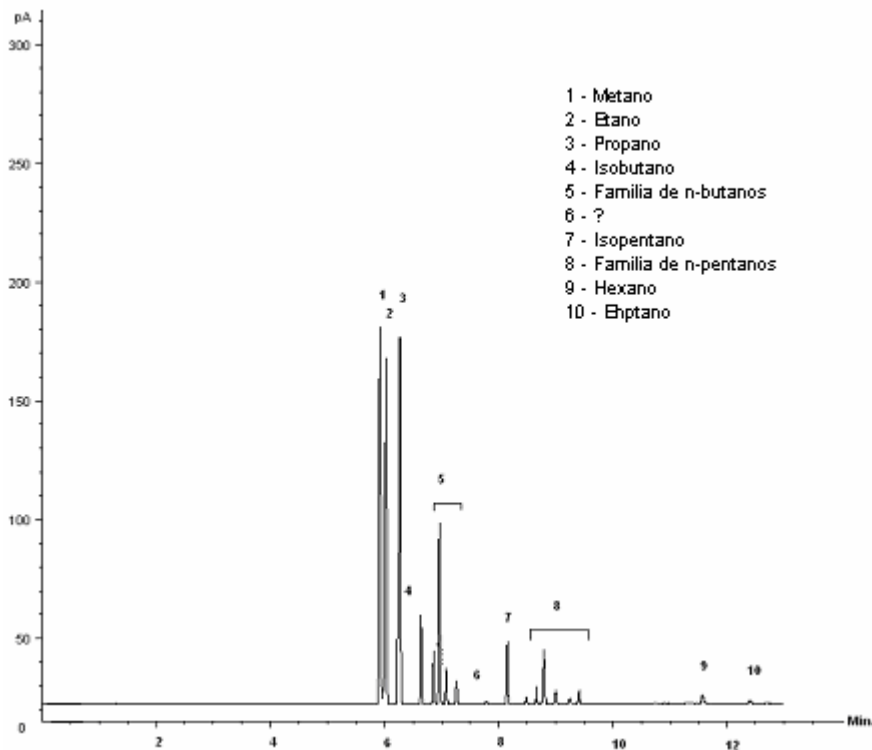
Figura 28. Histograma de distribución de Ro en el residuo sólido de la experiencia de Hidropirólisis a 360°C realizada a la Formación La Luna en la sección de la Q. La Sorda.



4.5 Cromatogramas

Los diferentes gases generados en las experiencias de HP se muestran en la figura 29.

Figura 29. Cromatograma de la mezcla de gases obtenida en la HP para la formación La Luna en la sección la Q. La Sorda.

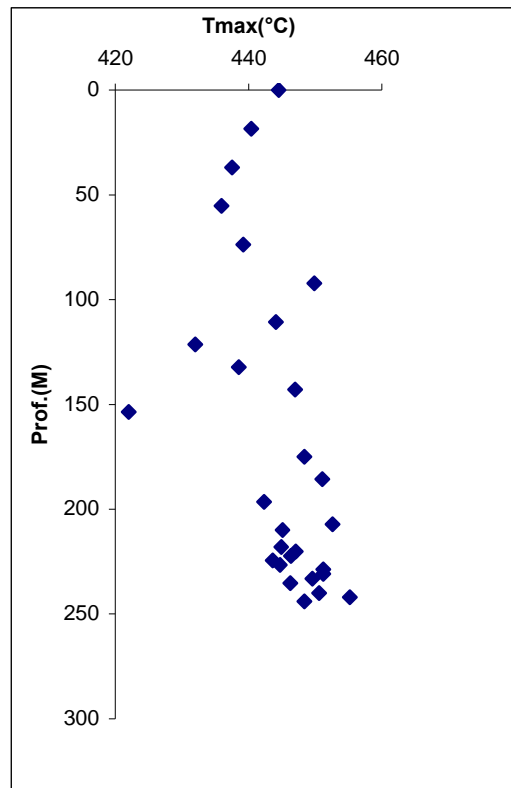


En la figura anterior se observa la proporción entre los hidrocarburos gaseosos obtenidos en la prueba de HP realizada a 360°C; el principal hidrocarburo gaseoso generado es el gas húmedo Propano (C_3H_8) y casi en igual proporción están los gases Etano (C_2H_6) y metano (CH_4).

4.6 Tmax e IH

Los resultados de las pruebas de pirólisis anhídrica (Rock-Eval), se tomaron del trabajo realizado por Esparza & Pineda. (1999) La temperatura máxima de pirólisis (Tmax), como se aprecia en la figura 30.

Figura 30. Tendencias de los valores de Tmax par las muestras de la formación La Luna en la sección de la Q. La Sorda.

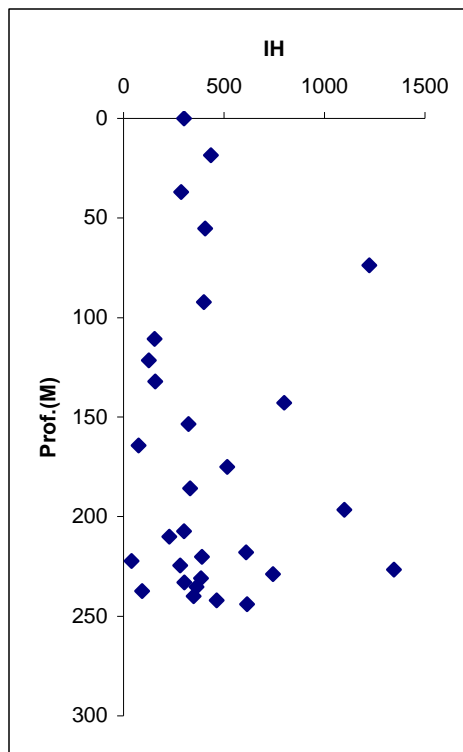


Los valores de Tmax presentan una leve tendencia al aumento hacia profundidad, pero en general el rango de valores se encuentra en un rango de temperaturas de entre 432°C-444°C, indicando que la formación se encuentra en ventana de generación de aceite, de acuerdo con los límites establecidos para

Tmax por Espitalié et al (1986), para muestras de M.O. tipo II sometidas a pirólisis anhídrica.

Los valores de IH registrados para la sección de La Sorda, se encuentran entre 300-600, como se lo muestra la figura 31.

Figura 31. Distribución de los valores de IH para la formación La Luna, sección de la quebrada La Sorda.



Este rango de valores de IH considerado como alto (Price & Barker, 1985), se encuentra asociado a los intervalos de textura fina y que pertenecen a la microfacies MFP, dominante en toda la sección de La Sorda.



4.7 Hidropirólisis (HP)

Para la realización de las experiencias se tuvo en cuenta el siguiente procedimiento:

- Número de experiencias. Se realizaron dos experiencias con el fin de apreciar el comportamiento de la M.O. existente con respecto a parámetros tales como la Reflectancia y la Fluorescencia a temperaturas correspondientes al inicio de la ventana de generación de petróleo y a un estado mas allá del punto de máxima generación (a 290°C y 360°C, respectivamente, Lewan 1993).
- Selección de la muestra. La selección de la muestra para las experiencias de Hidropirólisis se llevó a cabo teniendo en cuenta que la muestra tuviera buenos valores de COT, HI, T_{máx}, facies litológica y orgánica representativa de toda la sección y % Ro <0.5% indicativa de muestras que se encuentran en la etapa de Pre-catagénesis (Diagénesis), de acuerdo con Tissot & Welte (1984, Fig. II, Pág. 161).
- Preparación de la muestra. La muestra fue sometida a molienda de manera tal que el rango en tamaño no se saliera del rango de 0.5-2.0cm.
- Preparación del reactor. El reactor con capacidad para 1L, se llenó con 200 g. de muestra preparada de la Formación La Luna, sin variar esta cantidad para todas las experiencias realizadas. Seguidamente, se prosiguió a llenar el reactor con 500mL. Y 450mL de agua destilada (A.S.T.M. tipo III, Lewan, 1985) para las experiencias realizadas a 290°C y 360°C, respectivamente. El volumen restante de reactor fue purgado y llenado con 20 Psi de He.



- Encendido del reactor y sometimiento de la muestra a temperatura constante (290 y 360°C), durante 72hs.

4.7.1 PRODUCTOS OBTENIDOS EN LA HP

Durante las prueba de HP se generaron tres productos distribuidos en varias fases: Gaseosa, líquida (aceitosa) y sólida; Cada una de estas fases fue envasada con el fin de preservarlas para estudios posteriores.

La fase gaseosa la conforman la mezcla de gases que ocuparon el espacio de cabeza libre del reactor en cada experiencia.

La fase líquida se caracterizó por presentarse en tres estados: como capa sobre el agua, como una mezcla con el agua y como recubrimiento en la estructura del residuo sólido.

La fase sólida se trató de dos formas diferentes para su análisis. El residuo sólido de cada experiencia se separó en dos partes: una parte se trató con percloroetileno para remover al máximo el aceite de su superficie y de la estructura porosa y la otra porción se dejó sin tratar con solvente alguno. Posterior a esto, ambas porciones se secaron al sol por 2h y luego a 60°C por 12h en un horno. Todo lo anterior con el fin de preparar secciones pulidas de este residuo sólido y realizar análisis de microscopia.



