

**DEFINICIÓN DE FACIES GENERADORAS PARA LA FORMACIÓN LA LUNA  
EN LA PARTE NORESTE DE LA CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL  
MAGDALENA.**

**DIEGO ARMANDO MARTÍNEZ CARRILLO**

**CRISTIAN RICARDO MENDOZA BLANCO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS**

**ESCUELA DE GEOLOGÍA**

**BUCARAMANGA**

**2012**

**DEFINICIÓN DE FACIES GENERADORAS PARA LA FORMACIÓN LA LUNA  
EN LA PARTE NORESTE DE LA CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL  
MAGDALENA**

**DIEGO ARMANDO MARTINEZ CARRILLO**

**CRISTIAN RICARDO MENDOZA BLANCO**

**Trabajo de grado en la modalidad de investigación para optar el título de  
Geólogo**

**Directores**

**JAIRO CLAVIJO TORRES**

**Geólogo, MSc.**

**TATIANA MILENA JULIAO LEMUS**

**Geólogo, MSc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS**

**ESCUELA DE GEOLOGÍA**

**BUCARAMANGA**

**2012**

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mis agradecimientos a:

Mi familia por confiar en mí y darme la fuerza para seguir adelante y poder conseguir este gran logro en mi vida.

Mis directores el profesor Jairo Clavijo Torres y la Geóloga Tatiana Milena Juliao Lemus por sus consejos, enseñanzas y paciencia, además de ser la base fundamental para llevar a buen término este trabajo.

Mis compañeros Henry, Gina, Diego, Leonardo, Claudia, Fernando, Laura, Liseth, stefi, Andrea, Lenin, Aura, Jenny, Judy y todos aquellos que de alguna manera estuvieron ahí y se convirtieron en un gran apoyo durante todo el transcurso de mi carrera.

Mi compañero de tesis Cristian Mendoza, quien en el transcurso de esta tesis, se ha convertido en un gran amigo, además de ser un excelente profesional, que estuvo conmigo en todos los tropiezos que se presentaron, por lo que solo me queda desearle muchos éxitos, en lo que se viene de ahora en adelante

El laboratorio de Geoquímica del Instituto Colombiano del Petróleo, quienes estuvieron encargados y de alguna manera participaron durante las pruebas que se realizaron, para llevar a cabo este trabajo.

La Universidad Industrial de Santander, en especial a la escuela de Geología y a toda su planta docente, por ser parte de este proceso que está culminando, y que da inicio a uno nuevo.

*Diego Armando Martínez Carrillo*

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a Dios por darme la oportunidad de culminar mi pregrado en Geología, por darme salud, sabiduría y fuerzas para cumplir con esta meta planteada en mi vida.

Gracias a mis padres Pedro Jesús Mendoza y María Fanny Blanco por su gran apoyo, por su paciencia y por esos grandes consejos para cumplir con gran éxito mis metas; A mis abuelos Teresa Figueroa y Pedro Facundo Mendoza quienes me han brindado apoyo, un amor incondicional y quienes con sus experiencias y anécdotas me han dado enseñanzas para mi vida; y en general a toda mi familia quienes han estado a mi lado viviendo grandes momentos de felicidad.

A mis directores de Tesis Jairo Clavijo Torres y Tatiana Milena Juliao, por darnos la oportunidad de desarrollar este trabajo de grado y brindarnos grandes enseñanzas y asesorías las cuales me servirán para seguir con mi camino como profesional en geología.

A mi compañero de tesis Diego Martínez, quien es una gran persona y un excelente geólogo, con quien después de grandes obstáculos cumplimos con el objetivo de obtener nuestro título.

A mis compañeros de geología con quienes he compartido momentos de felicidad, por su apoyo en momentos complicados y por sus enseñanzas durante mi pregrado.

Al Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) y a su grupo de profesionales en el área de geoquímica, quienes nos dieron un gran apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Industrial de Santander y a su excelente grupo de profesores.

*Cristian Ricardo Mendoza Blanco*

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	18
1. ASPECTOS GENERALES.....	19
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	21
1.5. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	21
1.6. ESTUDIOS ANTERIORES .....	23
2. METODOLOGÍA .....	25
2.1. FASE I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.2. FASE II. LEVANTAMIENTO ESTRATIGRÁFICO.....	25
2.3. FASE 3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	26
2.3.1. Correlación de las columnas levantada.....	26
2.3.2. Definición de las facies generadoras y los miembros de la Formación La Luna: .....	26
2.3.3. Modelo depositacional.....	27
3. MARCO TEÓRICO .....	28
3.1. CLASIFICACIÓN DE CARBONATOS .....	28
3.2. YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES .....	31
3.3. CLASIFICACIÓN DEL KERÓGENO.....	35
3.4. CARBONO ORGÁNICO TOTAL (TOC).....	36
3.5. PIROLISIS ROCK-EVAL .....	36
3.6. ANÁLISIS VISUAL DEL KERÓGENO .....	39
3.6.1. Microscopia de luz transmitida y fluorescencia: .....	39
3.6.2. Microscopia de luz reflejada y fluorescencia. ....	40
3.7. CURVA DE RHP.....	42

4. MARCO GEOLÓGICO.....	44
4.1. EVOLUCIÓN GEOLÓGICA .....	44
4.2. ESTRATIGRAFÍA .....	48
4.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL .....	52
4.3.1. Geología estructural del área. ....	52
4.4. FORMACIÓN LA LUNA .....	56
5. RESULTADOS.....	60
5.1. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA FORMACIÓN LA LUNA (QUEBRADA AGUA DULCE).....	60
5.2. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA FORMACIÓN LA LUNA (QUEBRADA EL SALTO).....	62
5.3. DEFINICIÓN DE LAS LITOFACIES Y CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA.....	64
5.4. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LA FORMACIÓN LA LUNA .....	68
5.4.1. Contenido orgánico.. ....	68
5.4.2 Potencial generador. ....	70
5.4.3. Calidad de la materia orgánica.....	70
5.4.4. Madurez de la materia orgánica.....	73
5.5. DEFINICIÓN DE LAS FACIES GENERADORAS DE LA FORMACIÓN LA LUNA .....	76
5.6. DEFINICIÓN DE LOS MIEMBROS DE LA FORMACIÓN LA LUNA .....	79
5.7. ASOCIACIÓN DE FACIES .....	80
5.8. MODELO DEPOSICIONAL .....	82
6. CONCLUSIONES .....	88
7. RECOMENDACIONES.....	90
REFERENCIAS .....	91
ANEXOS.	

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Relación de la columna con el área de levantamiento.	<b>22</b>
<b>Tabla 2.</b> Parámetros para la evaluación del Carbono orgánico total.	<b>36</b>
<b>Tabla 3.</b> Parámetros obtenidos de la pirolisis Rock Eval.	<b>37</b>
<b>Tabla 4.</b> Parámetros para la evaluación del índice de hidrógeno.	<b>38</b>
<b>Tabla 5.</b> Parámetros para la evaluación del índice de producción.	<b>38</b>
<b>Tabla 6.</b> Parámetros para la evaluación del potencial petrolífero.	<b>38</b>
<b>Tabla 7.</b> Parámetros para la evaluación de la temperatura máxima.	<b>39</b>
<b>Tabla 8.</b> Relación de las partículas orgánicas con el tipo de kerógeno.	<b>41</b>
<b>Tabla 9.</b> Comparación bibliográfica de trabajos previos correspondiente a los miembros de la Formación La Luna	<b>57</b>
<b>Tabla 10.</b> Ambiente de depositación de la Formación La Luna en trabajos previos.	<b>59</b>
<b>Tabla 11.</b> Relación del número de muestras para geoquímica.	<b>68</b>
<b>Tabla 12.</b> Evaluación de los parámetros de índice de producción y potencial petrolífero para la Formación La Luna.	<b>76</b>
<b>Tabla 13.</b> Relación de facies, contenido orgánico e Índice de Hidrógeno en la Quebrada Agua Dulce.	<b>78</b>
<b>Tabla 14.</b> Relación de facies, contenido orgánico e Índice de Hidrógeno en la Quebrada El Salto.	<b>78</b>

<b>Tabla 15.</b> Relación de los segmentos estratigráficos con la principal facies generadora.	<b>79</b>
<b>Tabla 16.</b> Definición de los miembros para la Formación La Luna.	<b>80</b>
<b>Tabla 17.</b> Relación del ambiente deposicional, litofacies y tipo de Kerógeno de acuerdo a la roca fuente.	<b>82</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localización de las áreas de trabajo.	<b>22</b>
<b>Figura 2.</b> Metodología del proyecto.	<b>27</b>
<b>Figura 3.</b> Clasificación de rocas carbonatadas, según Dunham, 1962	<b>28</b>
<b>Figura 4.</b> Clasificación de rocas carbonatadas, según Folk, 1962	<b>29</b>
<b>Figura 5.</b> Diagrama de la relación de la Curva RHP, con el cambio en las condiciones de oxigenación	<b>43</b>
<b>Figura 6.</b> Mapa de las principales provincias tectónicas de Colombia, con el desarrollo de las cuencas de Llanos, Cordillera Oriental y Valle Medio del Magdalena.	<b>45</b>
<b>Figura 7.</b> Columna estratigrafía generalizada de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.	<b>51</b>
<b>Figura 8.</b> Mapa geológico mostrando los límites de la CVMM	<b>53</b>
<b>Figura 9.</b> Mapa Estructural con la localización de las áreas de estudio a escala 1:1'000.000.	<b>55</b>
<b>Figura 10.</b> Correlación de las columnas estratigráficas de la sección de Rio de Oro a la izquierda y la sección de Lebrija a la derecha, con base en los segmentos diferenciados y la identificación de las litofacies	<b>67</b>
<b>Figura 11.</b> Distribución espacial a) Quebrada Agua Dulce, b) Quebrada El Salto y porcentual c) Quebrada Agua Dulce y d) Quebrada El Salto, del contenido de materia orgánica para la Formación La Luna.	<b>69</b>
<b>Figura 12.</b> Distribución del potencial generador de la Formación La Luna en a) Quebrada Agua Dulce y b) Quebrada El Salto.	<b>70</b>

<b>Figura 13.</b> Diagrama de Van Krevelen modificado para la Formación La Luna a) Quebrada Agua Dulce y b) Quebrada El Salto.	<b>71</b>
<b>Figura 14.</b> a y c) Microfotografías tomada en luz transmitida con donde se observa materia orgánica amorfa no fluorescente en las Qdas. Agua Dulce y El Salto respectivamente; b y d) Microfotografías tomada en luz fluorescente, donde se observa un dinoflagelado con buena fluorescencia en contacto con Materia orgánica inerte para las Qdas. Agua Dulce y El Salto respectivamente.	<b>72</b>
<b>Figura 15.</b> Evaluación de la madurez térmica e histograma de distribución de la Tmax en las muestras para la Formación La Luna en a, b) La Qda. Agua Dulce y c y d) La Qda. El Salto.	<b>73</b>
<b>Figura 16.</b> Distribución de hidrocarburos libres de la Formación La Luna en a) Quebrada Agua Dulce y b) Quebrada El Salto.	<b>75</b>
<b>Figura 17.</b> Distribución porcentual de las facies para la Formación La Luna en a) sección Agua Dulce y b) sección El Salto.	<b>77</b>
<b>Figura 18.</b> Curva de RHP para la Formación La Luna en los sectores de a) Lebrija y b) Rio de Oro.	<b>83</b>
<b>Figura 19.</b> Eventos anóxicos durante el Cretáceo.	<b>85</b>
<b>Figura 20.</b> Modelo deposicional de la Formación La Luna.	<b>87</b>

## **ANEXOS**

Este material se encuentra en una carpeta adjunta.

**ANEXO 1.** COLUMNA ESTRATIGRAFICA A ESCALA 1:250 EN LA QUEBRADA AGUA DULCE.

**ANEXO 2.** COLUMNA ESTRATIGRAFICA A ESCALA 1:250 EN LA QUEBRADA EL SALTO.

**TITULO:** DEFINICIÓN DE FACIES GENERADORAS PARA LA FORMACION LA LUNA EN LA PARTE NORESTE DE LA CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA.\*

**AUTORES:** DIEGO ARMANDO MARTINEZ CARRILLO\*\*  
CRISTIAN RICARDO MENDOZA BLANCO\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Facies Generadoras, Cuenca del Valle del Magdalena Medio, La Luna, Parámetros Geoquímicos.

## **RESUMEN**

Se llevó a cabo el levantamiento de columnas estratigráficas y toma de muestras para análisis geoquímico por medio de pirólisis rock eval, carbono orgánico total (TOC) y petrografía orgánica, con el fin de determinar el potencial generador e identificar las facies generadoras y los miembros de dicha formación.

De acuerdo a las características estratigráficas y geoquímicas, las secciones estudiadas se correlacionan con el miembro Galembó; además la geoquímica expone contenidos de TOC que varían entre muy buenos a excelentes con valores entre 0,3 y 8,8% con promedio de 3,2% para el área de Lebrija y 3,8% para el área de Río de Oro. La materia orgánica presenta un predominio de kerógeno tipo II representado en más del 80% de las muestras con valores de índice de hidrogeno (HI) mayores a 300 mg HC/g TOC, indicando que es de origen marino y compuesta principalmente por materia orgánica amorfa por la descomposición de algas. Valores altos de potencial de generación (S2) en promedio de 17 mg HC/g roca y hidrocarburos libres (S1) en promedio de 2,5 mg HC/g roca indican un excelente potencial para la generación de aceite y los datos de T<sub>máx</sub> indican que esta Formación está entrando en ventana de generación de aceite.

Las principales facies generadoras para la Formación La Luna en el área de Lebrija y Río de Oro son las que presentan el mayor contenido lodoso y corresponden a las facies Lcl (Lodolita calcárea laminada) y la facies que presenta mayor abundancia en Lebrija es MWpl (Mudstone-Wackestone pobremente laminado) y en Río de Oro es Lcl. El ambiente propuesto para esta Formación en el área estudiada es de plataforma de carbonatos epeirica con bajo ángulo y regímenes de energía bajo, debido a la circulación restringida.

---

\* Trabajo de Grado, Modalidad Investigación.

\*\* Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Geología. Universidad Industrial de Santander (UIS)  
Director MSc. Jairo Clavijo Torres - Catedrático UIS  
Co-director: MSc. Tatiana Milena Juliao Lemus- Ecopetrol S. A.

**TITLE:** DEFINITION OF GENERATING FACIES OF LA LUNA FORMATION IN THE NORTHEASTERN PART OF THE MIDDLE MAGDALENA VALLEY BASIN.\*

**AUTHORS:** DIEGO ARMANDO MARTINEZ CARRILLO\*\*  
CRISTIAN RICARDO MENDOZA BLANCO\*\*

**Keywords:** Generating Facies, Middle Magdalena Valley Basin, La Luna, Geochemical Parameters.

## **ABSTRACT**

To carry out this survey, it was necessary the uplifting of stratigraphic columns and sampling for geochemical analysis, using tools such as Rock Eval Pyrolysis VI, total organic carbón (TOC) and Organic Petrography, in order to determine the potential generator and identify generating facies and members in this formation.

According to the stratigraphic and geochemical characteristics, the sections studied correlates with the Galembó member; also, the geochemistry shows TOC contents ranging from very good to excellent with values between 0.3 and 8.8% with an average of 3.2% for the area of Lebrija and 3.8% for the area of Río de Oro. The organic matter show a predominance of type II kerogen represented in more than 80% of the samples with Hydrogen Index (HI) values greater than 300 mg HC/g TOC indicating that is of marine and composed mainly of amorphous and seaweed. High values of generation potential (S<sub>2</sub>) in average of 17 mg HC/g rock and free hydrocarbons (S<sub>1</sub>) in average of 2.5 mg HC/g rock indicate excellent potential for the generation of oil and Tmax data indicate that this formation is entering the window of oil generating.

The main generating facies for La Luna Formation in the area of Lebrija and Río de Oro are those with the highest content of content muddy and they correspond to the Lcl (laminated calcareous mud) facies and the most abundant in Lebrija is the MWpl (poorly laminated Wackestone-Mudstone) and for Río de Oro is Lcl. The environment proposed for this formation in the study area is epeiric carbonate platform with low angle and low energy regimes for restricted circulation.

---

\* Degree Work Modality Investigation

\*\* Physicochemical Faculty. School of Geology. Universidad Industrial de Santander (UIS)

Director MSc. Jairo Clavijo Torres - Catedrático UIS

Co-director: MSc. Tatiana Milena Juliao Lemus- Ecopetrol S. A.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enmarca entre los proyectos de yacimientos no convencionales con el fin de contribuir a la búsqueda de nuevas fuentes de energía, que conduzca a aumentar las reservas de hidrocarburos en el país.

En la exploración de nuevas fuentes de energía, se aplican diversas herramientas como la estratigrafía, geología estructural, geoquímica, y paleontología, entre otras. La geoquímica orgánica permite identificar el contenido orgánico, potencial generador, calidad del Kerógeno, evolución termal de la roca, y estimar los volúmenes de hidrocarburos generados o que se podría generar. La información anterior relacionada con la estratigrafía, permite conocer las facies generadoras y los intervalos generadores, los cuales pueden ser una guía para identificar ambientes de depositación de la roca.