4.7.2 CUANTIFICACIÓN DE GASES GENERADOS

La cantidad de gases generados en cada experiencia de hidropirólisis realizada se presenta en moles totales (η). Esta cantidad corresponde a la suma de todos los gases generados durante cada experiencia, utilizando la ley de los gases ideales (tabla 3):

$$\eta = \frac{PV}{RT}$$

Tabla 3. Número de moles totales generadas en cada experiencia de HP

TEMPERATURA (°C)	NÚMERO DE MOLES TOTALES (η)
290	0,045
360	0,097

4.7.3 MOLES DE GAS HIDROCARBURO GENERADO (C1-C5)

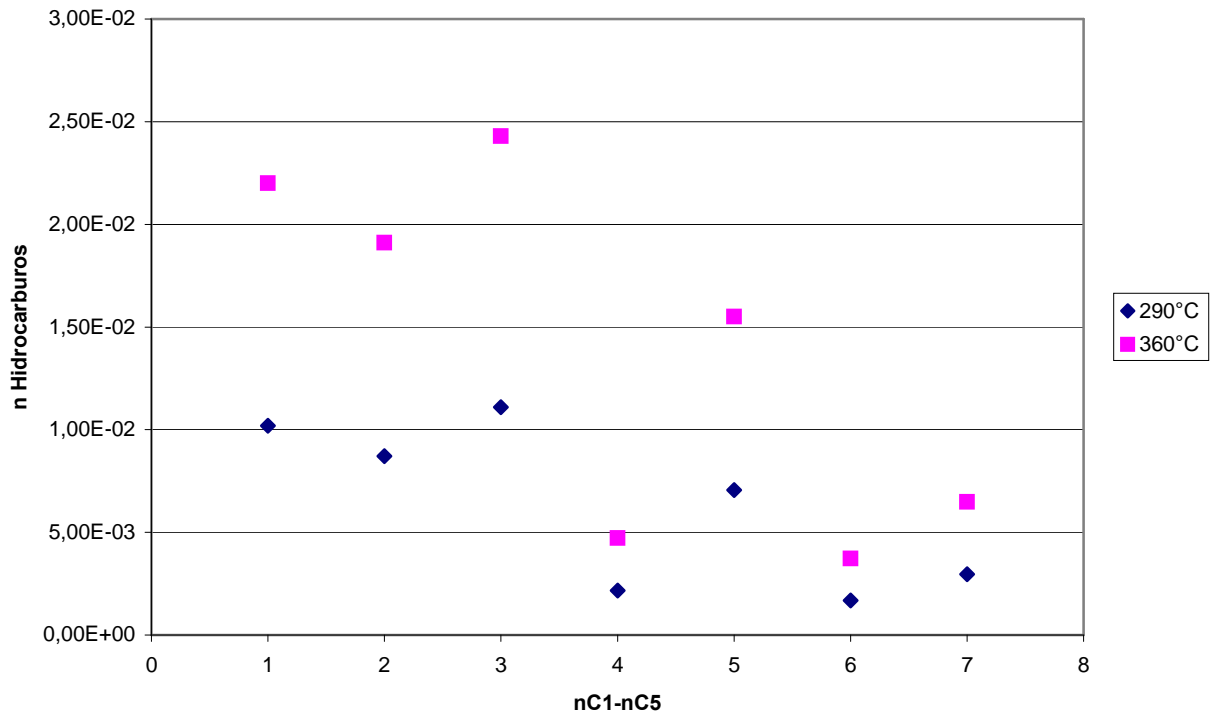
El número de moles de cada uno de los hidrocarburos gaseosos generados en cada experiencia se muestran en la tabla 4 y la figura 32.

Tabla 4. Moles De Hidrocarburos Gaseosos Generados En La HP De La Formación La Luna.

TEMPERATURA	nC1	nC2	nC3	nisoC4	nC4	nisoC5	nC5
290°C	1,02E-2	8,71E-3	1,11E-2	2,16E-3	7,06E-3	1,69E-3	2,96E-3
360°C	2,2E-2	1,91E-2	2,43E-2	4,72E-3	1,55E-2	3,72E-3	6,48E-3



Figura 32. Moles De Hidrocarburos Gaseosos Generados En La HP De La Formación La Luna.



Tanto en la figura 32, como en el tabla3 se aprecia una tendencia paralela de aumento en la composición de los diferentes hidrocarburos gaseosos en respuesta al incremento de temperatura de 290°C a 360°C.

5. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Paleoambiente de Depósito de la Materia Orgánica de la Formación La Luna

El intervalo de tiempo Geológico comprendido entre el Cenomaniano y el Santoniano representado en el VMM, Colombia por la formación La Luna y que ha sido correlacionado con los eventos oceánicos anóxicos globales, OAE2 y OAE3 (oceanic anoxic event, Jenkins, 1980, en Villamil, 1998) identificado a escala mundial, presenta en la sección de la Quebrada La Sorda características sedimentológicas y paleoecológicas bastante particulares.

El siguiente análisis aunque breve, pretende explicar las condiciones bajo las cuales se depositó la M.O. encontrada en la formación La Luna de la sección de la Quebrada La Sorda, la cual difiere de la nomenclatura ampliamente aceptada para caracterizar a la formación.

SEGMENTO INFERIOR

El miembro basal de la formación la Luna en la Quebrada la Sorda y que comprende los últimos 110 metros(figura 43), al punto topográfico mas alto sobre la sección que se encuentra en la quebrada la Sorda, presenta características sedimentológicas de las microfacies (WFP y MFP) y del registro fósil indicadores de un ambiente de baja energía.

La textura de los sedimentos refleja una muy baja tasa de sedimentación. La fauna encontrada es en su totalidad foraminíferos en su mayoría planctónicos, que si bien presentan un grado de preservación bastante bajo lo cual no permitió



su determinación específica, se pudieron diferenciar algunos especímenes de lo que pudieran ser Globigerinidos y *Heterohelix*, encontrados también en secciones correlacionables del VSM y de la Cordillera Oriental (Villamil & Arango, 1998). Los foraminíferos Bentónicos están casi ausentes y su tamaño alcanza solo unas pocas micras.

Figura 33. *Heterohelix* reemplazado completamente por calcita



Evidencias de procesos de diagénesis temprana son la presencia de cementos de calcita fibrosa y la presencia de abundante Pirita framboidal, tanto en cristales individuales, partículas vitrinoides, como reemplazando a algunos foraminíferos; este último también indicador de un ambiente anóxico sulfídico (Berner, 1981), producido casi totalmente por reducción bacteriana de sulfatos a H_2S y HS^{2-} , así como el contenido de azufre total registrado. (0,35% en promedio) Junto con el anterior proceso, tenemos asociada una considerable cantidad de M.O., representada por Vitrinoides. Asociadas a estos vitrinoides se encuentran partículas de Pirita framboidal, las cuales se diferencian de las Piritas



diagenéticas, por que las primeras provienen del azufre contenido dentro de la estructura de la M.O., en este caso los vitrinoides y no por simple interacción con un ambiente anóxico.

SEGMENTO INTERMEDIO

Desde 27 metros hasta 133 metros (figura 43), ascendiendo topográficamente y descendiendo estratigráficamente. La textura de los sedimentos, así como la laminación presente en la totalidad de las muestras analizadas del miembro, son indicadores de un ambiente de muy baja energía; las microfacies (MFP, MB predominantemente y WFP), ratifican este diagnóstico.

Tanto la textura mencionada como la laminación, son también indicadores de una tasa de acumulación de sedimentos bastante baja, inclusive mucho más que en el miembro anteriormente descrito.

La paleofauna presente es principalmente de foraminíferos planctónicos, aunque aumenta la presencia de pequeños foraminíferos Bentónicos hacia el tope del miembro. El estado de preservación del registro fósil es bajo, impidiendo su determinación específica, aunque se alcanza a apreciar que algunos de los especímenes son Bolivinoideos y algunos lituoláceos.



Figura 34. Lituolaceos con contenido de M.O.A. fluorescente dentro de las cámaras de sus conchulas. a) y c) luz blanca. b) y d) luz azul UV

a)



b)



c)



d)



Las fases diagenéticas presentes son Pirita y cementos de carbonato, al igual que en el miembro anteriormente descrito, aunque en este caso, el contenido de Pirita, tanto framboidal como diagenética es mayor.