La Cuenca del Valle Medio del Magdalena (CVMM), es una de las principales cuencas para la producción de hidrocarburos en Colombia, en sedimentos cretácicos de plataforma calcárea, representados por las formaciones Rosablanca, Tablazo, El Salto y *La Luna* (Aguilera, 2009).

## 1. ASPECTOS GENERALES

### 1.1. OBJETIVO GENERAL

- ✓ Definir las facies generadoras de la Formación **La Luna** en la parte Noreste de la CVMM a partir de levantamiento de columnas estratigráficas y análisis geoquímicos, que sirva como herramienta de apoyo en futuros proyectos de exploración.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el levantamiento estratigráfico de la Formación La Luna en dos zonas en la parte Noreste de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.
- Caracterizar geoquímicamente muestras de la Formación La Luna de las secciones levantadas, mediante análisis de carbono orgánico total (Total Organic Carbon (TOC)), Pirólisis Rock-Eval VI y Petrografía Orgánica.
- Conocer las características geoquímicas de la Formación La Luna en la parte Noreste de la CVMM.
- Identificar los posibles intervalos generadores de la Formación La Luna.
- Integrar los datos geoquímicos y sedimentológicos, como herramienta para la identificación de las facies generadoras de la Formación La Luna y de sus miembros.

### 1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años la industria de los hidrocarburos se ha fortalecido en la búsqueda de nuevas fuentes de energía, que años atrás no se consideraban rentables por la alta inversión para extraer los productos, pero debido al aumento en la demanda de los combustibles se hace necesario considerarlos como una alternativa para incrementar el número de reservas del país.

Entre estas nuevas fuentes se encuentran los yacimientos no convencionales como son los de Shale Gas, por esto se hace necesaria la exploración de nuevas áreas que puedan ser explotadas teniendo en cuenta las características de este tipo de yacimientos.

Desde los comienzos en la exploración de hidrocarburos en Colombia, la Cuenca del Valle Medio del Magdalena ha sido una de las áreas de mayores y mejores prospecciones, donde se encuentra la Formación La Luna.

La Formación La Luna de la CVMM, es correlacionable con: Grupo Villeta en la Cordillera Oriental (CO) y Valle Superior del Magdalena (VSM) Formaciones Chipaque y Gacheta en la Cordillera Oriental (CO), y Piedemonte Llanero; además se extiende a lo largo de Venezuela, Ecuador y Perú, en donde han sido consideradas como las principales rocas generadoras de hidrocarburos en el norte de Suramérica y posiblemente es una de las formaciones más productivas del mundo (Zapata *et al*, 2003; Villamil & Pindell, 1998).

A pesar que en la CVMM se han propuesto tres miembros para la Formación La Luna, existe discusión sobre su presencia y las características distintivas de cada una, ya que en diferentes estudios que se han realizado e observa que hay desacuerdos con la descripción original propuestas en Morales *et al.*, 1958; por tanto se hace necesario un estudio detallado de dicha Formación que logrará darle fin a esta controversia y así conocer de una mejor manera cada uno de los miembros y sus facies generadoras.

Por lo anterior se hace necesario conocer y caracterizar la Formación La Luna para poder determinar sus implicaciones en la exploración de yacimientos no convencionales tipo Shale Gas y Shale Oil.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN**

Los yacimientos no convencionales de Shale Gas y Shale-Oil se convierten en una opción para ampliar las reservas de hidrocarburos del país, por lo que se propone realizar un estudio de la Formación La Luna en la parte noreste de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, enfocándolo a la exploración de este tipo de yacimientos, pero se hace necesario identificar los miembros ya propuestos para esta Formación (Salada, Pujamana y Galembó) que permita identificar riesgos exploratorios y definir los intervalos generadores/productores para cada uno.

Para esto se dispondrá de toda la información posible como datos de afloramiento (levantamientos estratigráficos de dicha Formación en la parte Noreste de la cuenca), parámetros geoquímicos (cantidad, calidad y madurez de la materia orgánica) y petrológicos, que permitan identificar los miembros, las facies petrológicas y geoquímicas. La integración de las características anteriormente mencionadas permitirá proponer las facies generadoras de hidrocarburos líquidos y gaseosos, lo cual podría contribuir en la disminución de riesgos en las fases de exploración y en el aumento en las reservas nacionales.

#### **1.5. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA**

La CVMM se encuentra localizada en la parte central de Colombia entre la Cordillera Central al Oeste y la Cordillera Oriental al Este. Esta cuenca es considerada una cuenca poly-histórica según Kingston *et al.*, 1983 y Rolon, 2004, la cual se desarrollo hasta su configuración actual a través de diferentes etapas relacionadas con los eventos tectónicos de la esquina Noroeste de Suramérica);

además es una de las provincias petrolíferas exploradas en el país con reservorios en rocas del Cretácico Superior y Cenozoico, con un área de 34,000 km<sup>2</sup>.

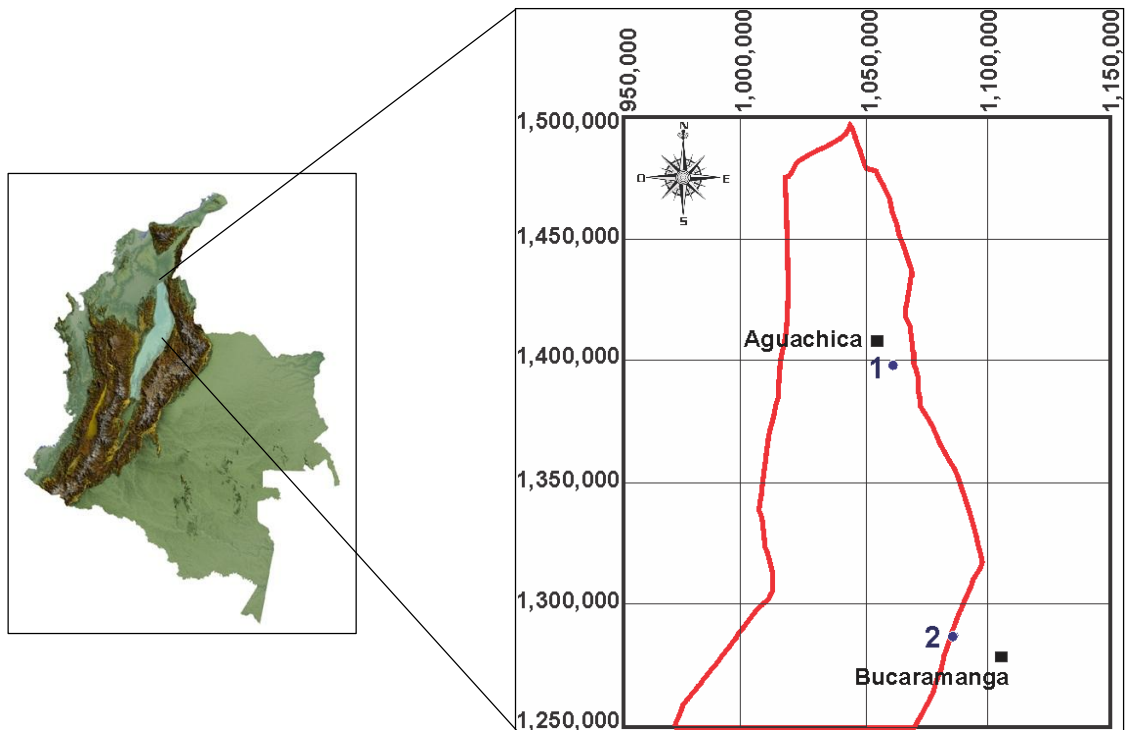
El área de trabajo se encuentra localizada al Noreste de la Cuenca en cercanías de los municipios de Rio de Oro (Cesar) y Lebrija (Santander), ver Tabla 1. En la figura 1 se muestra la localización de las columnas levantadas.

**Tabla 1.** Relación de la columna con el área de levantamiento.

N° COLUMNA	COLUMNA	UBICACIÓN
1	Quebrada El Salto	Rio de Oro (Cesar)
2	Quebrada Agua Dulce	Lebrija (Santander)

Fuente. Autor

**Figura 1.** Localización de las áreas de trabajo.



Fuente. Autor

## 1.6. ESTUDIOS ANTERIORES

**Morales *et al.*, (1958)**, realizó una recopilación de la estratigrafía de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena. En este informe se presenta la subdivisión de la Formación La Luna en tres miembros que son Salada, Pujamana y Galembo, los cuales fueron usados por primera vez por O. C. Wheeler en un reporte no publicado de 1935. En este reporte se referencia el nombre de las localidades donde se levantaron las secciones tipo de cada uno de los miembros.

**Rangel *et al.*, (2000)**, estableció las facies orgánicas de la Formación La Luna en muestras recolectadas en la Quebrada La Sorda para cada miembro de dicha Formación. Se determinó que la Formación La Luna es una roca fuente de petróleo con bueno a excelente potencial de aceite. Con evidencias geoquímicas como Índice de Hidrogeno (Hydrogen Index (HI)) y TOC, análisis de crudos y petrografía los autores determinaron 3 hem Ciclos de baja frecuencia para la deposición de la Formación La Luna: primero una caída del nivel base que corresponde a la deposición del miembro Salada, seguido de una profundización de la cuenca que corresponde con la sedimentación del miembro Pujamana y por ultimo existió una segunda caída del nivel base que permitió la deposición del miembro Galembo; además se estableció que el ambiente de sedimentación de la Formación La Luna es una rampa carbonatada.

**Carvajal, (2004)**, por medio de un estudio geoquímico de la Formación La Luna, en muestras tomadas en la Quebrada La Sorda, se observó que esta Formación en el sector occidental de la CVMM presenta contenidos de TOC que la clasifican como roca fuente con un excelente potencial de generación. Análisis de la materia orgánica en las muestras recolectadas presentan fenómenos de supresión de la reflectancia de la vitrinita (Ro) en esta sección. Evidencias petrográficas, geoquímicas sugieren que el posible ambiente de la Formación La Luna es una plataforma carbonatada restringida.

**Aguilera, (2009)**, a través de la caracterización geoquímica mediante análisis de Ro, temperatura máxima (Tmax) en muestras de los pozos Norean-1 e Infantas-1613, estableció que las rocas del cretácico Inferior (Formaciones Rosablanca, Paja, Tablazo y Simití), se encuentran más maduras que las rocas del Cretácico Superior (Formación La Luna), lo que hace que las primeras sean más prolíficas en generación de hidrocarburos.

**Bernal, (2009)**, realizó el levantamiento de la Formación La Luna en el área del Tablazo, ubicado en el cruce de la vía que comunica a Bucaramanga con San Vicente del Chucurí con el Río Sogamoso. Este estudio estaba enfocado a verificar la columna tipo de la Formación La Luna reportada por Morales *et al.*, (1958) y correlacionarla con la Formación La Luna de Venezuela. Entre los resultados obtenidos se encontró que el único miembro presente de dicha Formación en el sector de Tablazo es Galembó, lo que hace incorrecto el uso de los miembros Pujamana y Salada; además por las características litoestratigráficas presentes de la Formación La Luna en esta área, demuestra que es diferente a la Formación La Luna que aflora en Venezuela. Por otra parte la ausencia de material terrígeno hace pensar que el sector encontrado en Tablazo se comportó como una rampa de carbonatos durante el Turoniano-Santoniano correspondiendo al depocentro de la cuenca Cretácica colombiana. El contacto fallado entre la Formación Simití y Formación La Luna, evidencia la posible existencia en el área de Tablazo de la Formación El Salto.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. FASE I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realizó la búsqueda de información bibliográfica sobre la Formación La Luna que estuviera enfocada con estudios estratigráficos y geoquímicos de diferentes secciones, con el objeto de dar claridad sobre la caracterización de la Formación *La Luna* y cada uno de sus miembros en el área de la CVMM, con el fin de relacionarla con las secciones levantadas para este informe.

Posteriormente se llevó a cabo la evaluación y clasificación de toda la información recopilada, seleccionando los trabajos de mayor interés, que fueran útiles para lograr los objetivos planteados de este trabajo.

### 2.2. FASE II. LEVANTAMIENTO ESTRATIGRÁFICO

Se efectuó el levantamiento estratigráfico de dos secciones en la parte Noreste de la CVMM, que permitiera caracterizar la Formación La Luna en esta área. Para llevar a cabo este levantamiento fue necesario seguir los siguientes pasos:

**Paso 1:** Reconocimiento del área donde se encuentra la sección a levantar y de ser posible determinar los contactos de la Formación La Luna, con la unidad infrayacente y suprayacente.

**Paso 2:** levantar las columnas estratigráficas a escala 1:250, teniendo en cuenta las estructuras sedimentarias y biológicas.

**Paso 3:** Muestreo de toda la sección, para realizar análisis geoquímicos y petrográficos con el fin de complementar la información de campo y determinar las condiciones geoquímicas de la Formación La Luna en estos sectores.

### **2.3. FASE 3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

En esta fase se realizó la definición de las litofacies, a partir de la información recolectada en campo; además se llevó a cabo la interpretación de los análisis de TOC, Pirólisis Rock-Eval VI y petrografía orgánica, para determinar los parámetros de cantidad (TOC), calidad (HI, y Análisis Visual del kerógeno) y madurez termal (Tmax) de la materia orgánica en la Formación La Luna.

**2.3.1. Correlación de las columnas levantada.** Con la información estratigráfica y geoquímica, se correlacionaron las secciones levantadas, teniendo en cuenta la distribución facial, que permitió observar cambios faciales laterales.

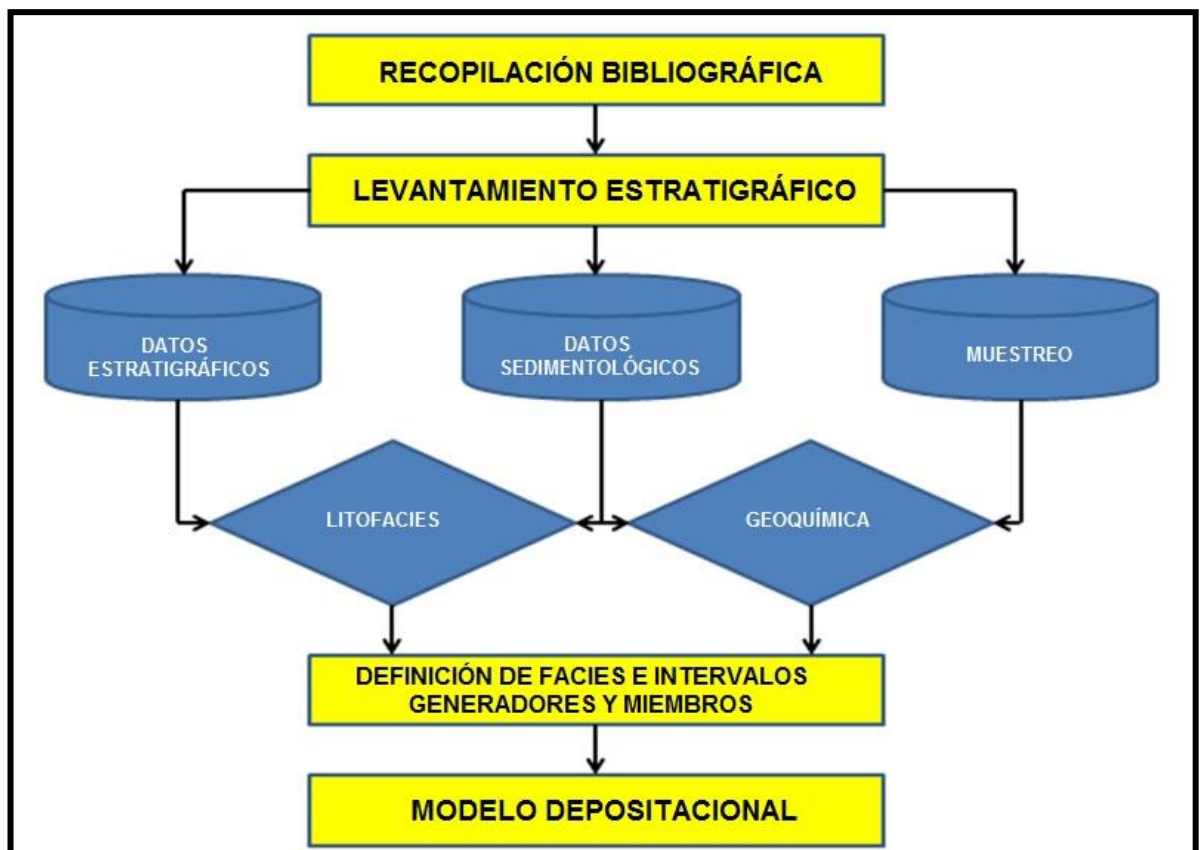
**2.3.2. Definición de las facies generadoras y los miembros de la Formación La Luna.** Con la integración de la información estratigráfica, petrográfica y geoquímica, se pretendió la caracterización de los miembros Salada, Pujamana y Galembo de la Formación La Luna, y corroborar su presencia en el área de estudio. Para tal fin se utilizó la información de trabajos previos donde se reporta estos miembros y la caracterización de cada uno, comparando con la información de las columnas levantadas para este informe. Para lo anterior se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- Definición de las facies generadoras, teniendo en cuenta la información geoquímica.
- Definición de los intervalos generadores, teniendo en cuenta las facies generadoras y su distribución en cada uno de los segmentos estratigráficos.
- Definición de los miembros de la Formación La Luna en las columnas levantadas con la información geoquímica, estratigráfica y de espesores reportados en la literatura, además de la información obtenida en campo.