Figura 35. a) pirita reemplazando a foraminíferos planctónicos. b) pirita framboidal dentro de un vitrinoide.

a)



b)



El ambiente de depósito de la M.O. en este segmento de la Formación La Luna, se presenta en condiciones muy parecidas a las del segmento que lo infrayace estratigráficamente, como lo evidencia el aumento en la cantidad de pirita, principalmente, así como los foraminíferos reemplazados a cemento calcáreo (Sparita), llevando a la columna de sedimentos a eliminar el efecto de la bioturbación, aumentando la relación empírica entre las condiciones descritas y el contenido de lípidos marinos y la M.O. de origen terrestre. (Tyson, 1987)

SEGMENTO SUPERIOR

La textura de los sedimentos evoluciona de base a techo del segmento del inicio de la sección e la quebrada la sorda hasta 26m (figura 43), descendiendo estratigráficamente, de una textura fina representada por las microfacies WB y MB y MFP, a una textura gruesa representada por la facies PBR y PBo, mostrando el cambio de un sistema de baja a media energía a uno de alta energía. La bioturbación esta presente de manera diferencial a lo largo de toda la columna del miembro; madrigueras (burrows) en muestra de mano (Villamil & Arango, 1998) y Borings en sección pulida son los tipos de bioturbación mas claros

El registro fósil es bastante amplio. Tanto foraminíferos planctónicos como Bentónicos se encuentran en gran número, en diversos tamaños y con un grado de preservación variable, dentro de los que se diferencian Bolivinoideos, lituolaceonoides, ortokarslenoides? (bentónicos), Globigerinoides, Heterohelix. (Planctónicos)

La ocurrencia de ooides, oncoides y peloides se presenta en las facies de grano grueso (packstone y algunas wackestone); algunos de estos peloides oncoides y ooides se encuentran fosfatizados.



Muchos de estos icnofósiles se presentan al parecer intercrecidos con M.O., dando una apariencia opaca al microscopio, lo cual podría estar indicando un mecanismo adicional de conservación de la misma.

El ambiente de depósito que aquí se plantea para la M.O. de la Formación en la sección de la quebrada La Sorda, de acuerdo a la evidencia expuesta en los párrafos anteriores, es un ambiente de plataforma carbonatada restringida con base en las siguientes observaciones (Sonnenfeld, 1993):

Se tiene, una secuencia carbonatada lodosa (James 1977 en Scholle, 1998) dominada por las facies Wackestone y mudstone

(Texturas dominantes en facies de plataforma), la cual es rica en M.O. y presenta una evolución de base a techo de condiciones anóxicas (H_2S disuelto) a condiciones disaeróbicas-anaeróbicas (1.0-0.1 y 0.1-0 ml/l de O_2 disuelto en el agua; Tyson, 1987). Este agotamiento del oxígeno se presenta tanto por circulación nula de la masa de agua como por consumo total de este oxígeno disuelto por parte de los organismos presentes.

Estas condiciones de anoxicidad fueron provocadas, según la evidencia registrada en los segmentos basal e intermedio, por la restricción a la circulación ejercida por acción de una barrera natural sobre la masa de agua restringida o como lo es en este caso, debido tanto a un efecto parecido al de la humedad provocado por una vasta extensión de agua poco profunda y a la restricción al océano ocasionada por la presencia de arenas Oolíticas, arenas que se encuentran presentes en el miembro superior de la sección.

Esta restricción al océano se puede en segmento del empobrecimiento en la fauna así como de las litofacies presentes en la columna, la presencia de piritita en abundancia y el gran contenido de M.O. representado en los altos valores de TOC.

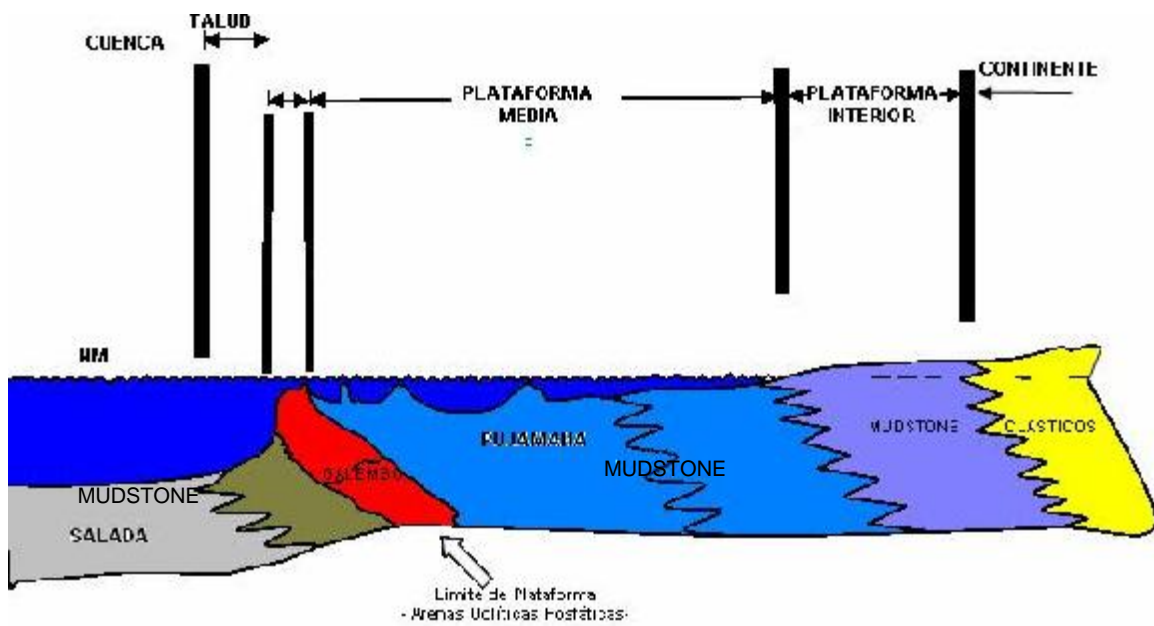


El registro fósil presente es también una señal de tales condiciones de restricción; la paleofauna encontrada presente en los miembros basal e intermedio de la formación, se presenta en baja diversidad pero en gran número de individuos.

El escenario en el cual se depositó la M.O. de la Formación La Luna en la sección de la quebrada la sorda, presenta condiciones excepcionales para la depositación y la preservación de la M.O., típicas de plataforma carbonatada restringida y que si bien, los 3 miembros de la Formación La Luna abarcan su depositación desde el Cenomaniano hasta el Santoniano, pertenecen al mismo estilo deposicional, dominante a lo largo de estos pisos del Cretácico Superior, donde la Formación La Luna presenta las variaciones laterales típicas de este ambiente (Figura 36): El miembro salada muestra las microfacies y las condiciones más distales del contacto con el Océano, evidente en su escasez de registro fósil, así como de su contenido de Pirita y demás indicadores expuestos; el miembro intermedio presenta condiciones de mayor anoxicidad debidas muy posiblemente a una superpoblación de los organismos que habitaron este sector de la plataforma, agotando tanto el oxígeno disuelto disponible, como los nutrientes, sin una posible recarga debido a las condiciones de restricción existentes. Evidencia de esto es el aumento del registro fósil y la cantidad de pirita presente con respecto al miembro basal. La abundancia de partículas vitrinoides son un indicador de la posición del miembro dentro de la plataforma, pues como se expuso, son al parecer los mismos vitrinoides de mayor tamaño encontrados en el miembro basal, solo que han sufrido transporte por una mayor distancia; el miembro superior representa la barrera natural que impide el intercambio de la masa de agua de la plataforma con el océano, además de ser parte de la zona de mayor oxigenación de toda la formación, como lo expresa su registro fósil, en el cual presenta la aparición de las arenas Oolíticas fosfáticas (oomicritas o packstone de ooides), aumento en cantidad de especies, tamaño, # de especímenes y grado de preservación, así como la ausencia casi total de Sulfuros de Hierro (pirita) y partículas vitrinoides.



Figura 36. Ambiente de depósito de la formación La Luna, sección la Sorda. (Modificado de Scholle et al, 1998).



5.2 Problemas en la identificación de partículas de kerógeno tipo III en la formación la luna, sección de la quebrada la sorda

El kerógeno tipo III esta compuesto por M.O. derivada de plantas superiores de origen continental, cuyo componente más representativo es la Vitrinita. La vitrinita es un maceral originado por plantas terrestres y que madura a lo largo del sendero del kerógeno tipo III, de acuerdo con el diagrama de Van krevelen. Sus macerales más representativos son la Telinita y la Colinita. La primera es el remanente de las paredes celulares de las plantas terrestres y la segunda es una vitrinita carente de estructuras (Tissot & Welte, 1984).

Por lo tanto, las rocas que mayor porcentaje de vitrinita poseen, son aquellas en las que las condiciones para el depósito y preservación de la misma sean las óptimas, es decir, alta tasa de suministro de M.O. proveniente de plantas superiores, bajo aporte de sedimentos terrígenos (taza de sedimentación baja) y tasa de subsidencia baja, condiciones que se dan excepcionalmente en la formación de los mantos de carbón (Bohacs & Sutter, 1997). En la medida en que se alteren estas condiciones, se reducen las probabilidades de que dicha M.O. se preserve.

Tales condiciones se alteran de manera considerable a medida que el ambiente de depósito se hace más y más distal de la fuente de este tipo de M.O.