**2.3.3. Modelo depositacional.** Teniendo en cuenta toda la información analizada e información de los diferentes modelos de depositación de material carbonatado, se procedió a proponer, un modelo de depositación de la Formación La Luna en la parte Noreste de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena

A continuación se muestra el flujo de trabajo, llevado a cabo para la consecución del objetivo de este proyecto.

**Figura 2.** Metodología del proyecto.



Fuente. Autor


### 3. MARCO TEÓRICO

Información estratigráfica y geoquímica fue tomada en cuenta para llevar a cabo este trabajo, por lo que es necesario aclarar conceptos y herramientas usadas, y que se describen a continuación.

#### 3.1. CLASIFICACIÓN DE CARBONATOS

Existen varias clasificaciones de rocas carbonatadas y dos de las más usadas son las propuestas por Dunham (1962) y la propuesta por Folk (1962), representadas en las Figuras 3 y 4.

**Figura 3.** Clasificación de rocas carbonatadas, según Dunham, 1962

Clasificación de Dunham (1962)						
Textura original reconocible					Componentes originales enlazados	CARBONATOS CRISTALINOS
Componentes originales no enlazados durante el depósito				Sin matriz y grano sostenido		
Con matriz (carbonato de tamaño arcilla o limo fino)			Granosostenida			
Sostenida por la matriz						
Menos de 10% de granos	Menos de 10% de granos					
MUDSTONE	WACKSTONE	PACKSTONE	GRAINSTONE	BOUNDSTONE		
						

**Fuente.** <http://www.geologia.uson.mx/academicos/amontijo/carbonatadas/Introduccion.htm>

Figura 4. Clasificación de rocas carbonatadas, según Folk, 1962.

Clasificación de Folk (1962)		Más del 10% de aloquímicos ROCAS TIPO I y II		Menos del 10% de aloquímicos ROCAS TIPO III		DOLOMÍAS ROCAS TIPO V			
		Cemento esparítico	Matriz micrítica	De 1 a 10% de aloquímicos		Con "fantasmas" de aloquímicos	Sin fantasmas		
		TIPO I	TIPO II						
COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA DE ALOQUÍMICOS	Más del 25% de INTRACLASTOS	INTRAESPARITA Intraesparrudita	INTRAMICRITA Intramicrorrudita	Según el aloquímico dominante	MICRITA con Intraclastos	MICRITA	Dolomía con Intraclastos		
	Menos del 25% de INTRACLASTOS	Más del 25% de OOIDES	OOESPARITA Ooesparrudita		OOMICRITA Oomicrorrudita		MICRITA con Ooides	Dolomía con Ooides	
		Menos del 25% de OOIDES (relación de volúmenes de peloides y bioclastos b/p)	>3		BIOESPARITA Bioesparrudita		BIOMICRITA Biomicrorrudita	MICRITA con Bioclastos	Dolomía con Bioclastos
			3 - 1/3		BIOPELESPARITA		BIOPELMICRITA	MICRITA con Peloides	Dolomía con Peloides
			<1/3		PELESPARITA		PELMICRITA		
				BIOLITITO (ROCAS TIPO IV)		DOLOMÍAS			
						Según el aloquímico dominante			

Fuente: <http://www.aiu.edu/publications/student/spanish/180-207/sedimentologia-sedimentology.html>

Para efectos de este proyecto se opta por realizar una combinación de las dos clasificaciones, que permita relacionar la textura y la composición de la roca. De esta unión se estableció la siguiente clasificación:

- **Micrita de textura Mudstone:** calizas con matriz calcárea tamaño arcilla o limo (lodosoportada) y con menos del 10% de aloquímicos.
- **Biomicrita de textura Wackestone:** caliza con matriz calcárea tamaño arcilla o limo (lodosoportada) y con más del 10% de aloquímicos.
- **Biomicrita de textura Packstone:** caliza con matriz calcárea tamaño arcilla o limo (granosoportada).

- **Biomicrudita de textura Wackestone:** caliza con matriz tamaño arcilla o limo (lodosoportada) y con más del 10% de aloquímicos con tamaños mayores a 2mm.
- **Biomicrudita de textura Packstone:** caliza con matriz tamaño arcilla o limo (granosoportada) y con más del 10% de aloquímicos con tamaños mayores a 2mm.

Además de las anteriores, se estableció otros términos que se describen a continuación para rocas con contenido de fosfatos y de sílice.

- **Biomicrita Fosfática de textura Wackestone:** caliza con matriz tamaño arcilla o limo (granosoportada), con más del 10% de aloquímicos y con presencia ligera a moderada de fosfatos.
- **Biomicrita Fosfática de textura Packstone:** caliza con matriz tamaño arcilla o limo (granosoportada), con más del 10% de aloquímicos con tamaños mayores a 2mm y con presencia ligera a moderada de fosfatos.
- **Micrita Fosfática de textura Mudstone:** caliza con matriz tamaño arcilla o limo (granosoportada), con menos del 10% de aloquímicos y con presencia ligera a moderada de fosfatos.
- **Fosforita:** rocas con alto contenido de fosfatos y carbonato.

**Nota:** la concentración de fosfatos fue medida subjetivamente, por medio del cambio de coloración de la roca al entrar en contacto con el heptamolibdato de amonio y el ácido clorhídrico

- **Micrita esparítica de textura Mudstone:** caliza con matriz tamaño arcilla y limo (lodosoportada), con desarrollo de cristales de esparita.
- **Lodolita calcárea:** lodolita con contenidos tanto terrígeno como carbonatado, donde este último no supera el 60% (efervescencia baja a moderada).

- **Porcelanita:** roca silíceea con brillo comparable al de la porcelana (no vidriado) y con fractura planar y concoidea.

### 3.2. YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES

Los yacimientos no convencionales, son aquellos que por sus características, es necesario utilizar tratamientos de estimulación y procesos de recobro especial que permitan extraer los hidrocarburos, para alcanzar ratas de flujo y volúmenes de aceite y gas que sean económicamente rentables. Entre los yacimientos no convencionales de hidrocarburos, están; *Tar Sands*, *Tight Gas Sandstone*, *Gas asociado a Carbón*, *Hidratos de Metano*, *Shale Gas* y *Shale Oil*.

**a) Tar Sands:** es un tipo de reservorio donde las fracciones ligeras de aceite crudo han escapado, quedando un aceite residual relleno de los intersticios de las areniscas que es muy viscoso para fluir en un pozo en cantidades suficientes para llegar a tener una producción económica. Este aceite residual tiene baja gravedad (menor o igual a 10°API), que requieren de una fuente termal que pueda reducir esa viscosidad y facilite el alcance del nivel necesario para ser producido a través de un pozo en cantidades económicas.

**b) Tight Gas Sandstone:** son reservorios no convencionales, asociados a areniscas de baja permeabilidad con valores menores a 0,1mD, lo que hace que no se pueda dar una producción a velocidades de flujo económico y una recuperación de volúmenes económicos de gas natural. Por las características anteriores se hace necesaria la estimulación del pozo por tratamiento de fracturamiento hidráulico, que permita alcanzar una tasa de producción efectiva. Estos depósitos no tienen un target de exploración definido, ya que pueden ser de aguas profundas o someras, de alta o baja presión, de alta o baja temperatura se puede dar en capas con geometría tabular o lenticular, pueden ser homogéneos o naturalmente fracturados y puede contener uno o varios niveles para producir.

**c) Gas Asociado al Carbón:** son depósitos de carbón en los que se encuentra el gas metano fijado por adsorción en la matriz sólida. Este gas se genera durante la carbonificación. Durante este proceso el carbón presenta fracturas verticales o diaclasas que permiten una mejor producción de los pozos. El carbón funciona como roca generadora y como reservorio de hidrocarburos. Estos se encuentran superficiales, típicamente a profundidades entre 300m y 600m o hasta 1500m. a esta profundidad se encuentran inundados por acuíferos que mantienen una presión hidrostática suficiente para retener el CH<sub>4</sub> dentro de la estructura del carbón. Este tipo de depósitos están asociados con ambientes de pantano y zonas de llanuras de inundación, donde hay gran cantidad de materia orgánica, que permite la acumulación, enterramiento y preservación de la turba. Estos depósitos se caracterizan por tener baja permeabilidad y baja porosidad. El gas asociado es realmente una mezcla de gases principalmente metano (>92%), algo de etano, propano, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y agua y las concentraciones dependen de la profundidad y de la clase de carbón.

**d) Hidratos de Metano:** los hidratos de gas existen en el mundo en numerosos ambientes, desde al Ártico a la Antártica. En tierra en las regiones de permafrost y se encuentran distribuidos en el margen continental externo asociados con sedimentos del fondo y subsuelo marino del talud y elevación continental, estabilizados in situ. En los fondos marinos, la ocurrencia de hidratos de gas está controlada por la temperatura, presión, composición de la mezcla de gases y la impureza iónica de los contenidos en los espacios porales de las rocas sedimentarias del fondo marino.

El metano es generado por biodegradación biológica y térmica de la materia orgánica, que es posteriormente transportado por el agua del espacio poral de los sedimentos generadores, ascendiendo hasta alcanzar condiciones de temperatura, presión y anoxicidad hasta la acumulación de hidratos de gas en los espacios porosos y fracturas de los reservorios; estos depósitos son enterrados por nuevas capas de sedimentos continuándose con el proceso de generación de

metano y formación de hidratos de gas. El espesor de las zonas de hidratos va a depender de los gradientes geotérmicos y de la existencia y espesor de reservorios adecuados.

**e) Shale Gas:** estos reservorios son acumulaciones de gas biogénico, termogénico o combinado caracterizado por una saturación de gas generalizada, y cumplen con algunos requisitos como son: mecanismos de trampamiento fino, sellos de litología variable y distancias de migración de hidrocarburos cortas. El Shale Gas puede ser almacenado como gas libre en fracturas naturales y porosidad intergranular, como gas disuelto en el kerógeno y bitumen o como gas absorbido encima del kerógeno y superficies de partícula tamaño arcilla. En este tipo de yacimientos, el shale actúa como roca fuente y reservorio, lo cual difiere de los yacimientos de gas convencional, en los cuales los gases migran de la roca madre a una almacenadora, que puede ser areniscas o carbonatos.

Entre las características principales que cumple este tipo de yacimientos se encuentran:

- Alto contenido de materia orgánica > 2%COT
- Kerógeno: tipo II
- Reflectancia de vitrinita > 1,1%
- Mineralogía de la roca apta para el almacenamiento de gas
- Presencia de fracturas naturales
- Una matriz de permeabilidad muy baja
- Espesor > 15m
- Alto contenido de sílice y calcita y bajo contenido de arcilla
- Baja saturación de agua

**f) Shale Oil:** son rocas de grano fino con más de 10% de kerógeno rico en hidrógeno (Liptinita), que pueden ser efectivas rocas fuente de petróleo si se encuentran lo suficientemente maduras. Este tipo de reservorios fueron

depositados bajo un amplio rango de ambientes geológicos, que están controlados por: alta productividad biológica, fondos de agua anóxicos y bajas tasas de sedimentación.

Los reservorios de shale Oil derivados de materia orgánica algal y microbiana puede ser subdividida de acuerdo a la morfología del kerógeno bajo microscopia reflejada y fluorescente. Una de estas divisiones fue realizada por Hutton en 1987 (Peters *et al.*, 2005) en el cual distingue 3 tipos principales de macerales:

**1) Lamalginita:** compuesta por paredes delgadas de algas unicelulares o coloniales que ocurren como láminas, pero que no muestran estructuras biológicas reconocibles bajo microscopia de luz transmitida y fluorescente.

**2) Telalginita:** compuesta de materia orgánica estructurada de organismos unicelulares de pared delgada coloniales como *Botryococcus*, *Tasmanites* y *Gloeocapsomorpha*.

**3) Bituminita:** compuesto por kerógeno amorfo que no puede ser clasificado como Lamalginita o Telalginita. Muchos de los Shale Oil marinos contienen algo de bituminita mezclada con otros macerales.

Para tener en cuenta este tipo de yacimientos debe cumplir con las siguientes características:

- Alto contenido de materia orgánica > 2%COT
- Kerógeno: tipo II
- Madurez termal: entrando en la ventana de generación.
- Presencia de fracturas naturales
- Una matriz de permeabilidad muy baja
- Espesor > 15m
- Alto contenido de sílice y calcita y bajo contenido de arcilla

Este tipo de reservorios es considerado como el precursor de los mejores yacimientos de shale gas.

### 3.3. CLASIFICACIÓN DEL KERÓGENO

Existen 4 tipos principales de kerógeno (Tissot et al, 1974 en Peters, 1986) descritos a continuación:

**Tipo I:** Kerógeno con una relación de H/C ( $\geq 1,5$ ) y de O/C ( $< 0,1$ ) y generalmente tiene bajos contenidos de sulfuros. Este kerógeno es dominado por el maceral Liptinita, pero puede presentarse bajas cantidades de Inertinita y Vitrinita; el primero es derivado del retrabajamiento bacteriano de materia orgánica algal. Este kerógeno es el más favorable para generación de hidrocarburos líquidos.

**Tipo II:** Kerógeno con una relación de H/C (1,2 – 1,5) y de O/C ( $< 0,3$ ), tiene el contenido de sulfuros más alto en comparación a otros kerógenos. Este tipo de kerógeno es dominado por el maceral Liptinita, con algunas cantidades de Vitrinita e Inertinita y en este caso la Liptinita es derivada de restos bacteriales de fitoplancton y zooplancton, usualmente en sedimentos marinos. Este tipo de kerógeno es favorable para generación de hidrocarburos líquidos y algunas pequeñas cantidades de gas.

**Tipo III:** este tipo de Kerógeno presenta una relación de H/C (0,7 – 1,0) y O/C ( $\leq 0,3$ ) y es dominado por el maceral Vitrinita y pequeñas cantidades de Inertinita. Este kerógeno proviene de plantas terrestres y es el menos favorable para la generación de hidrocarburos líquidos, pero puede producir grandes cantidades de gas.

**Tipo IV:** este kerógeno es llamado “carbón muerto”, mostrando relación de H/C (0,5 – 0,6) y O/C ( $\leq 0,3$ ). Este tipo de kerógeno es dominado por el maceral Inertinita que genera poco o ningún hidrocarburo durante la maduración y es derivado de otros kerógenos que han sido retrabajados u oxidados.

### 3.4. CARBONO ORGÁNICO TOTAL (TOC)

El TOC está integrado por bitumen, moléculas pequeñas solubles en solventes orgánicos y por material orgánico insoluble de moléculas grandes denominado kerógeno, el cual es el precursor del petróleo (Méndez, O., Inédito en Margotta y Ramírez, 2004). El TOC está controlado por la productividad orgánica y bajas concentraciones de oxígeno en el medio de depositación.

El TOC no es un claro indicador de potencial generador; un ejemplo de ello es que el grafito es esencialmente 100% carbón, pero no generan petróleo; además algunas secuencias deltaicas marinas del Terciario contienen valores de COT mayores al 5% pero la capacidad de generación de hidrocarburos es pobre debido a que a materia orgánica presente es tipo III y IV.

El TOC es más grande que la suma del carbono pirolizable en S1, S2 y S3. En la tabla 2 se indica los rangos de TOC y su capacidad de generación como roca fuente:

**Tabla 2.** Parámetros para la evaluación del Carbono orgánico total.

<b>TOC (%peso)</b>	<b>IMPLICACIONES COMO ROCA FUENTE</b>
<b>&lt;0,5</b>	Capacidad de generación insignificante
<b>0,5-1,0</b>	Capacidad de generación pobre
<b>1,0-2,0</b>	Capacidad de generación posiblemente buena
<b>2,0-4,0</b>	Capacidad de generación muy buena
<b>&gt;4,0</b>	Capacidad de generación excelente

**Fuente.** Modificado de Peters y Cassa, 1994

### 3.5. PIROLISIS ROCK-EVAL

Esta técnica es usada para evaluar el potencial generador y madurez termal de las rocas (Peters, 1986), mediante la simulación de temperatura programada.

Entre los parámetros medidos directamente por este método se encuentran los siguientes, (ver tabla 3):

**Tabla 3.** Parámetros obtenidos de la pirolisis Rock Eval.

PARÁMETRO	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
<b>Temperatura máxima (Tmax)</b>	°C	Temperatura donde se genera el pico S2, y que corresponde a la temperatura optima de generación de hidrocarburos
<b>Primer pico de Pirólisis (S1)</b>	mg HC/g roca	mg de hidrocarburos libres (fracción ligera) o generados en la roca antes de la Pirólisis.
<b>Segundo pico de Pirólisis (S2)</b>	mg HC/g roca	mg de hidrocarburos generados durante la Pirólisis, y representa el potencial generador de la roca.
<b>Tercer pico de Pirólisis (S3)</b>	mg CO <sub>2</sub> /g roca	mg de Dióxido de Carbono generado durante la Pirólisis.