La formación La Luna en el VMM, al haberse depositado en un ambiente de plataforma media restringida carbonatada (como se planteo anteriormente), generó un detrimento en la cantidad de M.O. de origen continental que se llegó a preservar hasta su depósito en el ambiente planteado. Partiendo de lo anterior podemos inferir que la ubicación del ambiente deposicional de la formación La Luna en la sección de la Q. La Sorda, es la primera limitante a la hora de buscar en esta formación por partículas de vitrinita, debido al transporte y la oxidación a la que son expuestas las partículas, lo cual reduce sus posibilidades de



preservación, como ha sido mencionado en todos los estudios previos (Rangel et al, 2000; Pineda & Esparza, 1999; Ramón et al, 1999).

Adicional a lo expuesto, se suma una situación bastante particular: asociación de calcita a las partículas de M.O. Esta asociación se pudo apreciar en las muestras analizadas de los 3 segmentos de la formación La Luna en la sección de la Q. La sorda, correlacionables con los miembros Salada, Pujamana y Galembó designados por Morales (1958), en las cuales se encontraron partículas vitrinoides.

La asociación se presenta principalmente como intercrecimiento entre este tipo de calcita y partículas vitrinoides, pero también se encuentra como una especie de calcita “vitrinizada”, término empleado para resaltar la apariencia visual de este tipo de calcita cuando se encuentra como partícula independiente.

Figura 37. Vitrinoides intercrecidos con calcita. a) miembro Salada. b) miembro Pujamana c) calcita gris en el miembro Pujamana.

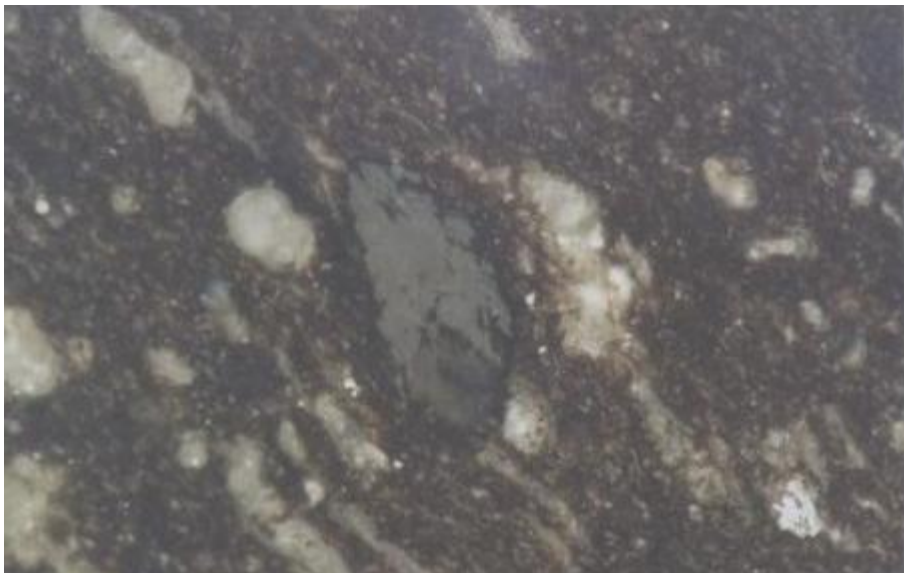
a)



b)



c)



Al atacar las secciones pulidas con HCl, las partículas con los mayores valores de R_o desaparecieron, factor que disipó la controversia sobre el origen de tales partículas.

Los valores de R_o obtenidos para tales partículas de Calcita hubiesen llevado a erradas interpretaciones acerca del nivel de madurez termal de la formación, ubicándola dentro de la ventana de generación de hidrocarburos a la porción de la formación que aflora en la sección de la Quebrada La Sorda.

La reflexión que deja esta situación, es el por que de la ocurrencia de esta clase de calcita en asociación con M.O. proveniente de plantas superiores, para posibles estudios futuros.



5.3 Supresión de Reflectancia de Vitrinita en la Formación La Luna

La diferencia en los valores de R_o medidos para la formación La Luna, en la sección de la Q. La Sorda entre los diferentes estudios realizados a esta sección (Rangel et al, 2000; Ramón et al, 1999 entre los más notables), en contraste con los promedios de R_o encontrados en el presente proyecto de investigación, se ha planteado en este trabajo una discusión sobre la posibilidad de que exista supresión de la reflectancia de vitrinita (R_o) de la en la formación La Luna en la sección de la Q. La sorda.

La supresión de la R_o en potenciales rocas generadoras de hidrocarburos ha sido reportada en diversos estudios (Barker & Lewan, 2004; Petersen, & Vosgerau, 1999; Suárez-Ruiz et al, 1994; Raymond & Murchison, 1991; Price & Barker, 1985; Lewan, 1985) y es posible reconocerse en formaciones con bajos valores de R_o , pertenecientes a intervalos que se encuentran dentro de la ventana de generación de aceite. Esta identificación es especialmente difícil cuando dentro de la secuencia sedimentaria no se encuentran presentes estratos de carbón para emplear los valores promedio de R_o de estos mantos como referencia.

Es por esto que se ha empleado a la hidropirólisis como herramienta para madurar artificialmente las muestras de la formación La Luna y apreciar el comportamiento de los valores promedio de R_o a medida que se madura la roca. La hidropirólisis como medio para identificar posibles fenómenos de supresión de R_o en muestras de roca potenciales generadoras de hidrocarburos, es una herramienta simple y objetiva. (Lewan, 1993)

Para la identificación de un posible fenómeno de supresión de R_o en la formación La Luna de la Q. La sorda, se utilizaron como referencia valores promedio de R_o en muestras de mantos de carbón de la formación Umir (Maastrichtiano) de la sección que aflora sobre la Q. Mata De Cacao, formación que sucede estratigráficamente a la formación La Luna y cuyo nivel de madurez



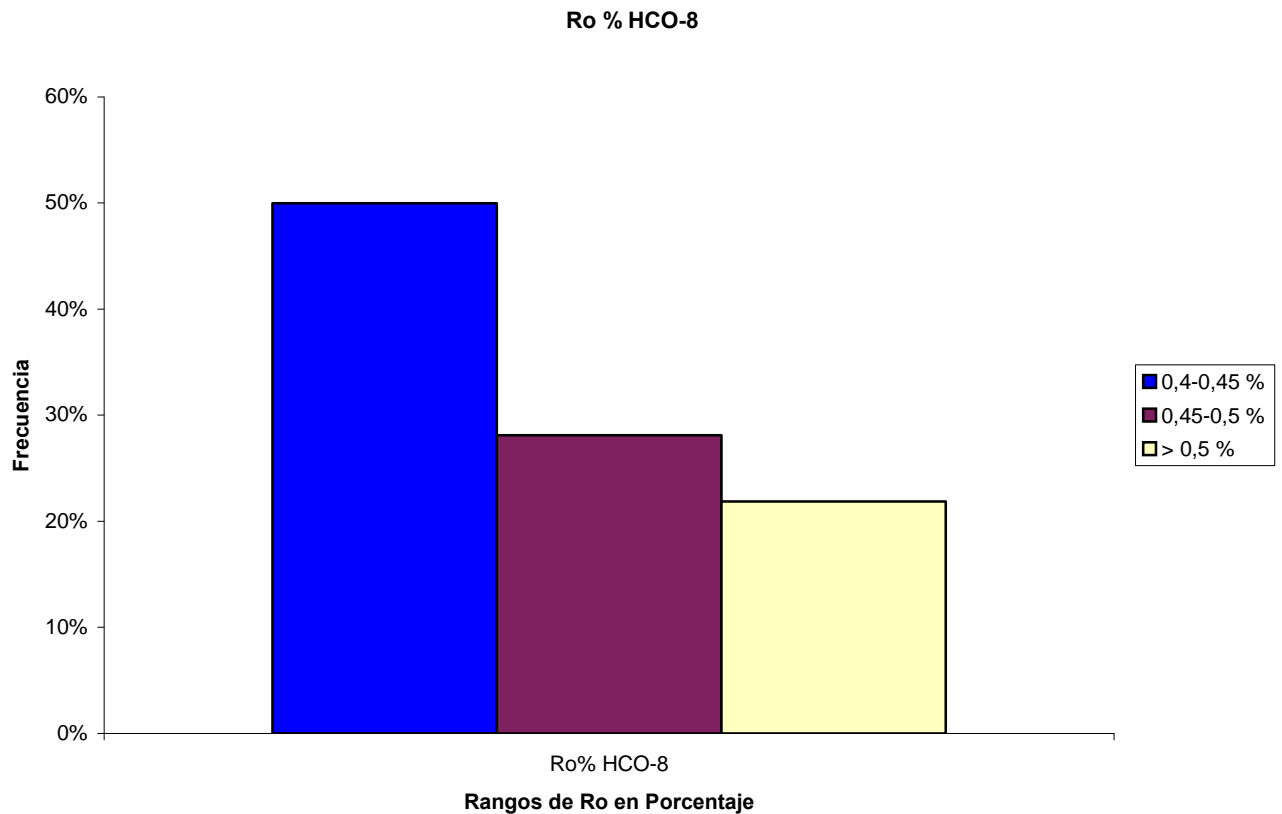
termal la clasifica como marginalmente madura (Rangel et al, 2002) y cuyos valores promedio de Ro registrados en este estudio se encuentran en la figura 38

El valor de Ro que se utilizó en el presente estudio como valor de referencia para los datos de Ro de la formación La Luna de la sección de la Q. La Sorda pertenece al manto de carbón estratigráficamente mas cercano a la formación La Luna, el cual presenta un valor promedio de Ro de 0,49%, muy acorde Con los valores presentados por Rangel et al (2002) para la formación Umir (0,5-0,56%) y que además presenta valores de Tmax entre 433°C-438°C y que clasifican a la sección como marginalmente madura, según Tissot & Welte (1984).

La formación La Luna como se expuso en capítulos anteriores, presenta valores de Ro en promedio de 0,36% mostrando inmediatamente diferencias significativas en el nivel de madurez termal registrado por este parámetro. Adicionalmente, evidencias de campo como el fuerte olor a aceite hidrocarburo en ambas formaciones y la presencia de capas e las cuales se aprecia el aceite como tal después de ser expulsado de la roca en la sección de la Q. La Sorda, evidencian fenómenos de supresión.



Figura 38. Histograma perteneciente al primer manto de carbón de la formación Umir analizado en este proyecto.



La petrografía orgánica de los residuos sólidos de la HP, así como los valores de Tmax de los mismos, muestran de igual forma algunas evidencias discrepantes con respecto a los valores de Ro.

Para la experiencia a 290°C, la M.O. mostró fluorescencia naranja- amarillenta, característica ausente en la muestra original y que además la ubica en una etapa

temprana de generación de aceite y gas, apreciación que se corrobora con la presencia de las fases líquida y gaseosa generadas a esta temperatura y que contrasta con el leve incremento de $R_o = 0,42\%$, el cual indica que la roca se encuentra inmadura aun. El residuo sólido pasó de un T_{max} de 437°C de la muestra original a 442°C , mostrando de igual forma que la roca se encuentra dentro de la ventana de generación de aceite.

A 360°C , las cantidades de gas y aceite producidas se incrementan considerablemente, pasando de $0,045n - 0,097n$ para el gas hidrocarburo generado. Bajo estas condiciones extremas de generación, el valor de R_o mostró un incremento hasta alcanzar $0,90\%$ en promedio, indicando que se encuentra a mitad de la ventana de generación. Los datos de fluorescencia y de T_{max} muestran de nuevo, otro estado de madurez al registrado por las mediciones de R_o . La fluorescencia de la M.O. desapareció completamente de la roca, posiblemente como consecuencia del consumo de todas las partículas de origen liptinítico que podrían desarrollar esta reacción al aumento de la temperatura, mostrando que la roca se sobremaduró. Adicional a esto, la roca se hizo más porosa y frágil. El valor de T_{max} que arrojó el residuo sólido fue de $466,9^{\circ}\text{C}$, señalando que la roca se encuentra ya en ventana de generación de gas.

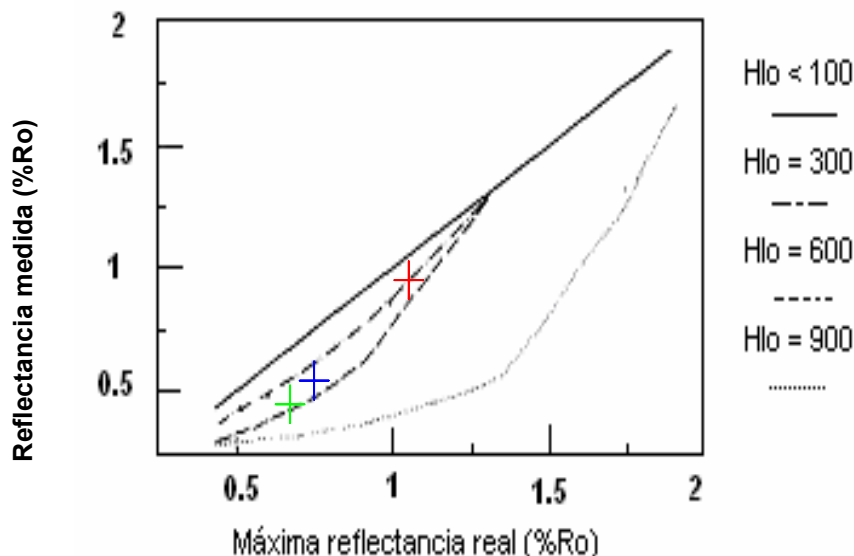
La causa responsable de estos fenómenos de supresión para la formación La Luna en la sección de la Quebrada al Sorda es la riqueza en Hidrógeno que presentan la mayoría de las litofacies que conforman la sección, que presenta valores de IH en rango de 300-600, como se aprecia en la figura 30 y que ha sido señalado como factor crítico causante de los fenómenos de supresión en kerógenos con alto índice de Hidrógeno. (Barker & Lewan, 2004; Lewan, 1993; Lo, 1993; Wilkins, 1992; Price & Barker, 1985; Hutton & Cook, 1980)



Los valores de R_o de las experiencias de hidropirólisis fueron corregidos para supresión utilizando la técnica descrita por Lo (1993), recomendada por el profesor M. Lewan (comunicación escrita), para correcciones por supresión en muestras con alto índice de Hidrógeno.

Como se aprecia en la figura 39, los valores de R_o corregidos para la muestra original y para los residuos sólidos de las experiencias de hidropirólisis a 290°C y 360°C son 0.75%, 0.80%, 1,00% respectivamente. La diferencia en el valor de R_o medido del residuo sólido de la experiencia a 360°C y el corregido para supresión es de solo 0.1%, corroborando lo discutido por Lewan (comunicación escrita; Lewan, 1993), quien que debido a los notablemente mayores niveles de tensión termal a los que esta expuesta la M.O. a temperaturas > 340°C, las diferencias en R_o medida – R_o corregida disminuyen considerablemente hasta hacerse insignificantes a valores de R_o mayores a 1.8%.

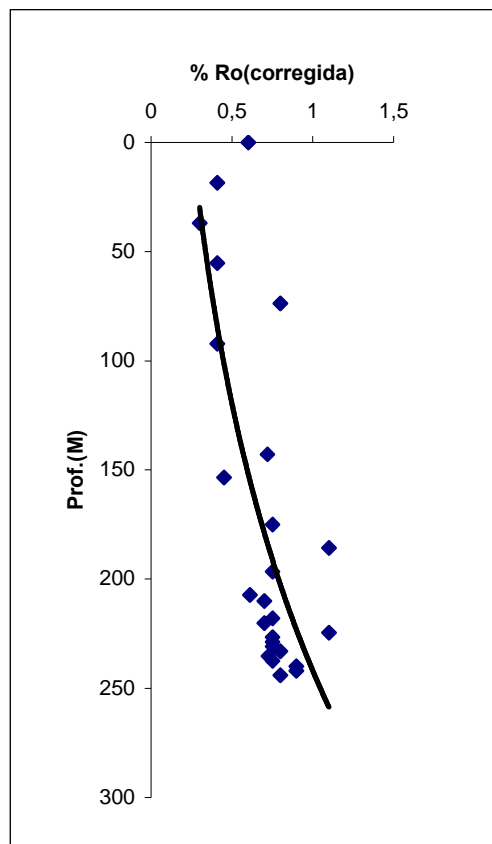
Figura 39. Diagrama de modelo de corrección de valores de R_o cuando la supresión es causada por altos IH. (Modificado de Lo, 1998 y 1993)



Las marcas verde, azul y roja pertenecen a los valores de Ro de la muestra original, residuo sólido de la experiencia a 290°C y residuo sólido de la experiencia a 360°C, respectivamente.

Teniendo en cuenta que según las evidencias expuestas si existen fenómenos de supresión en la formación La Luna, se corrigieron los datos de Ro de todas las muestras seleccionadas, pertenecientes a los 3 intervalos, y que se aprecian en la figura 40.

Figura 40. Diagrama de tendencia de los valores de Ro corregidos para la sección de La Sorda



Como se ve, los valores de Ro presentan la misma tendencia en profundidad que los valores sin corregir de la figura 23.

Los valores de Ro sin corregir para la formación La Luna se encuentran en un rango entre 0.3-0.39%, como se muestra en la figura 23. Después de efectuar las correcciones por supresión, los rangos de Ro se encuentran entre 0.79-0.83%, concluyendo que la formación La Luna en el sector occidental del VMM se encuentra madura termalmente y en ventana de generación de aceite.



5.4 Madurez Termal de la Formación La luna

La Formación La Luna del Cretácico superior en Colombia, ha sido considerada como la roca responsable de los principales pulsos de generación de hidrocarburos en la cuenca del VMM. (García & Parra, 2003; Mora et al, 2002; Ramón et al, 1999; Talukdar, 1986; Zumberge, 1984) Por esta razón, cualquier aporte relacionado con su nivel de madurez termal debe considerarse valioso.