**Fuente.** Autor

Además de los anteriores parámetros, también se puede obtener medidas indirectas como Índice de Hidrógeno, Índice de Oxígeno e Índice de Producción.

Índice de Hidrógeno (HI); este parámetro se da por la relación S2/TOC mg HC/g TOC, y es un indicador de la calidad de Materia Orgánica (ver Tabla 4).

Índice de Producción (PI): está dada por la relación S1/(S1+S2) y permite evaluar al igual que la Tmax, el estado de madurez de la roca (ver tabla 5); además permite determinar, si la roca ha sido contaminada por migración de aceite, así, los valores de PI mayores 0,2 y temperaturas <435°C, son datos anómalos indicadores de ese problema.

**Tabla 4.** Parámetros para la evaluación del índice de hidrógeno

TIPO DE KEROGENO	HI (mg HC/g TOC)
I	> 600
II	300 – 600
II/III	200 – 300
III	50 – 200
IV	< 50

Fuente. Modificado de Peters y Cassa, 1994

**Tabla 5.** Parámetros para la evaluación del índice de producción

MADUREZ	PI
Inmadura	< 0,1
Temprana	0,1 – 0,15
Media	0,15 – 0.4
Tardía	>0,4
Postmadura	-----

Fuente. Modificado de Peters y Cassa, 1994

Potencial petrolífero (PP): corresponde a la suma de de los hidrocarburos libres y potencial generador (S1+S2 (mg HC/g roca)) y representa el total de hidrocarburos que podría ser generado de la roca. Para rocas donde no haya habido expulsión de hidrocarburos se han establecido los siguientes (tabla 6).

**Tabla 6.** Parámetros para la evaluación del potencial petrolífero

PP (mg HC/g roca)	INTERPRETACIÓN
0,0 – 3,0	Pobre
3,0 – 6,0	Regular

<b>6,0 – 12,0</b>	Bueno
<b>12,0 – 24,0</b>	Muy bueno
<b>&gt;24,0</b>	Excelente

**Fuente.** Modificado de Tissot *et al.*, 1984

Para la evaluación de la Tmax, se tiene la siguiente tabla modificada de Peters y Cassa, (1994).

**Tabla 7.** Parámetros para la evaluación de la temperatura máxima

<b>MADUREZ</b>	<b>Tmax (°C)</b>
<b>Inmadura</b>	<435
<b>Temprana</b>	435 – 445
<b>Media</b>	445 – 450
<b>Tardía</b>	450-470
<b>Postmadura</b>	>470

**Fuente.** Modificado de Peters y Cassa, 1994

### **3.6. ANÁLISIS VISUAL DEL KERÓGENO**

Esta técnica permite caracterizar el tipo de kerógeno, los componentes orgánicos y la madurez termal de la roca, mediante microscopia de luz transmitida y reflejada.

**3.6.1. Microscopia de luz transmitida y fluorescencia.** Este tipo de análisis permite evaluar:

- El tipo y origen de la materia orgánica

- El grado de madurez por medio de fluorescencia, el índice de coloración de esporas o el índice de alteración térmica.

Los tipos de materia orgánica identificados son:

Sin Estructura:

- Materia Orgánica Amorfa

Con Estructura:

- Palinomorfos: Esporomorfos (polen, esporas); Fitoplancton (acritarcos, dinoflagelados, tasmanaceas, Botryococcus) y Zoomorfos (escolecodontes, foraminíferos, quitinozoarios).
- Fitoclastos: Hongos, Macrofitas (cutículas, tejidos de corteza, madera, madera oxidada).
- Zooclastos: Fragmentos de graptolites y artrópodos y fragmentos de bivalvos y ostrácodos.

Ercegovic and Kostic, 2005, propusieron la clasificación de las partículas orgánicas, para reconocer el tipo de kerógeno presente (ver tabla 8).

**3.6.2. Microscopia de luz reflejada y fluorescencia.** Esta técnica permite caracterizar los diferentes tipos de materia orgánica y reconocer los diferentes macerales.

Algunos macerales representan, los remanentes de formas y estructuras de las plantas que han sido preservados en las rocas; otros en cambio, son producto de

la degradación, algunos se encuentran tan alterados que no puede determinarse su origen.

De acuerdo a sus propiedades ópticas los macerales pueden dividirse en 3 grupos:

**Tabla 8.** Relación de las partículas orgánicas con el tipo de kerógeno.

Category		Constituent/source	Maceral group	Maceral	Kerogen type
Structured OM (SOM)	Phytoclasts	Cuticle (leaf-epidermal tissue)	Liptinite	Cutinite	II (oil prone)
		Cortex tissues of stem or root	Huminite/ vitrinite	Subrinite/telinite	III (gas prone)
		Woody tissues (secondary xylem)		Telinite	III (gas prone)
		– Gymnosperm tracheid tissue – Angyosperm tracheid tissue – Structured gelified tissue		telocolinite	
		Charcoal Biochemically oxidized wood	Inertinite	Pyrofusinite degradofusinite	IV (inert)
		Fungal debris: hyphae, spores	Inertinite	Secretinite	IV
	Palynomorphs	Spores and pollen grains	Liptinite	Sporinite, pollinite	II (oil prone)
		Algae (phytoplankton)		Liptodetinite	
		– Marine phytoplankton (dyncysts, acritarchs, prasinophyta)		Telalginite	I (oil prone)
		– Fresh-water algae (Botryococcales)		Lamalginitite	
	Zoomorphs (scolecodonts, chitinozoa, foraminiferal linings)	Faunal remains		–	
Structureless (amorphous) OM (AOM)	Phytoplankton	Highly degraded OM; faecal pellets (fluorescing AOM)	Liptinite	Alginite, bituminite, fluoramorphinite	II (oil prone)
		Bacteria	Cyanobacteria, thiobacteria		Lamalginitite
	Higher plant decomposition products	Degraded higher plant debris, humic cell-filling material (non-fluorescing AOM)	Huminite/ vitrinite	Hebamorphinite (collinite?)	III (gas prone)

**Fuente.** Tomado de Ercegovic & Kostic, 2005.

**Vitrinita:** producto de carbonificación de sustancias húmicas, las cuales se originan esencialmente de lignina y celulosa de las paredes celulares de las plantas, se caracteriza por tener un alto contenido en oxígeno. (Taylor *et al.*, 1998 en Gómez, 2006).

**Liptinita:** proviene de plantas ricas en hidrógeno como polen, esporas, resinas, ceras y grasas. Se diferencia de la vitrinita por que presentan un contenido mayor de hidrógeno. (Taylor *et al.*, 1998 en Gómez, 2006).

**Inertinita:** se caracteriza por tener un alto contenido de carbono y bajo oxígeno e hidrógeno. Muchas de las inertinitas se han derivado de hongos o de las mismas sustancias de la planta original de las cual se forman los otros dos grupos, pero ellas han experimentado una transformación primaria. (Taylor *et al.*, 1998 en Gómez, 2006).

### 3.7. CURVA DE RHP

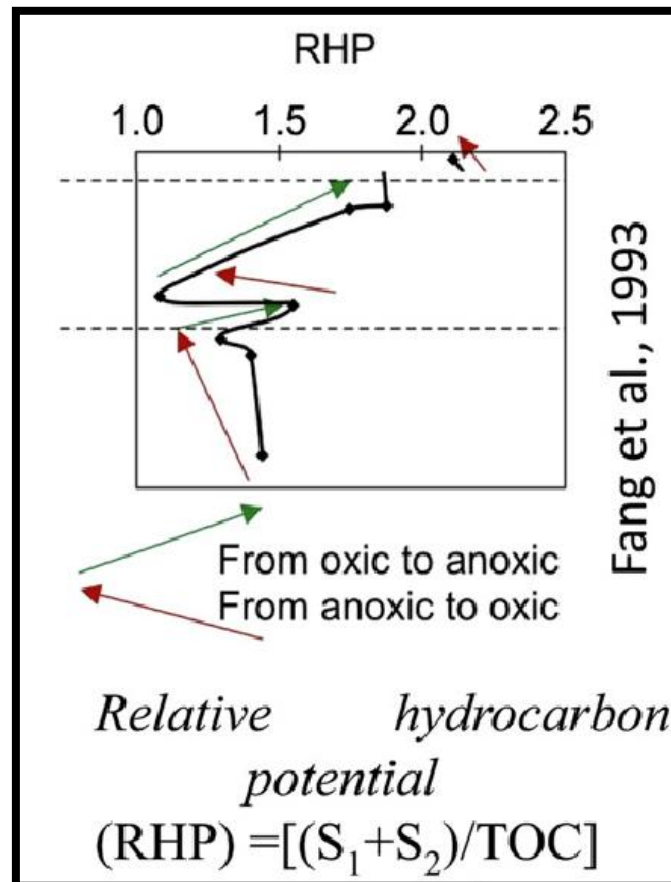
La curva de RHP (figura 5), es un parámetro valioso para evaluar los cambios en el nivel del mar que puede ser relacionado a ciclos regresivo-transgresivo y con las variaciones temporales en el ambiente deposicional. La correlación de este parámetro con la data geológica puede ser efectiva para establecer la estratigrafía de secuencias especialmente en plays de shale gas (Miceli & Philp, 2011).

Fang *et al.*, 1993 en Slatt *et al.*, 2012, fueron los primeros en usar el parámetro RHP para definir los cambios de facies orgánicas verticales llamado secuencia de facies orgánicas verticales (VOFS).

Basados en el RHP, se estableció dos VOFS, uno creciendo hacia arriba, y otro disminuyendo hacia arriba. El VOFS creciendo hacia arriba representa un cambio vertical en facies orgánicas pobres en hidrógeno a ricas en hidrógeno, lo que indica un cambio de condiciones óxicas a anóxicas (aumento del nivel del mar), donde hay preservación de gran cantidad de materia orgánica.

Por el contrario cuando la VOFS, disminuye hacia arriba, señala una disminución en el contenido de hidrógeno, indicando que las condiciones varia de anóxicas a óxicas, y puede asociarse a caídas en el nivel del mar, donde hay menor cantidad de materia orgánica preservada.

**Figura 5.** Diagrama de la relación de la Curva RHP, con el cambio en las condiciones de oxigenación.



**Fuente.** Tomado de Slatt & Rodríguez, 2012.

Este parámetro es obtenido de la data de los análisis de pirolisis Rock-Eval, relacionando los valores de S1 (hidrocarburos libres), S2 (potencial de hidrocarburos) y COT (carbono orgánico total), por medio de la relación  $(S1+S2)/COT$ .

## 4. MARCO GEOLÓGICO

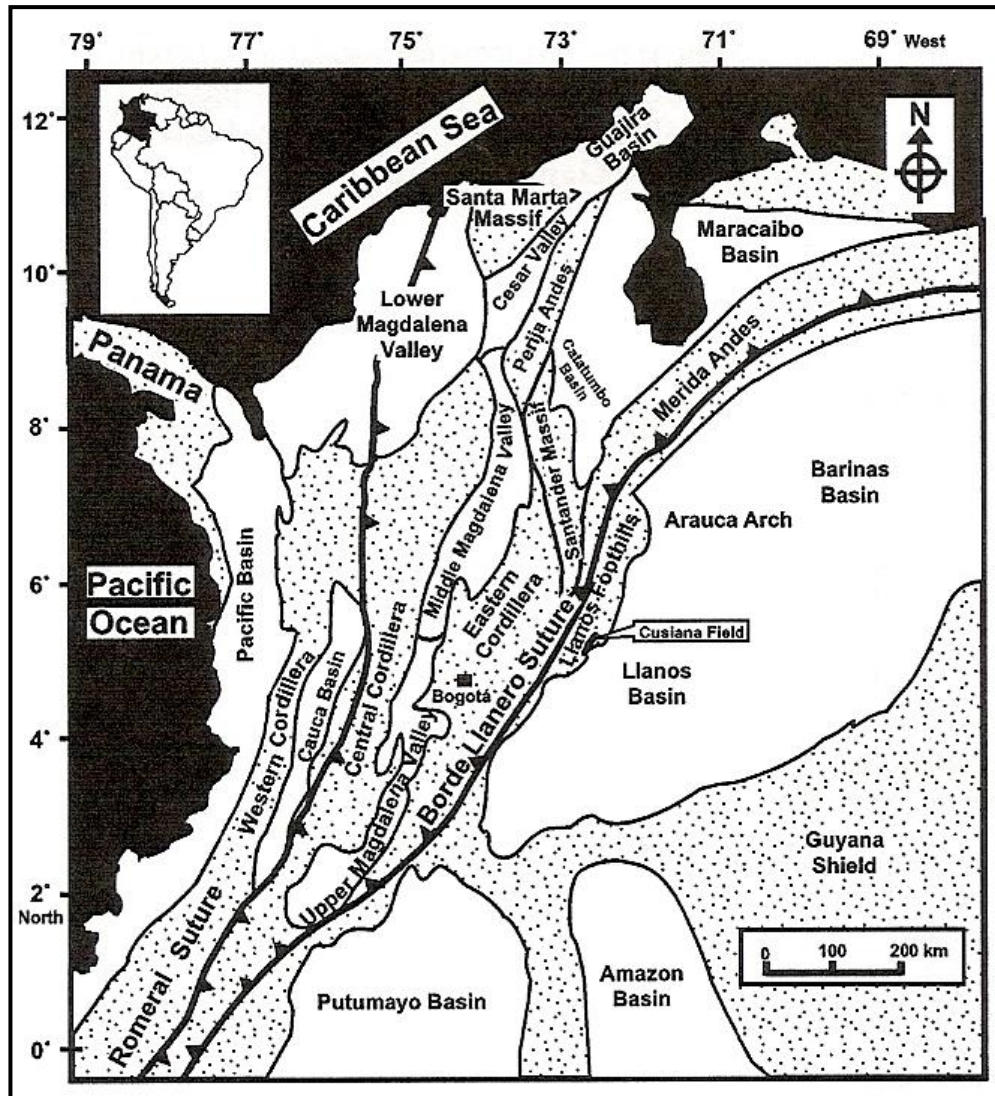
### 4.1. EVOLUCIÓN GEOLÓGICA

El territorio colombiano comprende un dominio continental deformado, situado en el límite de tres placas tectónicas mayores: La Suramericana, la de Nazca y la Caribe. Producto de la interacción de estas placas, el Sistema Andino de Colombia, comprende tres cadenas montañosas, la Cordillera Oriental, Central y Occidental, las cuales se encuentran separadas entre sí por las cuencas intramontanas del Cauca y Valle del Magdalena, (Cooper *et al.*, 1995), ver figura 6.

A finales del Triásico y comienzos del Jurásico, se inicia la apertura del Tethys y la ruptura de Pangea, mediante un proceso de rifting intercontinental, cuyas ramificaciones afectaron el noroccidente de la placa Suramericana, en interacción con la Norteamericana y la Africana (Duncan, R.A and Hargraves, R.B. 1984; Pindell y Erickson, 1993; Pindell y Kennan, 2001) en Clavijo *et al.*, 2008). Durante este periodo, se inicia un fallamiento normal, que genera el hundimiento de bloques escalonados seguido por el desplazamiento lateral de los bloques fallados, dando lugar a dos sistemas de fallas, uno principal N-NE y otro subordinada SW-NE que lo desplaza.

En el Jurásico temprano-Aptiano, se produce el relleno de cuenca continental-marino registrado por depósitos de rocas volcanoclásticas, arenas fluviales, lodolitas, carbonatos y algunos niveles evaporíticos (Rolón *et al.*, 2004); que corresponde a las formaciones Noreán, Arenal, Jordán, Girón, Santos, Cumbre, Rosablanca, Paja y Tablazo (Clavijo *et al.*, 2008; Rolón *et al.*, 2001 y Rolón, 2004).

**Figura 6.** Mapa de las principales provincias tectónicas de Colombia, con el desarrollo de las cuencas de Llanos, Cordillera Oriental y Valle Medio del Magdalena.



**Fuente.** Tomada de Cooper *et al.*, 1995.

Hacia la parte Norte del área de estudio se encuentran las Formaciones *Noreán* y *Arenal*, que se correlacionan con las formaciones *Jordán* y *Girón*; además se reporta una discordancia entre las Formaciones *Noreán-Rosablanca* y las

Formaciones Arenal-Rosablanca. Este relleno de cuenca corresponde a la etapa *syn-rift*, y es separado de la secuencia *post-rift* por la presencia de una discordancia. (Rolon *et al.*, 2001)

En el Albiano medio-Campaniano inferior, continúa la transgresión marina. En este intervalo disminuye la extensión y el flujo de calor, indicando el inicio de la etapa de *post-rift*, controlada por subsidencia termal y dominada por un fallamiento normal en menor grado al de la etapa *syn-rift*. Durante esta etapa se deposita una vasta secuencia marina principalmente de carbonatos y sedimentos clásticos, que corresponde a las Formaciones Tablazo, Simití, El Salto, La Luna y Umir (Rolón *et al.*, 2001); Hacia la parte Noroeste de la cuenca, no se registra la *Formación Tablazo*, debido a una discordancia entre la Formación Paja y la Formación Simití, la Formación El Salto está presente en esa parte Norte de la cuenca, adelgazándose hacia el S y NE. Durante este periodo la cuenca actúa como un Back-Arc detrás de la zona de subducción.