García y Parra (2003), registran valores menores a 0,6% en promedio para el sector occidental del VMM y valores entre 0.6% – 0.8% para el sector centro y oriente de la cuenca. Este estudio no consideró los múltiples factores que afectan el valor real de Ro alcanzado por la materia orgánica de la formación La Luna, así como tampoco consideran la supresión de los valores de T_{máx} en rocas con altos índices de Hidrógeno (IH). Como se aprecia en las figuras 41 y 42, la formación La Luna se encuentra inmadura termalmente en gran parte de la cuenca, según el modelamiento efectuado con los datos de Ro sin corregir para supresión.



Figura 41. Mapa de madurez termal de la formación La Luna y formaciones equivalentes. (Tomado de García y Parra, 2003)

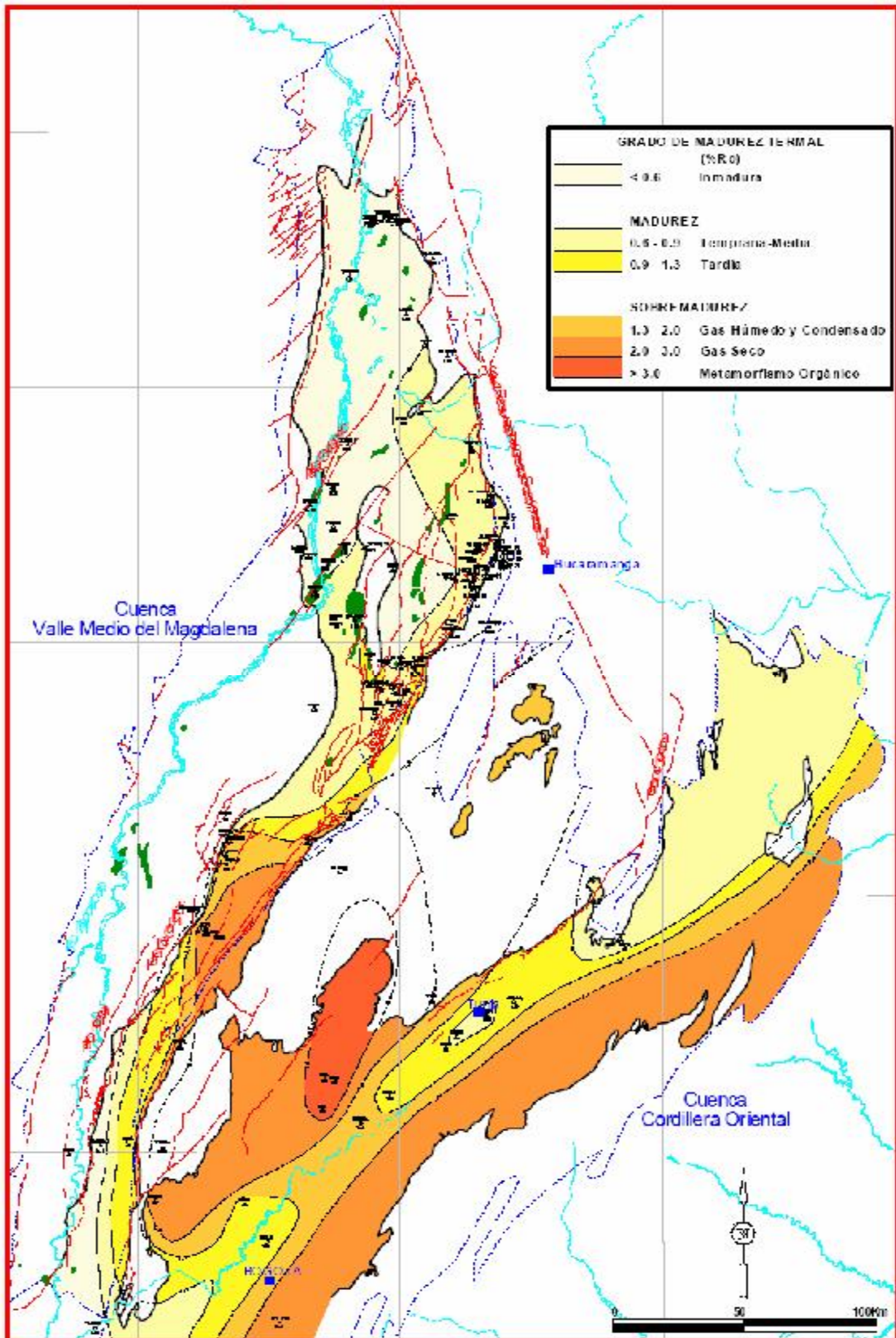
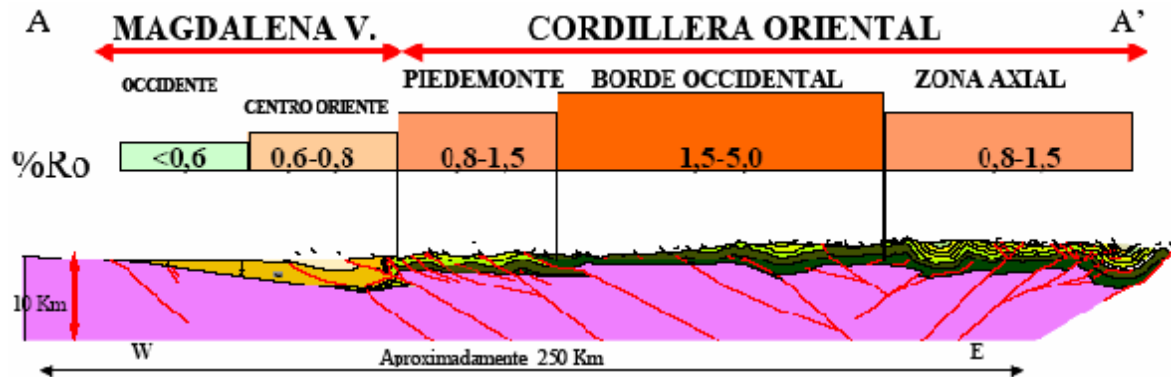


Figura 42. Esquema estructural y valores promedio de R_o para el VMM y el flanco occidental de la cordillera oriental. (Tomado de García y Parra, 2003)



Al efectuar correcciones por supresión de R_o de la formación La Luna, los sectores inmaduros entrarían ahora en ventana de generación de aceite, registrando en algunos sectores sobremadurez.

La figura 43 es la nueva tendencia de zonación termal para la Formación La Luna en el sector del VMM. La figura 44 muestra las tendencias en profundidad de los valores de R_o corregidos, T_{max} . e I_H , para la sección de la quebrada la Sorda La formación La Luna de acuerdo a todas las consideraciones geoquímicas, se encuentra madura termalmente.

Figura 43. Mapa de madurez termal corregida de la formación La Luna en el VMM (modificado de García et al, 2003)