En el Campaniano-Paleoceno, se da la colisión de la Cordillera Occidental con la Placa Suramericana a lo largo de una zona de subducción activa (Barrero, 1979 en Rolon, 2004), causando fallamiento compresivo dando señales de la inversión incipiente que se estaba dando en la cuenca Mesozoica preexistente, a su vez esta acreción ocasionó la Formación y el levantamiento de la Cordillera Central, la cual estuvo sumergida hasta el Maastrichtiano (Cooper *et al.*, 1995). En este periodo se da el cambio de las condiciones marinas a continentales permitiendo la acumulación de depósitos transicionales y fluviales de la Formación Lisama (Rolón *et al.*, 2001; Rolón, 2004). También toma lugar un evento compresional, que está caracterizado por la Formación de dos sistemas de cabalgamientos; uno de vergencia Este y otro de vergencia Oeste.

En el Eoceno medio-Oligoceno se dan dos eventos importantes: el primero corresponde a la fase compresional durante el Eoceno medio-tardío, causando sedimentación por encima de una discordancia regional conocida como la

discordancia del Eoceno Medio, que es sobrepuesta a la faja de cabalgamientos de vergencia Este; y el segundo evento corresponde a la reactivación del levantamiento de la Cordillera Central (Suarez, 1996 en Rolon, 2004), al mismo tiempo que la Cuenca del Magdalena y la Cordillera Oriental formaban parte de una gran cuenca de "Foreland" (antepaís). En este periodo los depósitos sedimentarios corresponden a ambientes fluviales y deltaicos de las Formaciones La Paz, Esmeraldas y Mugrosa.

En el Mioceno temprano comienza el segundo evento compresional a consecuencia de la colisión del Arco de isla de Panamá-Choco, con el borde NW de Suramérica que se encuentra registrado por la discordancia regional del Mioceno en el Valle del Magdalena (Rolon *et al.*, 2001; Rolon, 2004). Este evento conocido como Orogenia Andina, permite la depositación de sedimentos y es la responsable de la configuración final de la CVMM (Dengo y Covey, 1993; Rolon *et al.*, 2001); La Orogenia Andina además permite el desarrollo de una faja de cabalgamientos con vergencia Oeste en estribaciones W de la cordillera Oriental, y la reactivación de paleofallas normales de la etapa distensiva como fallas inversas.

Estos dos eventos compresionales producen altos topográficos que fueron rápidamente erodados y depositados en la cuenca de VMM. De esta manera la cuenca es cubierta por sedimentos Paleógenos transportados de la Cordillera Central acumulados en la Formación Colorado y sedimentos Neógenos transportados de la Cordillera Central y Oriental correspondientes a la Formación Mesa, (Suarez 1996 en Rolon, 2004). En esta etapa la CVMM se convirtió en cuenca intermontana.

## 4.2. ESTRATIGRAFÍA

Las rocas de edad Proterozoica a Paleozoica, representan el basamento cristalino en la CVMM. Estas rocas se encuentran suprayacidas por sedimentos de origen continental del Jurásico, los cuales a su vez son suprayacidas por rocas de composición calcárea principalmente de origen marino y marino transicional y por sedimentos terciarios de composición siliciclástica de depósitos continentales fluviales.

La Formación *Girón* de edad Jurásica, corresponde a areniscas de grano medio, grueso ligeramente conglomerático, de color violáceo, rojo grisáceo y gris verdoso, con interestratificaciones de limolitas y lodolitas de colores rojizos y grisáceos y algunos niveles conglomeráticos, que fueron depositados en un ambiente continental fluvial-lacustre. Esta formación reposa en discontinuidad estratigráfica sobre el basamento cristalino (Cediel, 1968 en Royero & Clavijo, 2001)

La Formación *Los Santos* inicia su depósito en el Jurásico superior y está compuesta por areniscas conglomeráticas, lodolitas rojo grisáceas y cuarzoareniscas gris amarillentas depositadas en un ambiente fluvial y acumuladas por corrientes de ríos trenzados. El contacto inferior es una discontinuidad estratigráfica con la Formación *Girón* y el contacto superior es concordante con la Formación *La Cumbre* (Royero & Clavijo, 2001).

La Formación *Cumbre*, de edad Berriasiano, está constituida por areniscas gris oliva, cuarzosas, de grano fino, con cemento síliceo, limolitas y arcillolitas blancas y negras y limolitas rojas; se asume que el ambiente de depósito es transicional, y el contacto con la suprayacente Formación *Rosablanca* es gradual a transicional.

La Formación *Rosablanca*, de edad Valanginiano-Hauteriviano inferior, está compuesta por calizas fosilíferas de textura gruesa de color gris azulosas, con varias capas margosas y calizas de textura fina en el tope (Morales *et al.*, 1958),

acumuladas en condiciones marinas someras. El contacto de esta unidad con la suprayacente Formación Paja es concordante.

La Formación Paja se le ha asignado una edad Hauteriviano-Aptiano, constituida por shales oscuros fosilíferos, con intercalaciones de areniscas gris amarillenta, calizas grises fosilíferas, que se depositaron en un ambiente epicontinental. El contacto con la Formación Tablazo es concordante, (Morales *et al.*, 1958).

La Formación Tablazo de edad Aptiano superior-Albiano inferior, consiste de calizas masivas fosilíferas y margas, depositadas en un ambiente marino (Morales *et al.*, 1958). El contacto superior con la Formación Simití es concordante.

La Formación Simití de edad Albiano superior-Cenomaniano, corresponde a una secuencia de shales de color gris a negro, carbonosos y localmente calcáreos, con concreciones fosilíferas; hacia el tope son comunes nódulos de fosfatos, dientes de peces y areniscas (Morales *et al.*, 1958). El ambiente de depósito es marino intermedio a profundo, y el contacto con la Formación La Luna es concordante.

La Formación El Salto de edad Cenomaniano inferior, compuesta por calizas fosilíferas, en las cuales se hace importante la presencia de thallasynoides de aspecto nodular. El ambiente de depositación es marino somero de plataforma interna y el contacto superior con la Formación La Luna es discordante y inferior con la Formación Simití es concordante.

La Formación La Luna, de edad Turoniano inferior-Santoniano, compuesta de caliza, lodolita calcárea, caliza fosfática, fosforita y algunas capas delgadas de chert, se depositaron en un ambiente marino de aguas relativamente profundas, y entre esta y la Formación Umir existe una discontinuidad estratigráfica (Morales *et al.*, 1958).

La Formación Umir, de edad Campaniano-Maastrichtiano, es compuesta por capas delgadas de shale de color gris azulado a negro, con láminas micáceas y carbonáceas delgadas y capas de carbón; además presenta niveles ferruginosos y

pequeños nódulos ferruginosos e intercalaciones de areniscas, que se depositaron en un ambiente marino-transicional (Morales *et al.*, 1958). El contacto con la unidad superior Formación Lisama es concordante y hacia el norte se reporta una discordancia que pone en contacto la Formación Umir y la Formación La Paz.

La Formación Lisama de edad Paleoceno, corresponde a una secuencia de lutitas albigarradas, areniscas grises, verdosas y pardas y algunas capas de carbón, depositadas en ambiente de delta costero (Rolon, 2004). Entre la Formación *Lisama* y la Formación La Paz se reporta una discontinuidad estratigráfica (Van der Hammen, 1958 en Royero y Clavijo, 2001), conocida como discordancia del Eoceno medio.

EL Grupo Chorro de edad Eoceno comprende las Formaciones La Paz y Esmeraldas, compuestas por rocas siliciclásticas (areniscas, limolitas y shales) (Morales *et al.*, 1958), que se acumularon en un ambiente continental de sistemas de ríos trezados y lagunares deltaicos (Royero & Clavijo 2001), El contacto Superior del Grupo Chorro es registrado por una discordancia entre la Formación Esmeraldas y la Formación Mugrosa.

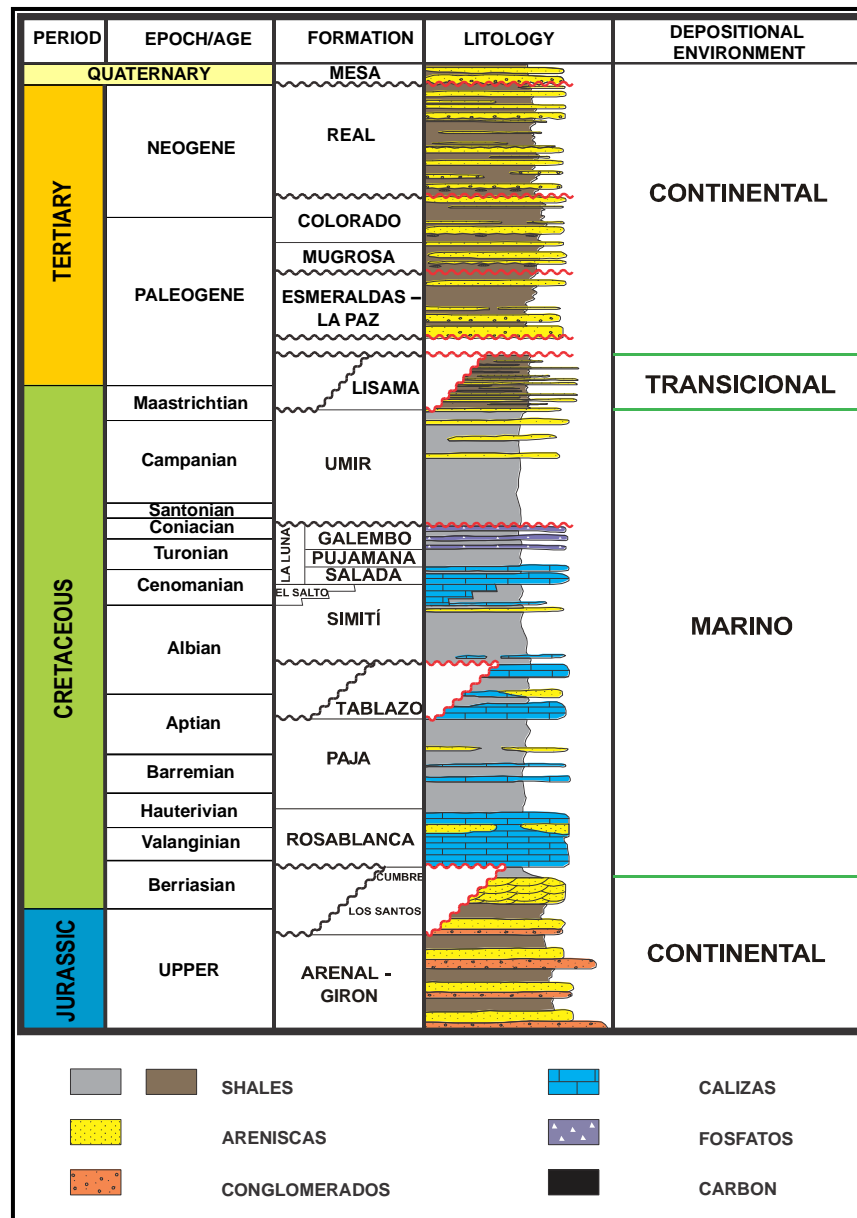
El Grupo Chuspas de edad Oligoceno-Mioceno Inferior, compuesta por las Formaciones Mugrosa y Colorado y está representado en el registro por shales, areniscas y limolitas, que se depositaron en un ambiente de sistemas fluviales; el contacto superior de la Formación Colorado con el Grupo Real es discordante (Royero & Clavijo 2001).

El Grupo Real de edad Mioceno medio-Plioceno, está compuesto por conglomerados líticos, areniscas y shales, correspondientes a un ambiente fluvial; el contacto superior con la Formación Mesa es discordante.

El Grupo Mesa de edad Pleistoceno, consiste de areniscas, limolitas y conglomerados débilmente consolidados, que se depositaron en un ambiente fluvial.

Las anteriores relaciones son mostradas en la columna estratigráfica generalizada en la figura 7.

**Figura 7.** Columna estratigrafía generalizada de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.



Fuente. Modificada de Rolón, 2004.

### 4.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La CVMM es una depresión tectónica asimétrica limitada al Oeste por la falla transcurrente de Palestina y rocas metamórficas de la Cordillera Central; al Sur por la falla transcurrente de Ibagué. En el Norte limita con la falla del Espíritu Santo y al Noreste es limitada por el Macizo de Santander y por la falla de Bucaramanga, la cual tiene tendencia al Noroeste y termina en el cinturón de cabalgamientos de la Cordillera Oriental, (Toro, 1990 en Rolon, 2004), ver figura 8.

Las fallas y pliegues presentes en la CVMM presentan unos rasgos de orientación predominante NNE-SSW, cuyo origen está asociado con la evolución tectónica de las Cordilleras Oriental y Central que limitan regionalmente la cuenca. Los principales rasgos se encuentran caracterizados por cabalgamientos de vergencia Oeste y Este y la transpresión a lo largo de las principales zonas de fallas de Palestina y de Bucaramanga.

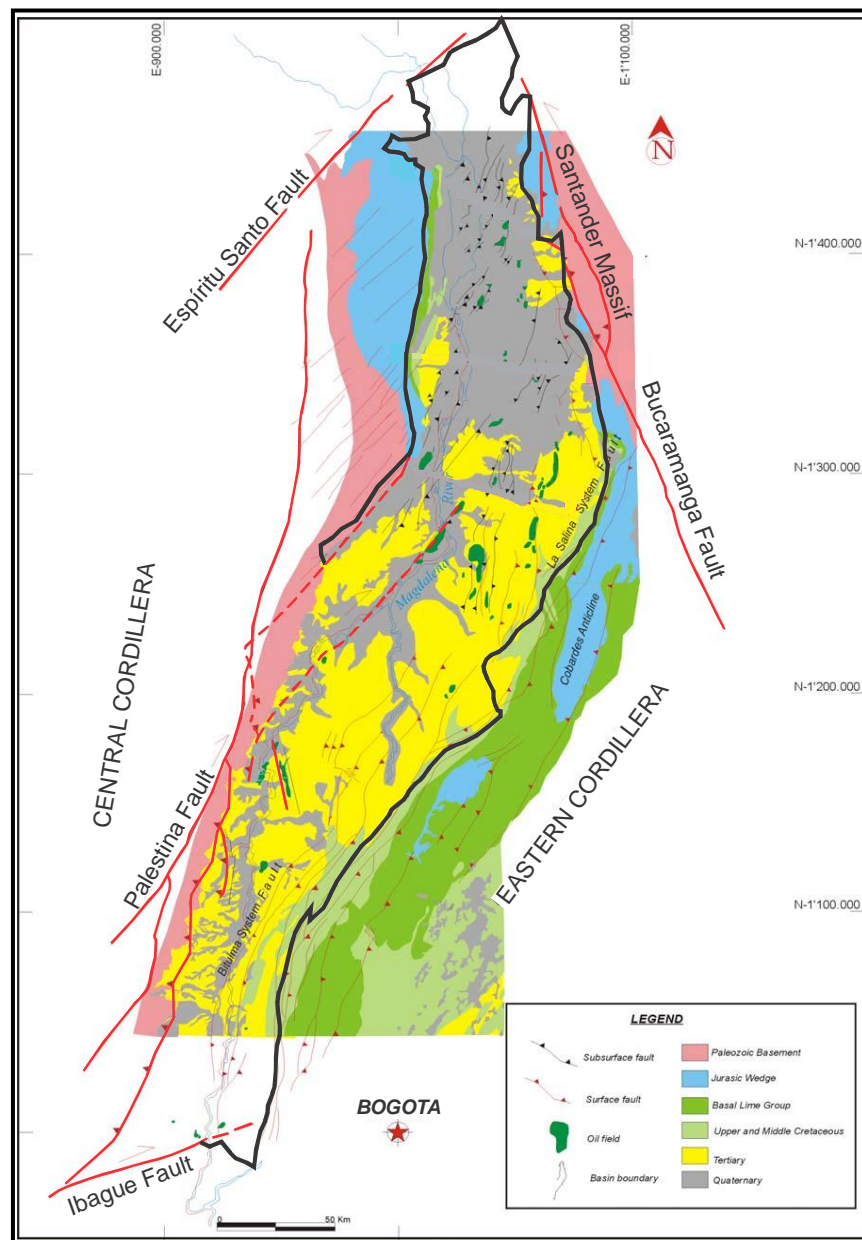
Tres zonas estructurales son bien diferenciadas en la CVMM; el margen occidental consta de fallas inversas de alto ángulo, el margen oriental se compone de una zona de fallas de cabalgamientos, y la zona central presenta una menor complejidad estructural (Suarez, 1997; Restrepo-Pace *et al.*, 1999 en Llamosa 2010).

**4.3.1. Geología estructural del área.** Las estructuras que afectan el área de estudio son: la Falla Bucaramanga-Santa Marta, del Río Suarez, La Salina, El Carmen, de Arrugas, Infantes, que son deformación frágil (figura 9) y Sinclinal de Nuevo Mundo, Anticlinal de Río Sucio, Sinclinal de Naranjo, que son de deformación dúctil.

- **Falla de Bucaramanga:** es una falla de rumbo sinistral con una componente vertical inversa, presenta una dirección NW que puede seguirse desde el sur del Macizo de Santander hasta la costa Caribe en

Santa Marta. Se estima que el desplazamiento lateral está entre 100 y 110Km (Campbell, 1965), y se ha cartografiado cerca de 600Km de longitud. Esta falla forma parte del desarrollo del Valle del Magdalena y del levantamiento de la Cordillera Oriental.

**Figura 8.** Mapa geológico mostrando los límites de la CVMM.



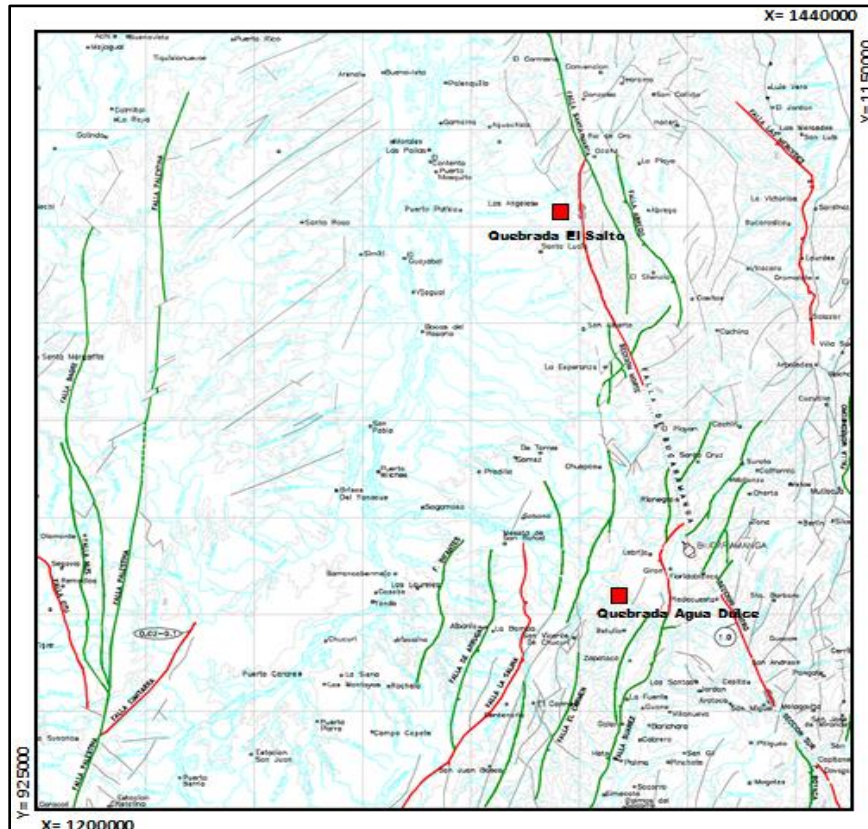
**Fuente.** Modificado de Rolon, 2004 y ANH 2007.

- **Falla La Salina:** Es una falla inversa de ángulo alto, inclinada al Oriente y también tiene movimiento de rumbo dextral, se encuentra localizada al occidente del Departamento de Santander, con dirección NE, pero localmente varía hasta el NS y NW, reconociéndose su longitud desde el límite con Boyacá al Sur hasta el Norte del departamento.
- **Falla del Río Suarez:** Es una falla inversa de alto ángulo, con una componente vertical y plano de falla probablemente subvertical, además posee un desplazamiento de rumbo sinestral (Julivert, 1963 en Ward *et al.*, 1973), se encuentra localizado al Este de la Falla Bucaramanga y presenta una dirección NE, su extensión es aproximadamente de 120Km desde Barbosa hasta su intersección con la Falla Bucaramanga-Santa Marta.
- **Falla El Carmen:** Es una falla inversa inclinada hacia el oriente con un desplazamiento vertical calculado en 600m aprox. (Pulido, 1979), con una dirección predominante SSW-NNE. La terminación al norte es contra la falla Bucaramanga-Santa Marta y se encuentra localizada al Oeste de la misma.
- **Falla de Arrugas:** Se desprende de la Falla La Salina y se extiende al Norte por más de 40Km y limita el flanco Occidental del Sinclinal de Peña de Oro (Clavijo y Royero, 2001). Esta falla es inversa de alto ángulo con inclinación al Oriente cuya dirección predominante es SSW-NNE.
- **Falla Infantas:** Esta falla es inversa inclinada hacia el Oriente, con un desplazamiento vertical de 400m aprox. y una longitud aprox. de 50Km y su dirección es SSW-NNE.
- **Sinclinal de Nuevo Mundo:** Este sinclinal se ha designado estructuralmente como una semifosa, debido al extremo fallamiento cercano y paralelo al borde oriental (Ward *et al.*, 1973). El eje del sinclinal, está cerca al flanco Occidental, probablemente debido al levantamiento a lo largo del lado Oriental de la Falla La Salina. El núcleo de este sinclinal

corresponde a sedimentos de la Formación Real y la dirección del eje es preferencialmente NE.

- **Anticlinal de Río sucio:** Se encuentra localizado al Este del Sinclinal de Nuevo Mundo, es ligeramente asimétrico, y su eje tiene una dirección NE. El núcleo de este anticlinal está constituido por sedimentos de la Formación Tambor.
- **Sinclinal de Naranjo:** Se encuentra al Oeste del Anticlinal de Río Sucio, su eje tiene una dirección preferencial NE, y el núcleo está constituido por sedimentos terciarios de la Formación Lisama.

**Figura 9.** Mapa Estructural con la localización de las áreas de estudio, escala 1:1'000.000.



**Fuente.** Tomado de mapa de fallas activas - INGEOMINAS, 1999.

#### 4.4. FORMACIÓN LA LUNA

La Formación La Luna fue descrita por primera vez por Garner en 1926 como “*La Luna limestones*” para referirse a una secuencia de calizas y lodolitas fisiles expuestas a lo largo de la Quebrada La Luna al NW de la Serranía de Perijá en la parte W del Zulia (Venezuela). Hedberg y Sass en 1937 definieron la sección descrita por Garner como “*La Luna Formation*” (Morales *et al.*, 1958), y la describen de forma detallada de la siguiente manera: “calizas bituminosas, densas, laminadas, gris oscuras a negras, dispuestas en capas delgadas y shale calcáreo negro, con concreciones elipsoidales y discoidales de caliza con diámetros de unas pocas pulgadas a varios pies de diámetro; es común encontrar chert negro como capas y nódulos.

A causa de su amplia extensión regional, este nombre se conservó y fue usado por Notestein *et al.*, (1944) en la concesión Barco, donde esta descrita de la siguiente manera: “*calizas de color gris oscuro, rica en foraminíferos, intercalada con arcillolita negra (shale) muy calcárea y bituminosa. La secuencia contiene abundante materia orgánica laminada y finamente dispersa; la caliza expele un olor intenso a petróleo en superficie fresca, además presenta estratificación uniforme y monótona, en capas de 1 a 50cm de espesor. La arcillolita calcárea presenta estratificación plano paralela a ondulosa, a menudo con concreciones calcáreas grises (micrita biomicrita), de forma elipsoidal a discoidal, de 0,1 a 2m de diámetro, con amonitas frecuentes u otros microfósiles en su interior. Son frecuentes los nódulos y capas de lidita o chert negro. En la parte superior de la unidad aparecen niveles ricos en fosforita con espesores de hasta 1,7m y constituyen concentraciones de interés económico*”.

La Formación La Luna en el área de la CVMM, fue definida en el área del Río Sogamoso (Santander) en donde es dividida en 3 miembros que de base a techo son nombrados Salada, Pujamana y Galembo, en un reporte no publicado de O. C. Wheeler (Morales *et al.*, 1958). El espesor máximo de esta Formación es de

1400m en el sector Suroriental del VMM y Suroccidental de la Cordillera Oriental; en el área Central y Norte del CVMM el promedio corresponde a 450m y en el Sur a 1100m.

El contacto basal de La Formación La Luna es la Formación Simití de manera concordante, y es suprayacida por la Formación Umir, entre ellas hay una discordancia estratigráfica.

La edad de la Formación La Luna, en la CVMM, basado en fósiles de amonitas, pelecípodos y foraminíferos varía entre Turoniano Inferior a Santoniano (?) (Morales *et al.*, 1958)

A continuación se hace una comparación de la descripción de los miembros de la Formación *La Luna* reconocidos en la CVMM, realizada por diferentes autores (Tabla 9).

**Tabla 9.** Comparación bibliográfica de trabajos previos correspondiente a los miembros de la Formación La Luna.

TRABAJO	SALADA	PUJAMANA	GALEMBO
<b>Morales et al, 1958</b> <b>“Quebrada La Salada, Pujamana y Cerro de Galembo”</b>	Shales calcáreos con estratificación delgada, negros, duros, en capas delgadas de calizas negras de textura fina con cintas y concreciones de pirita; además presenta concreciones elípticas de caliza.	Shales calcáreos con estratificación delgada, de color gris a negro.	Shales calcáreos con estratificación delgada, negros, duros, con algunas intercalaciones de caliza arcillosa; se observan concreciones de caliza discoidal con amonitas, capas de chert estratificado azul-negro, capas fosfáticas hacia el tope con fragmentos de hueso y de vertebras de peces y escasos dientes.
<b>Maughann, et al., 1967</b> <b>“Quebrada La Sorda”</b>	Predominio de caliza arcillosa de color gris a oscura, con estratificación delgada hacia la parte inferior;	Shales de color gris oscuro laminado y calizas de color gris claro hacia la parte inferior; se observan concreciones calcáreas y	Intercalaciones de shale, caliza y fosforita, el predominio en la parte inferior es de calizas y fosforita, y el

	se observa capas delgadas de chert y concreciones calcáreas en todo el miembro y algunos niveles de arcillolitas hacia el tope.	grandes paquetes de chert con algunas intercalaciones de shale calcáreo hacia la parte media.	superior es de shale; además se observa algunas capas de chert intercalado con shale calcáreo a lo largo de todo el miembro.
<b>Etayo-Serna et al., 1983</b>	Shales de color negro interestratificados con capas delgadas de micritas negras, con láminas y concreciones de pirita.	Shales calcáreos de color gris a negro con estratificación fina.	Shales calcáreos negros con caliza arcillosa intercalada, las cuales cerca del tope contiene capas de fosfatos.
<b>Rangel, et al., 2000 "Quebrada La Sorda"</b>	Compuesta de Wackestone interestratificado con shale calcáreo ocasionalmente silíceo, algunos niveles son fosfáticos.	Shale calcáreo fosfático con abundantes foraminíferos, Mudstone calcáreo fosfático, chert y bentonita. Hay presencia de nódulos calcáreos de hasta 1m de diámetro, y hay una mayor abundancia de pirita a comparación del Miembro Salada.	Esta sección consiste de una serie de Fosforita Packstone, Wackestone y Packstone Fosfático, chert y shale calcáreo y fosfático. Presencia de concreciones de hasta 2m de diámetro hacia la base de este miembro.
<b>Carvajal, 2004 "Quebrada La Sorda"</b>	Mudstone y Wackestone de foraminíferos planctónicos. Presenta un porcentaje de 0,35 de azufre total, rangos de COT promedio de 5,02% y de Ro de 0,42%	Asociación de Mudstones y Wackestone fosilífero de foraminíferos planctónicos y Mudstone de foraminíferos bentónicos. Presenta un porcentaje de 0,32 de Azufre total, rangos de COT y Ro promedios de 4,88% y 0,37% respectivamente.	Asociación de Mudstone- Wackestone fosilífero (foraminíferos bentónicos), Mudstones de foraminíferos planctónicos, con cambios hacia el tope a Packstone de Borings y Bolivinoideas. Presenta un porcentaje de 0,19 de azufre total, y rangos de COT y Ro promedio de 3,8% y 0,3% respectivamente.
<b>Bernal, 2009 "El Tablazo"</b>			Sucesión homogénea de biomicritas Packstone de color gris oscuro con abundantes foraminíferos, además se puede observar concreciones calcáreas de diámetros variables.

Fuente. Autor

El ambiente de la Formación La Luna, según trabajos previos, se resume en la tabla 10.

**Tabla 10.** Ambiente de depositación de la Formación La Luna en trabajos previos.

Autor(es)	Ambiente
<b>Morales et al., 1958</b>	Le asignan a los Miembros Salada, Pujamana y parte inferior de Galembó un ambiente de agua profunda con mala ventilación hacia la base, lo que no permitió el desarrollo de la fauna bentónica, por el contrario a la parte superior de Galembó le asignan un ambiente de agua más somera, con desaparición de las condiciones sépticas de agua profunda.
<b>Rangel et al., 2000</b>	La sedimentación de la formación <i>La Luna</i> se dio en una rampa carbonatada, con circulación de agua restringida y anoxicidad. Durante ciertos periodos, las corrientes de surgencia favorecieron la alta productividad primaria, la acumulación y preservación de la materia orgánica. Las laminaciones finas y el carácter calcáreo del miembro Salada y la presencia de foraminíferos planctónicos ordenados en láminas, demuestran un ambiente marino de baja energía. La secuencia de shale y el carácter calcáreo menor en el miembro Pujamana, evidencia condiciones más profundas en la plataforma carbonatada para su depositación con respecto a Salada. El incremento de fosfatos hacia el tope es consistente con la ocurrencia de corrientes de surgencia. El alto contenido de materia orgánica, así como la presencia de pirita son evidencia de alta productividad y condiciones subóxicas-anóxicas. Las fosforitas Packstone y Packstones fosfáticos en el miembro Galembó indican un régimen de flujo más grande que el presente durante la depositación de los miembros inferiores. La presencia de laminaciones onduladas y lenticulares, ripples, laminación flaser, retrabajamiento de fragmentos de peces y presencia de cuarzo, demuestran un ambiente de agua somera.
<b>Bernal, Luis (2009)</b>	La cuenca cretácica colombiana correspondía a un mar epicontinental bordeado por el Escudo de la Guyana al Oriente y por la Cordillera Central al Occidente. La formación <i>La Luna</i> corresponde a un ambiente de rampa de carbonatos. La zona del Tablazo corresponde a un antiguo ambiente de Upper Offshore o Outer Ramp, con bajas condiciones de oxigenación y alta productividad biológica; esta clasificación se hace con base en las facies encontradas, que corresponden a materiales finos, biomicrita Packstone con laminación plano paralela, característicos de ambientes de baja energía (Offshore), por otro lado la aparición frecuente de fosforitas cuya génesis se asocia con tormentitas distales, apuntan hacia un ambiente de Upper Offshore o Outer Ramp.

**Fuente.** Autor

## 5. RESULTADOS

Teniendo en cuenta la información recopilada en campo y los análisis geoquímicos, se obtuvieron los siguientes resultados.

### 5.1. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA FORMACIÓN LA LUNA (QUEBRADA AGUA DULCE).

A continuación se hace una descripción de la columna levantada en el área Sur del trabajo. La columna detallada se encuentra en el anexo 1.

El contacto inferior de esta secuencia, es diferenciado por cambio litológico, el cual se encuentra compuesto por lodolitas de color gris oscuro (N2), con laminación pobremente definida y areniscas de grano muy fino de color gris claro (N5), con presencia de óxidos de hierro, restos de plantas y laminación poco definida. El contacto superior se encuentra cubierto.

**SEGMENTO 0: Lodolita no calcárea.** Esta lodolita se encuentra laminada, con algunos lentes y concreciones calcáreas.

**SEGMENTO 1: Lodolita calcárea intercalada con micrita.** La lodolita calcárea es generalmente laminada de color gris oscuro a negro, dispuestas en capas gruesas; micrita de color gris medio a oscuro de textura Wackestone principalmente y escasos niveles de Mudstone que están presentes con laminación y con textura masiva en capas medianas y gruesas.

**SEGMENTO 2: Micrita intercalada con lodolita calcárea.** Micrita de color gris medio a oscuro en capas medianas y gruesas, generalmente laminada; La lodolita calcárea de color gris oscuro a negro dispuesta en capas delgadas y medianas generalmente laminadas, con algunas capas de textura masiva.

**SEGMENTO 3: Lodolita calcárea intercalada con micrita y porcelanita.**

Lodolita calcárea de color gris oscuro a negro generalmente laminada, aunque algunas capas presenta textura masiva; están dispuestas en capas que varían de delgadas a gruesas; la micrita es de color gris claro a medio con textura Wackestone dispuesta en capas que varían de delgadas a medianas y porcelanita de color gris medio a oscuro, con fractura concoidea y planar en capas delgadas y con leve contenido calcáreo. Se presentan algunos niveles cubiertos hacia el tope del segmento.

**SEGMENTO 4: Intercalación de micrita, lodolita calcárea, mirita fosfática, lodolita calcárea fosfática y porcelanita.**

Micrita de textura Wackestone de color gris claro a medio con o sin laminación, dispuesta en capas medianas y gruesas; lodolita calcárea de color gris oscuro a negro, con o sin laminación, dispuesta en capas medianas y gruesas; la micrita fosfática con textura Mudstone y Wackestone de color gris claro a medio dispuesta en capas delgadas y medianas; lodolita calcárea fosfática de color gris oscuro, con textura masiva y dispuesta en capas medianas y gruesas, hacia la parte media se presentan capas de porcelanita negra. Este segmento presenta dos intervalos cubiertos ubicados en la base y en el tope que posiblemente correspondan a niveles lodosos, que presentan menos resistencia.