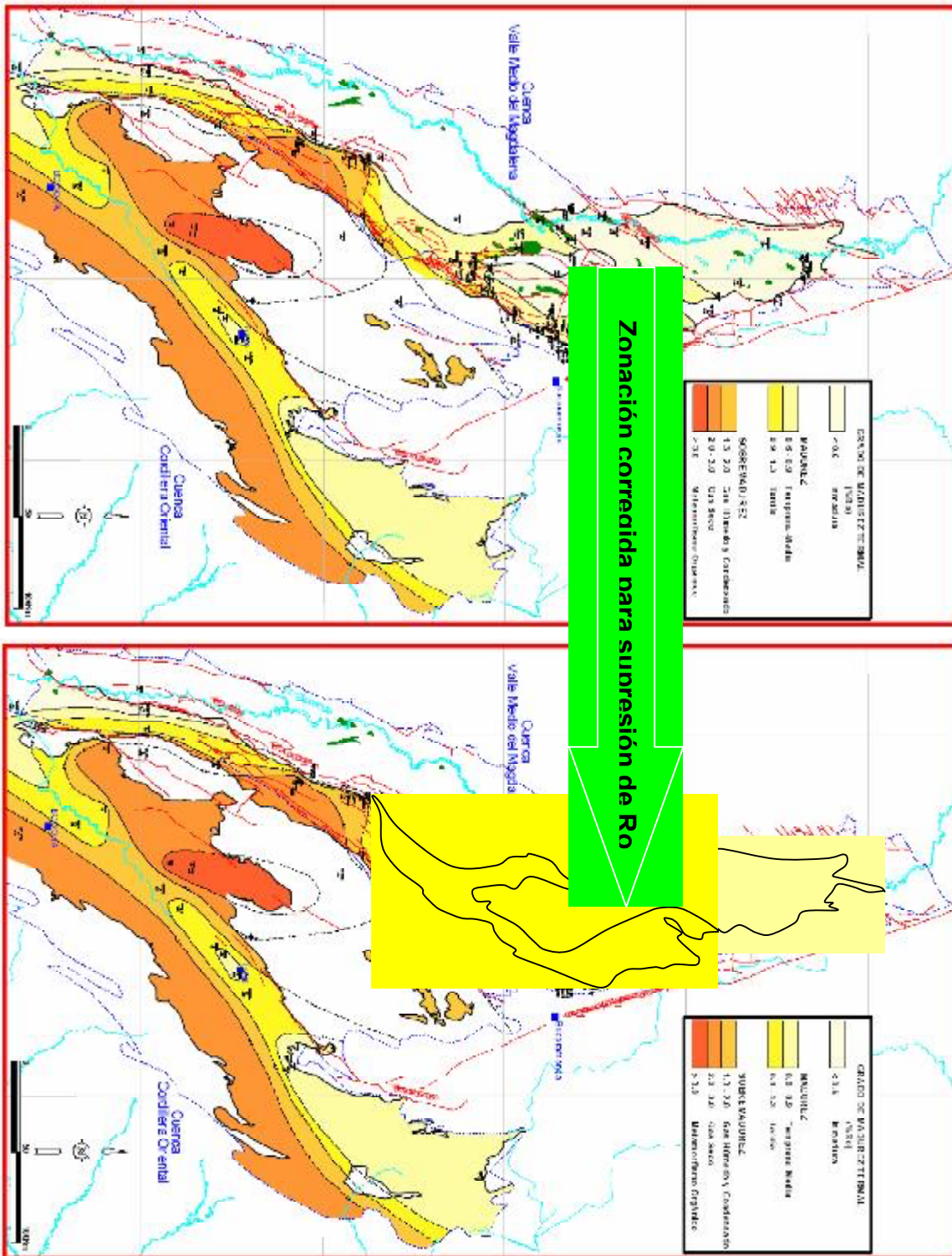
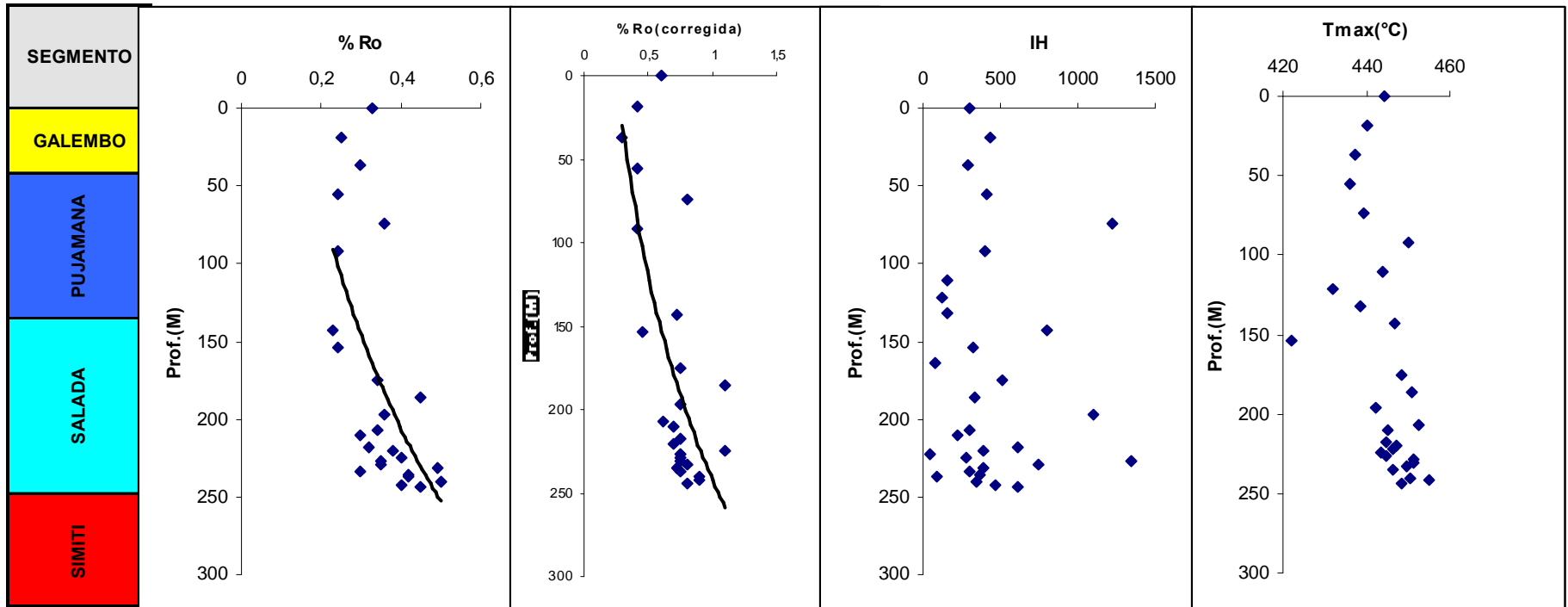




Figura 44. Distribución de R_o , R_o corregida, I_H , y T_{max} en los 3 miembros de la sección de la Quebrada La Sorda



6. CONCLUSIONES

La Formación La Luna presenta altos contenidos de COT (3%-5,02%), que la clasifican como una roca fuente con un potencial de generación excelente, según la clasificación de Reed (1976), para rocas carbonatadas. Además, las grandes cantidades de moles de gas hidrocarburo(C1-C5), generadas de las experiencias de HP (0,097n), así como la gran cantidad de aceite cualitativamente apreciada, corroboran tanto la apreciación aquí mencionada, como las reportadas en estudios previos.

La formación La Luna en el sector occidental de la cuenca del VMM, se encuentra en ventana de generación de aceite, de acuerdo con los resultados que arrojaron tanto las pruebas de HP, la fluorescencia observada de la M.O.A, como las correcciones realizadas a los valores de Ro en toda la sección de la Quebrada la Sorda, que alcanzan los 0,81% en promedio.

La materia orgánica de la formación La Luna presenta fenómenos de supresión de Ro , apreciables por los bajos valores de reflectancia de sus partículas, cuando otras evidencias de madurez termal como lo son la fluorescencia y el aceite encontrado en las cámaras de las conchulas de los foraminíferos que hacen parte de su registro fósil , así como el crudo presente en los afloramientos y las grandes cantidades de aceite generadas a 290°C, considerada como temperatura inicial para la generación de hidrocarburos, contrastan en la evaluación termal. La causa de estos fenómenos de supresión de Ro es el alto contenido de Hidrógeno (IH), en un rango de entre 300- 600.

Tales fenómenos de supresión, así como las depresiones en los valores de Tmax, son inconvenientes presentes en las cuencas con formaciones correlacionables con la formación La Luna, como el grupo villeta en el VSM y formaciones Gachetá y Chipaque en la cordillera oriental y Piedemonte llanero, por lo que la metodología planteada en el desarrollo de este



proyecto de investigación reduciría en gran parte los riesgos exploratorios en cada una de las cuencas mencionadas.

Se ha planteado aquí una nueva hipótesis acerca del posible escenario ambiental en el cual tuvo lugar el depósito de la formación La Luna, de acuerdo con las evidencias petrográficas que indican que en la sección de la sorda existió una plataforma carbonatada restringida, como se aprecia en la figura 35.

Al emplear a la Ro como parámetro para evaluar el nivel de madurez termal alcanzado por una roca, se tienen que tener en cuenta los múltiples factores que afectan este indicador termal (oxidación, Supresión, IH) y que para cada cuenca estos “inconvenientes” se comportan de manera distinta y que consecuentemente llevan a erradas evaluaciones acerca del nivel de madurez termal alcanzado por una roca.



7. REFERENCIAS CITADAS

- Adams, A.E.; Mackenzie, W.S; Guilford, C. Atlas De Rocas Sedimentarias. 1997.
- Barker, C.E., 1991, an Update on the Suppression of Vitrinite Reflectance. TSOP Newsletter, V. 8, No. 4, P. 8-11.
- Barker, Ch. A Comparison Of Vitrinite Reflectance Measurements Made On Whole-Rock And Dispersed Organic Matter Concentrate Mounts. Organic Geochemistry. Vol. 24, No. 2 Pag.251-256.1996.
- Barker, Ch.; M.J. Pawlewicz, M. D. Lewan, C. L. Carlson and Ank Webbers. Update On The Influence Of Extractable Organic Matter On Vitrinite Reflectance: Implications To Liquid Hydrocarbon Or Bitumen Impregnation As A Suppression Mechanism. TSOP, Vol 6. 2004
- Barker, Ch; Pawlewicz, M. An Empirical Determination Of The Minimum Number Of Measurements Needed To Estimate The Mean Random Vitrinite Reflectance Of Disseminated Organic Matter. Organic Geochemistry, Vol. 20, No. 6, Pag. 643-651. 1991.
- Berner, R.A. A New Geochemical Classification of Sedimentary Environments. Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 51, No. 3. Pag. 359-365. June, 1981.