**SEGMENTO 5: Micrita intercalada con micrita fosfática, lodolita calcárea y porcelanita.**

Micrita de color gris claro a oscuro, dispuesta en capa medianas y gruesas, pueden presentar laminación o textura masiva; micrita fosfática de color gris claro a oscuro, dispuesta en capas delgadas y medianas con textura masiva; lodolita calcárea de color gris medio a negro en capas delgadas y medianas, con laminación delgada o textura masiva; porcelanita calcárea de color gris medio a oscuro, dispuesta en capas delgadas y laminación por concentración de foraminíferos.

**SEGMENTO 6: Micrita fosfática intercalada con lodolita calcárea fosfática, fosforita, y porcelanita.** Micrita fosfática de textura Mudstone y Wackestone de color gris claro a oscuro, dispuesta en capas delgadas y medianas, con o sin laminación; lodolita calcárea fosfática de color gris oscuro, en capas delgadas y medianas, y generalmente no presenta laminación; fosforita de textura Wackestone y Packstone, de color gris claro a medio, dispuesta en capas medianas y sin laminación; porcelanita de color gris oscuro en capas delgadas y ligeramente calcárea.

## **5.2. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA FORMACIÓN LA LUNA (QUEBRADA EL SALTO).**

A continuación se realiza un resumen por segmentos de la sección levantada en Rio de Oro. La columna estratigráfica detallada se encuentra en el anexo 2.

En esta sección no fue posible encontrar los contactos inferior y superior, debido a que hacia la base se encontraba cubierto y hacia el tope se encuentra cubierto y posiblemente fallado, debido a un depósito aluvial posiblemente derivado de la Formación Arenal, compuesto por fragmentos de tamaño guijo a guijarro derivados de rocas ígneas principalmente y algunos de areniscas, con una matriz compuesta de arenisca calcárea.

**SEGMENTO 1: Lodolita calcárea intercalada con micrita.** Lodolita calcárea laminada hacia la base y variando al techo a pobremente laminada, de color gris oscuro a negro, dispuesta en capas gruesas; micrita de color gris medio a oscuro de textura Mudstone principalmente y escasos niveles de Wackestone con y sin laminación en capas medianas que varían a gruesas.

**SEGMENTO 2: Micrita interestratificada con lodolita calcárea y porcelanita.** Micrita de textura Mudstone de color gris medio a oscuro en capas medianas y gruesas, generalmente laminada; lodolita calcárea de color gris oscuro a negro

dispuesta en capas delgadas y medianas predominantemente laminadas, con algunas capas de textura masiva; porcelanita con presencia de pirita diseminada y foraminíferos.

**SEGMENTO 3: Lodolita calcárea intercalada con micrita y porcelanita.**

Lodolita calcárea de color gris oscuro a negro principalmente laminada, dispuesta en capas que varían de delgadas a gruesas; micrita de color gris claro a medio de textura Mudstone dispuesta en capas que varían de delgadas a medianas y hacia el techo se encuentra una capa de porcelanita de color gris medio a oscuro, con fractura concoidea y planar con presencia leve de contenido calcáreo.

**SEGMENTO 4: Lodolita calcárea interestratificada con micrita y porcelanita.**

Lodolita calcárea de color gris oscuro a negro, predominantemente laminada y en menor proporción con textura masiva, dispuesta en capas medianas y gruesas; micrita de textura Mudstone de color gris claro a medio con y sin laminación, dispuesta en capas medianas y gruesas; hacia la parte media se presentan capas de porcelanita negra.

**SEGMENTO 5: Micrita intercalada con micrita fosfática, lodolita calcárea y lodolita calcárea fosfática.**

Micrita de color gris claro a oscuro, dispuesta en capa medianas que varían a gruesas, se presentan laminadas y con textura masiva; micrita fosfática de color gris claro a oscuro, dispuesta en capas delgadas y medianas y con textura masiva; lodolita calcárea de color gris medio a negro en capas delgadas y medianas, con y sin laminación; lodolita calcárea fosfática de color gris oscuro, con textura masiva y dispuesta en capas delgadas.

**SEGMENTO 6: Micrita fosfática intercalada con fosforita.**

Micrita fosfática de textura Wackestone de color gris claro a oscuro, en una capa delgada; fosforita de textura Packstone, de color gris claro a medio.

### 5.3. DEFINICIÓN DE LAS LITOFACIES Y CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA

Tomando como guía la metodología propuesta por Miall, (1978) en vera 1994, donde se tiene en cuenta la litología y las estructuras sedimentarias presentes para definir litofacies, a continuación se describen las litofacies reconocidas para la Formación *La Luna* en las secciones de Lebrija y Rio de Oro.

**1) Lodolita (LI):** Lodolita con presencia de algunos lentes y concreciones calcáreas, de color gris medio (N3) y con laminación delgada planoparalela – ligeramente ondulosa.

**2) Mudstone y Wackestone pobremente laminado (MWpl).** Consiste de micrita de textura Mudstone y Wackestone, ligeramente lodosas y de color gris claro (N4) a gris oscuro (N2), con foraminíferos calcáreos y puede presentar laminación poco desarrollada o de carácter masivo; y una geometría subtabular. Esta litofacies se encuentra dispersa en toda la sección generalmente con una consistencia de moderada a dura, y es común encontrar esparita diseminada y partículas de bitumen. Se interpreta como producto de acumulación en condiciones de baja energía, originadas por la desintegración de algas calcáreas y foraminíferos, acompañada de una fracción de lodo terrígeno.

**3) Mudstone y Wackestone laminado (MWl).** Micrita de textura Mudstone y Wackestone con foraminíferos calcáreos, con laminación planoparalela continua, bien desarrollada de color generalmente gris medio (N3). Su distribución es de menor frecuencia comparada con la litofacies anterior. Las láminas corresponden a concentración de foraminíferos calcáreos. Presenta una consistencia dura y dispuesta en capas subtabulares, con desarrollo de esparita diseminada y presencia de partículas de bitumen. Se interpreta como resultado de la sedimentación en regímenes de baja energía, pero poco más fuerte que en la litofacies anterior, acompañada de la descomposición de algas y acumulación de foraminíferos (muchas cámaras destruidas), y de fracción de lodo terrígeno.

**4) Lodolita calcárea pobremente laminada (*Lcpl*).** Lodolita con contenidos de carbonatos que varían de bajo a moderado, evidenciado por la efervescencia y un color gris oscuro (N3) a negro (N1); además tiene una dureza baja a media. Contiene foraminíferos en concentraciones baja a moderadas, y escasos moldes de bivalvos, con una laminación poco desarrollada. Esta litofacies se asocia a ambientes de muy baja energía que permitan la concentración de material fino tamaño arcilla y limo terrígeno y carbonatado.

**5) Lodolita calcárea laminada (*Lcl*).** Lodolita calcárea que difieren de la litofacies anterior en la presencia de laminación planoparalela continua, señalada por acumulación de foraminíferos. Presenta un color gris oscuro (N2) a negro (N1) y una dureza baja a media. Esta litofacies se interpreta como acumulaciones en regímenes de baja energía, acompañada de la acumulación de foraminíferos y lodo terrígeno y calcáreo. Se presenta en gran proporción en las secciones levantadas y su distribución se encuentra en toda la secuencia.

**6) Lodolita silícea-Porcelanita (*Lsc*).** Lodolita con alto contenido de sílice definida por la dureza y fractura concoidea y porcelanita con fractura concoidea a planar con color gris oscuro (N2) a negro (N1) y dureza moderada a alta. Esta litofacies presenta foraminíferos calcáreos y silicificados. Se interpreta esta litofacies como el resultado de la precipitación de sílice por descomposición de organismos con esqueletos silíceos, y transporte por corrientes de surgencia, evidenciado hacia la parte superior de la sección de la Qda Agua Dulce por su asociación con micritas fosfáticas. Además la formación de esta litofacies está ligada a regímenes de baja energía que permitan su acumulación y ambientes con condiciones reductoras.

**7) Lodolita calcárea y Mudstone fosfáticos (*LcMf*).** Lodolita calcárea y micrita de textura Mudstone con presencia de foraminíferos, de dureza baja a moderada de color gris oscuro (N2). El nivel de fosfatos evaluado en campo con Molibdato de Amonio es bajo a moderado. Esta litofacies está asociada a corrientes de

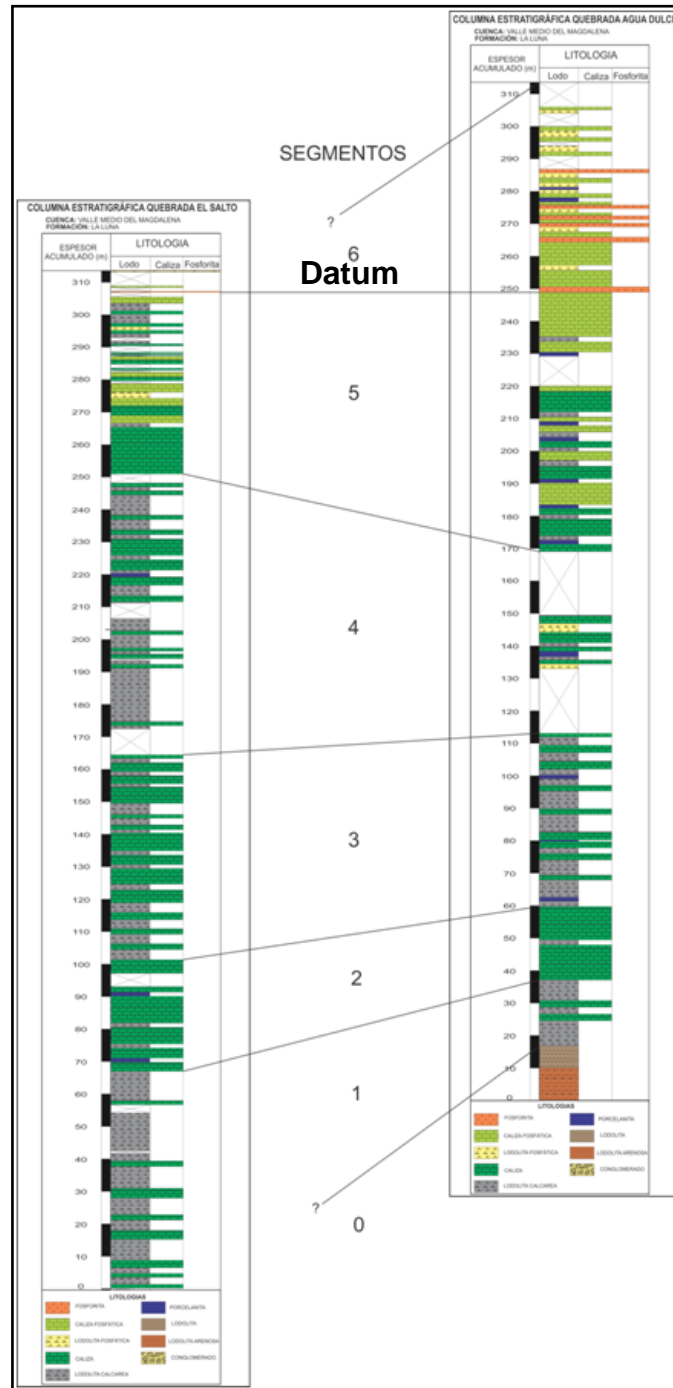
surgencia que permiten la acumulación de partículas fosfáticas en ambientes de baja energía. La litofacies se encuentra hacia la parte alta de las secciones levantadas y se encuentra asociada con las porcelanitas.

**8) Wackestone y Packstone fosfáticos (WPF).** Micrita fosfática de textura Wackestone y Packstone, con presencia de foraminíferos calcáreos, pellets, pelóides y fragmentos de peces. De color gris claro (N5) a gris medio (N3). La litofacies es observada hacia la parte alta de las secciones y se encuentra en baja proporción. El nivel de fosfatos evaluado en campo es determinada de forma visual con el Molibdato de Amonio en rangos de bajo a moderado. La dureza es alta y se encuentra en capas gruesas y asociado con niveles de porcelanita. La litofacies es asociada con un régimen de energía media donde pueda darse la acumulación de pellets y pelóides, además que presenta una bioturbación baja a moderada.

**9) Fosforita (F).** Fosforita de textura Wackestone y Packstone, con altos contenidos de carbonato, de color pardo a grises claros (N4) localizada en la parte alta de las secciones levantadas. Esta litofacies presenta pellets, pelóides fragmentos de peces y foraminíferos. Presenta una alta dureza y una porosidad moderada a alta. Esta litofacies se encuentra asociada a retrabajamiento de partículas fosfáticas (Pellets y pelóides), que son transportados a niveles de anoxia donde se depositan y forman las fosforitas, en niveles de baja energía, y son indicadores de secuencias transgresivas.

Teniendo en cuenta los segmentos diferenciados para cada columna y las facies litoestratigráficas, se realizaron los diagramas de distribución de facies para cada intervalo (Anexo 1 y 2), esto ayudo a correlacionar las secciones por medio de columnas generalizadas y tomando como datum la primera capa de fosforita, como se muestra en la figura 10.

**Figura 10.** Correlación de las columnas estratigráficas de la sección de Rio de Oro a la izquierda y la sección de Lebrija a la derecha, con base en los segmentos diferenciados y la identificación de las litofacies



Fuente. Autor

#### 5.4. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LA FORMACIÓN LA LUNA

Para la caracterización geoquímica en las secciones levantadas, se realizó pruebas de pirolisis Rock-Eval, TOC y petrografía Orgánica en 190 muestras como se relacionan en la tabla 11.

**Tabla 11.** Relación del número de muestras para geoquímica

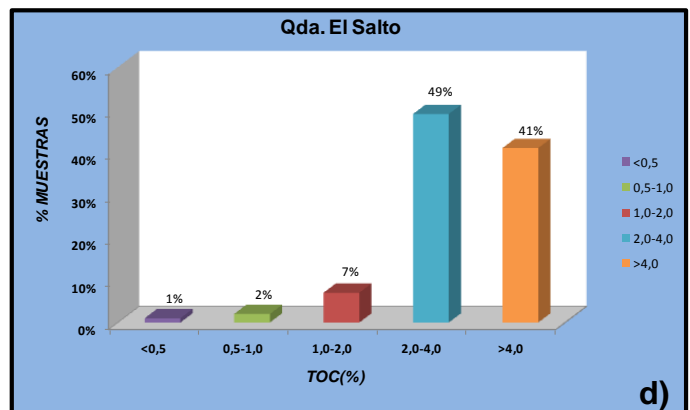
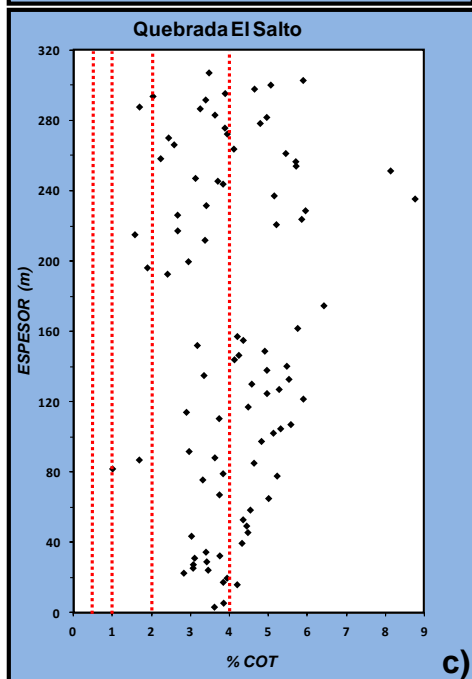
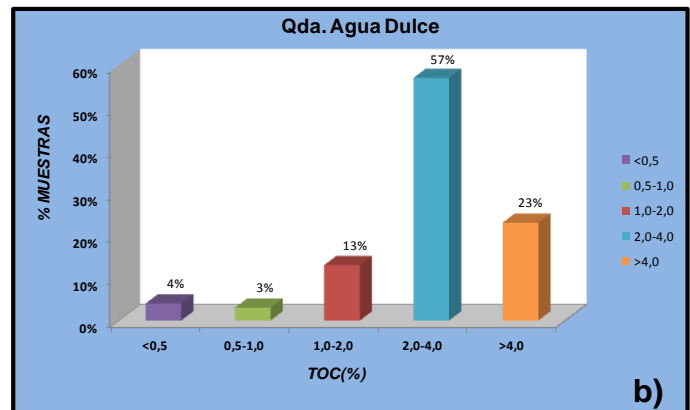
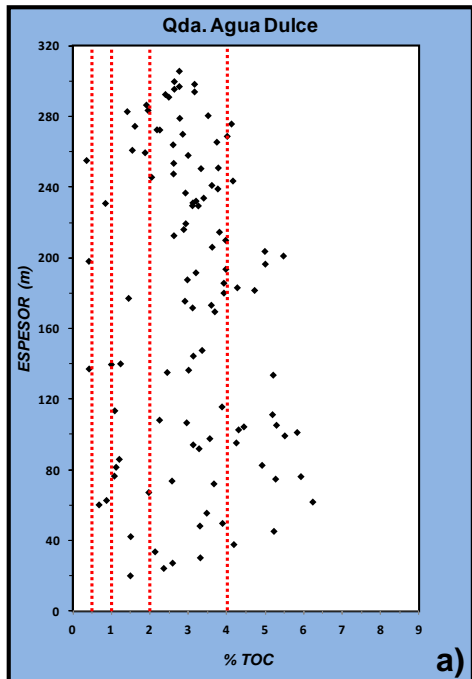
ÁREA	PIROLISIS ROCK-EVAL VI	COT-LECO	AVK
Qda. Agua Dulce	100	100	9
Qda. El Salto	90	90	5

Fuente. Autor

**5.4.1. Contenido orgánico.** Este parámetro se midió por medio de Carbono Orgánico Total (TOC). El TOC en las muestras del área de Lebrija presenta proporciones que varían entre 0,4 y 6,3% COT con un promedio de 3,2% TOC, y aproximadamente el 80% de estos valores se encuentran por encima de 2,0% (figura 11 a y b).