- Bohacs, K; Sutter, J. Sequence Stratigraphic Distribution of Coaly Rocks: Fundamentals Controls and Paralic Examples. AAPG Bulletin, Vol. 81, No.10. 1997.
- Bralower, T; Lorente, M.A. Paleogeography and Stratigraphy of the La Luna Formation and Related Cretaceous Anoxic Depositional Systems. Palaios, Vol. 18. Pag. 301-304. 2003.
- Cooper, M.A., Addison, F.T., Alvarez R., Coral, M., Graham, R.H., Hayward, A.B., Howe, S., Martinez, J. Naar, J., Penas, R., Pulham, A.J. Basin development And tectonic History Of The Llanos Basin, Eastern Cordillera And Middle Magdalena Valley, Colombia. AAPG bulletin, vol. 79(10),pag. 1241-1443. 1995.
- Dengo, C.A., & Covey, M.C. Structure Of The Eastern Cordillera of Colombia: A Tectonic Model Of The Colombian Andes. AAPG bulletin, vol 77, pag. 1315-1337. 1993.
- Dunham R. J. Classification of Carbonate Rocks According To Depositional Textura. AAPG Memoirs. 1962.
- Esparza, E. A. Y Pineda E. R. Calidad De Roca Fuente De Petróleo Y Facies Orgánicas Del Cretáceo Superior: Formación La Luna (Cuenca Del Valle Medio Del Magdalena), Formación Conejo Y Grupo Guadalupe (Cordillera Oriental). Universidad Industrial De Santander. 1999. Tesis De Grado.
- Espitalié, J; Deroo, G; Marquis, F. La Pyrolyse Rock Eval Et Ses Applications. Revue De L'institut Français Du Pétrole. Vol. 41, No. 1. 1986.



- Fang H. & Jianyu Ch. The Cause and Mechanism Of Vitrinite Reflectance Anomalies. Journal of Petroleum Geology. Vol. 15. 1992.
- García, D. F. & Parra, P. Áreas Con Mayor Potencial De Carga De Petróleo: Cuenca Valle Medio Del Magdalena (VMM) Y Occidente De La Cordillera Oriental, Colombia. VIII Simposio Bolivariano “Exploración Petrolera En Las Cuencas Subandinas”. Cartagena De Indias. 2003
- Garcia, M; Mcgowan, D; Surdam, R. Coal As A Source Rock Of Petroleum Gas- A Comparison Between Natural And Artificial Maturation Of The Almond Formation Coals, Greater Green River Basin In Wyoming. USGS Professional Paper. 1993
- Giraldo, B.N. Y Ruiz, O. Problemas En La Identificación Del Origen De La Materia Orgánica Amorfa (M.O.A) En Los Estudios De Palinofacies En La Formación La Luna – Cuenca Valle Medio Del Magdalena. 8th Congreso Latino Americano Sobre Geoquímica Orgánica, Cartagena (Colombia). 2002
- Hewlett Packard. Catálogo De Análisis Químicos. 1999.
- Lewan, M.D. Henry, A.A. Gas: Oil Ratios for Source Rocks Containing Type-I,-II,-IIs and -III Kerogens As Determined By Hydrous Pyrolysis. USGS Web Site. 2001
- Lewan, M. D. Evaluation of Petroleum Generation By Hydrous Pyrolysis Experimentation. R. Society London. 123-124. 1985.



- Lewan, M.D., 1993, Identifying And Understanding Suppressed Vitrinite Reflectance Through Hydrous Pyrolysis Experiments. TSOP Abstracts And Program, V. 10, P. 1-3.
- Lo, H. B. Correction Criteria For The Suppression Of Vitrinite Reflectance In Hydrogen – Rich Kerogens: Preliminary Guidelines. Organic Geochemistry, Vol. 20 No 6. 1993.
- Lo, H. B. Identification Of Indigenous Vitrinites For Improved Thermal Maturity Evaluation. Organic Geochemistry, Vol. 18, No 3, Pp. 359 – 364, 1992.
- Lo, H.-B., 1998, How To Evaluate Maturity Of Kerogen When Its Vitrinite Reflectance Is Suppressed. TSOP, Abstracts and Program, V. 15, P. 42-43.
- Montes, C. La Evolución Tectónica Meso-Cenozoica De La Cordillera Oriental: Una Hipótesis Alternativa. Convocatoria Docente UIS. 2003
- Mora, C. A., Goncalves, F. T. T., Rangel A. V... ¿Is The Luna Formation The Main Hydrocarbon Source In Colombia? 8th Congreso Latino Americano Sobre Geoquímica Orgánica, Cartagena (Colombia). ECOPETROL-ICP. 2002
- Parra, M; Moscardelli, L; Lorente, M.A. Late Cretaceous Anoxia And Lateral Microfacies Changes In The Tres Esquinas Member, La Luna Formation, Western Venezuela. Palaios, Vol.18, Pag. 321-333. SEPM, 2003.
- Peters, K; Cassa, M.R. Applied Source Rock Geochemistry. AAPG Memoir60, Chapter 5. 1994.



- Rangel, A; Moldowan, J.M; Niño,C; Parra, P; Giraldo, B.N. Umir Formation: Organic Geochemical And Stratigraphic Assessment As Cosource For Middle Magdalena Basin Oil, Colombia. AAPG Bulletin, Vol.86, No. 12. 2002.
- Rangel, A; Parra, P; Niño, C. The La Luna Formation: Chemostratigraphy and Organic Facies in the Middle Magdalena Basin. Organic Geochemistry 31. Pag. 1267-1284. 2000.
- Rangel, A; Parra, P; Niño, C; Giraldo, B.N; García, M. La Luna Formation: Chemistratigraphy and Organic Facies in the Middle Magdalena Basin, Colombia. 19Th Internrtional Meeting on Organic Geochemistry. Istanbul, Turkey. 1999.
- Ruble, T.E; Lewan, M.D; Philp, M.P. New Insights on the Green River Petroleum System in The Uinta Basin From Hydrous Pyrolysis Experiments. AAPG Bulletin, Vol. 85, No.8, Pag. 1333-1371. 2001.
- Schole, P; Bebout,D; Moore,C. Carbonate Depositional Environments. AAPG Memoir 33, 1998.
- Sonnenfeld, M; Cross, T.A. Volumetric Partitioning And Facies Differentiation Within The Permian Upper San Andres Formation Of Last Chance Canyon, Guadalupe Mountains, New Mexico. AAPG Memoir 57, Chapter 17, Pag. 435- 474.1993.
- Taboada, A., Rivera, L.A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Hervè, O., Bijward, H., Olaya, J. Geodynamics of the Northern Andes: Subductions and Intracontinental Deformation, Colombia. Tectonics, vol 19(5), pag.787-813. 2000



- Thompson-Rizer, C.L; Woods, R.A; Ottenjann, K. Quantitative Fluorescence Results From Sample Exchange Studies. Organic Geochemistry. Vol. 12, No. 4. Pag. 323-332. 1998.
- Ting, F.T.C; Sitler, J.A. Comparative Studies of the Reflectivity of Vitrinite and Sporinite. Organic Geochemistry. Vol. 14, No. 3. Pag. 247-252. 1989.
- Tissot, B.P; Welte, D.H. Petroleum Formation and Occurrence. 1984.
- Tyson, R.V. The Genesis and Palynofacies Characteristics of Marine Petroleum Source Rocks. Marine Petroleum Source Rocks. Geological Society Special Publication, No. 26 Pag. 47-67.1987.
- Villamil, T. Chronology, Relative Sea-Level History and a New Sequence Stratigraphic Model for Basinal Cretaceous Facies of Colombia. Paleogeographic Evolution and Non-Glacial Eustacy, Northern South America. Sepm Special Publication, No 58, Pag 161-217. 1998.
- Villamil, T; Arango, C. Integrated Estratigraphy of Latest Cenomanian and Early Turonian Facies of Colombia. Paleogeographic Evolution and Non-Glacial Eustacy, Northern South America. Sepm Special Publication, No 58, Pag.129-160.1998.
- Villamil,T ; Pindell, L. Sequence Stratigraphic Studies In Passive Margin Strata Deposited During Non-Glacial Times. Paleogeographic Evolution and Non-Glacial Eustacy, Northern South America. SEPM Special Publication, No 58, Pag 286-317. 1998.



- Whiticar, M.J. Correlation of Natural Gases with Their Sources. AAPG Memoir 60, Chapter 16. 1994.
- Wilkins, R.W; Wilmshurst, J.R; Hladky, G; Ellacott, M; Y Buckingham, C. Should Fluorescence Alternation Replace Vitrinite Reflectance As A Major Tool For Thermal Maturity Determination In Oil Exploration?. Organic Geochemistry. Vol.22, No. 1. Pag. 191-209. 1995.
- Wilkins, Ronald W. Fluorescence Alteration and the Suppression of Vitrinite Reflectance. Organic Geochemistry, Vol. 18, No 5, Pp. 629 – 640, 1992.
- Zapata, E; Padron, V; Madrid, I; Kertzus, V; Truskowski, I Y Lorente, M.A. Biostratigraphic, Sedimentologic and Chemostratigraphic Study of the La Luna Formation (Late Tutorian-Campanian) In The San Miguel and Las Hernández Sections, Western Venezuela. Palaios, Vol. 18, Pag. 367-377. Sepm, 2003.



ANEXOS

ANEXO A- tabla de análisis petrográficos de las muestras analizadas de La Formación La Luna



Home



This PDF created with the [FREE RoboPDF Home Edition](#) (not legal for business or government use)

Edition

Get RoboPDF: An Easy, Affordable Alternative for Creating PDFs - www.robopdf.com

Buy RoboPDF