Por otra parte los datos de TOC en las muestras del área de Rio de Oro varían entre 0,5 y 8,8% con un promedio de 3,8% y en las cuales más del 90% de los datos se encuentran por encima del 2,0% (figura 11c y d). Según los datos mencionados anteriormente se puede indicar que la riqueza orgánica de la Formación La Luna en esta provincia de la CVMM se sitúa en el rango de muy buenos a excelentes en ambas secciones.

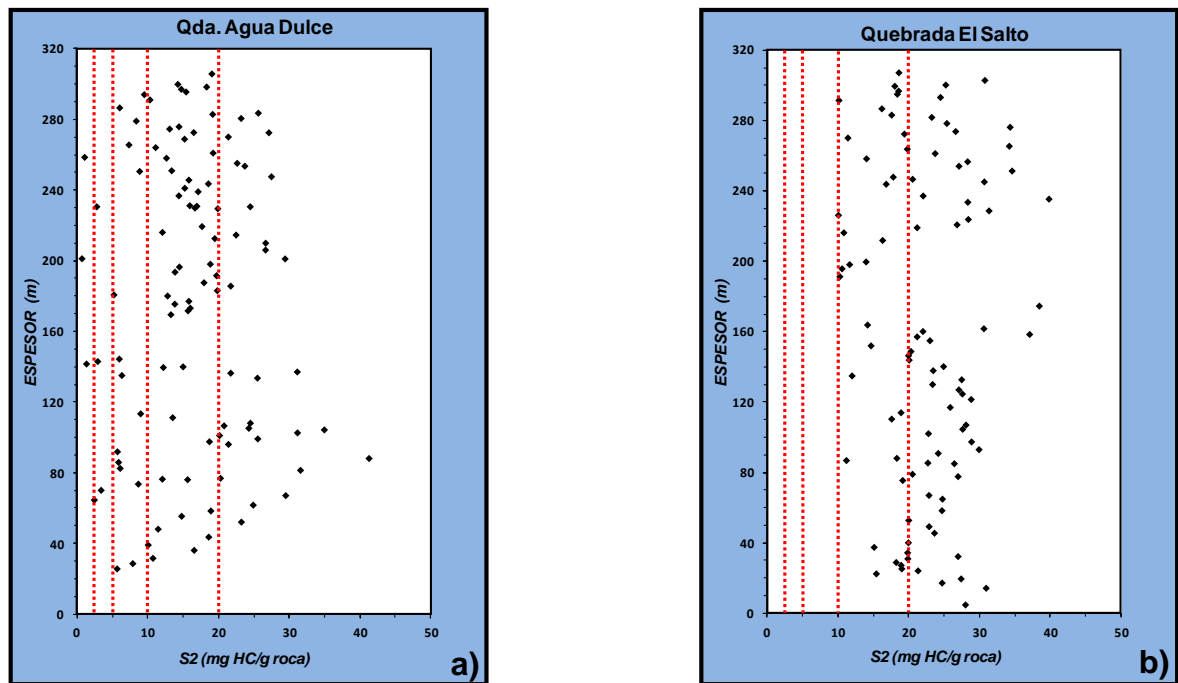
**Figura 11.** Distribución espacial a) Quebrada Agua Dulce, b) Quebrada El Salto y porcentual c) Quebrada Agua Dulce y d) Quebrada El Salto, del contenido de materia orgánica para la Formación La Luna.



Fuente. Autor

**5.4.2 Potencial generador.** Los valores de potencial generador actual (S2) para la Formación La Luna alcanzan valores máximos en el área Sur de 41,36 mg HC/ g roca, y para la parte Norte de 39,85 mg HC/ g roca que la clasifican como excelente para la generación de hidrocarburos. Cabe anotar que el valor original pudo ser mayor si se toma en cuenta que la Formación en los dos sectores presenta rangos de madurez temprana (figura 12).

**Figura 12.** Distribución del potencial generador de la Formación La Luna en a) Quebrada Agua Dulce y b) Quebrada El Salto.

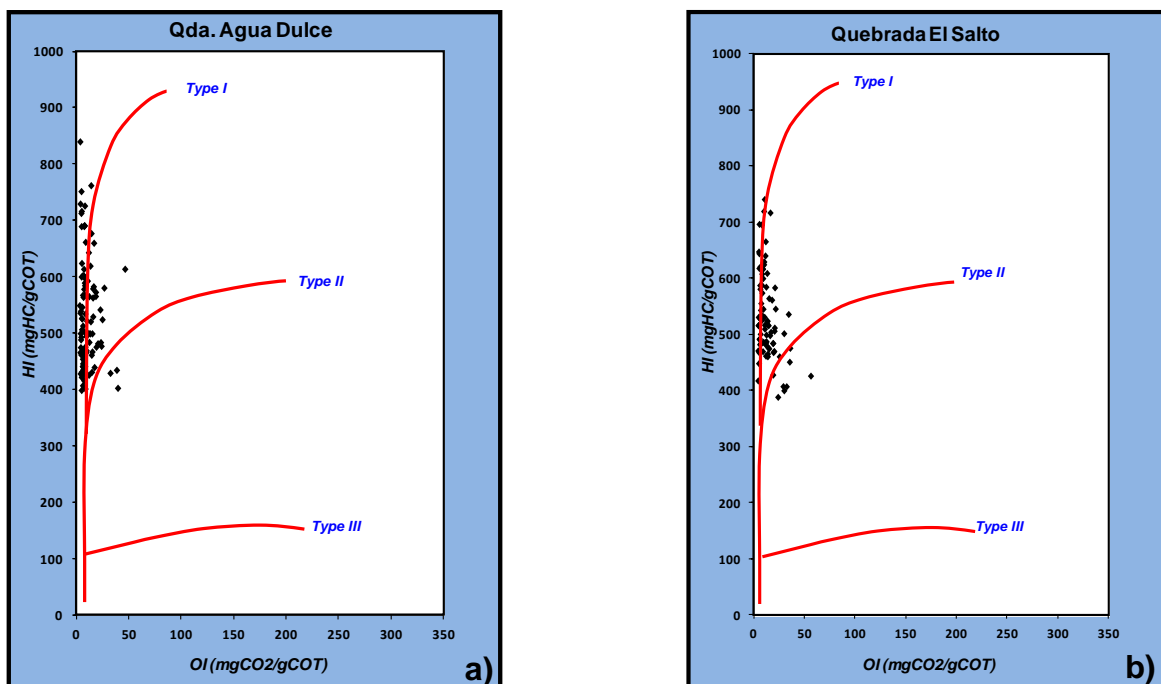


Fuente. Autor

**5.4.3. Calidad de la materia orgánica.** La calidad o tipo de materia orgánica se evaluó mediante Pirólisis Rock-Eval VI por medio del Índice de Hidrógeno (IH) y petrografía orgánica de luz transmitida. El diagrama modificado de Van Krevelen (figura 13), permite visualizar que el kerógeno predominante para la Formación La

Luna, a partir de la madurez actual se sitúa entre tipo II/I, con valores promedio de 516 mg HC/ g roca para el área de la Quebrada Agua Dulce y de 521 mg HC/ g roca para el área de la Quebrada El Salto. Lo anterior indica que la Formación La Luna tiene buena a excelente capacidad para generar hidrocarburos líquidos principalmente y algunas cantidades de gas.

**Figura 13.** Diagrama de Van Krevelen modificado para la Formación La Luna a) Quebrada Agua Dulce y b) Quebrada El Salto.

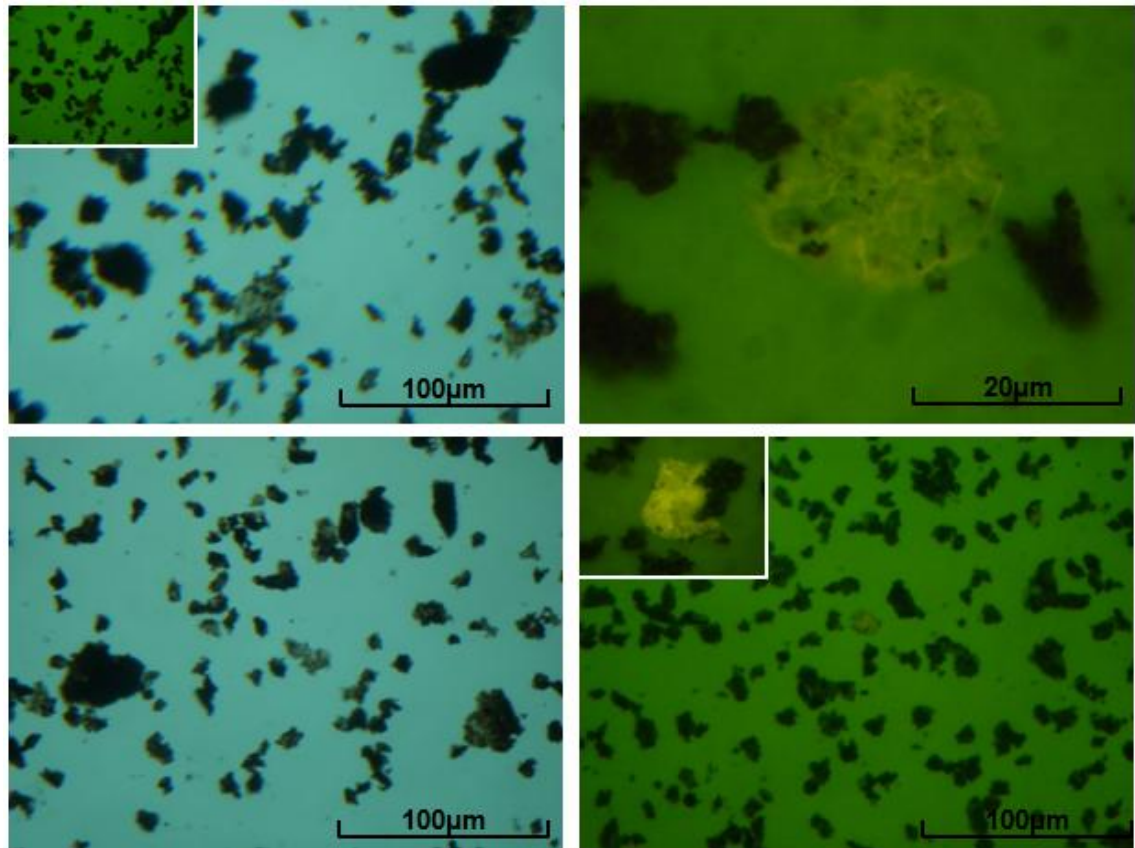


Fuente. Autor

La caracterización de la materia orgánica, analizada a través de petrografía orgánica, permite determinar que la Formación La Luna en los sectores de Lebrija y Río de Oro está compuesta por material amorfo, el cual alcanza un promedio del 91% en las muestras analizadas, que se presenta con formas poligonales que puede ser por descomposición bacteriana de fitoclástos y formas irregulares que corresponderían a la descomposición de Liptinitas (figura 15a y c). Se identificaron

algunos palinomorfos marinos (dinoflagelados) (figura 15b y d) indicadores de kerógeno tipo II principalmente, que es generador de petróleo y en menores cantidades gas.

**Figura 14.** a y c) Microfotografías tomada en luz transmitida con donde se observa materia orgánica amorfa no fluorescente en las Qdas. Agua Dulce y El Salto respectivamente; b y d) Microfotografías tomada en luz fluorescente, donde se observa un dinoflagelado con buena fluorescencia en contacto con Materia orgánica inerte para las Qdas. Agua Dulce y El Salto respectivamente.

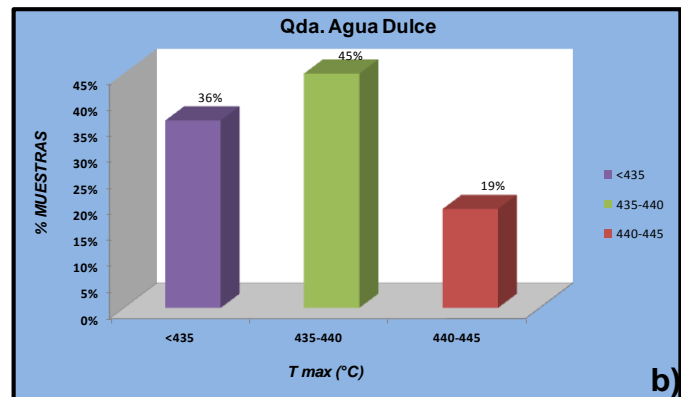
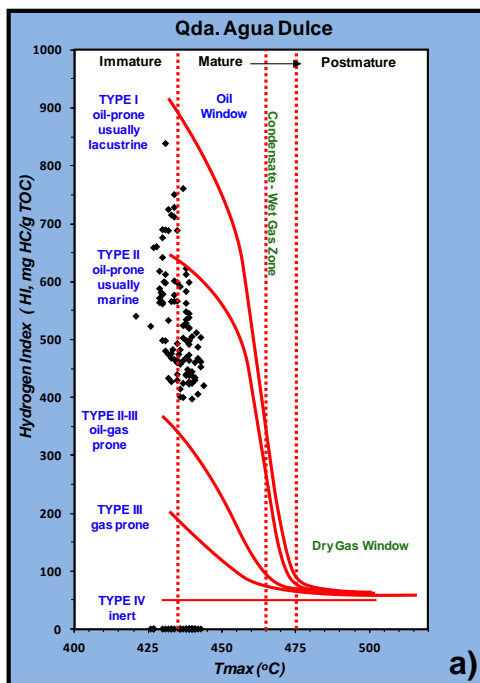


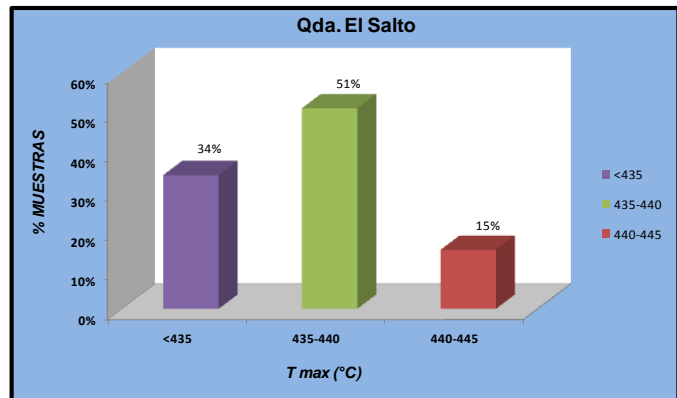
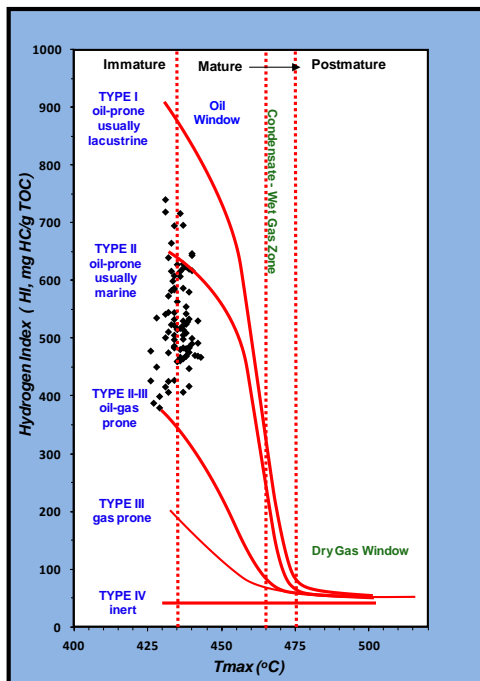
**Fuente.** Laboratorio de geoquímica ICP-ECOPETROL, 2012.

**5.4.4. Madurez de la materia orgánica.** Los indicadores de madurez térmica de la materia orgánica utilizados son: Tmax (Pirólisis Rock-Eval), y S1.

La Tmax para la Formación La Luna en el área de estudio muestra que las muestras en las secciones estudiadas se encuentran entrando en las fases iniciales de la ventana de generación de aceite, con valores promedios de 436°C; como se observa en la figura 15.

**Figura 15.** Evaluación de la madurez térmica e histograma de distribución de la Tmax en las muestras para la Formación La Luna en a, b) La Qda. Agua Dulce y c y d) La Qda. El Salto.



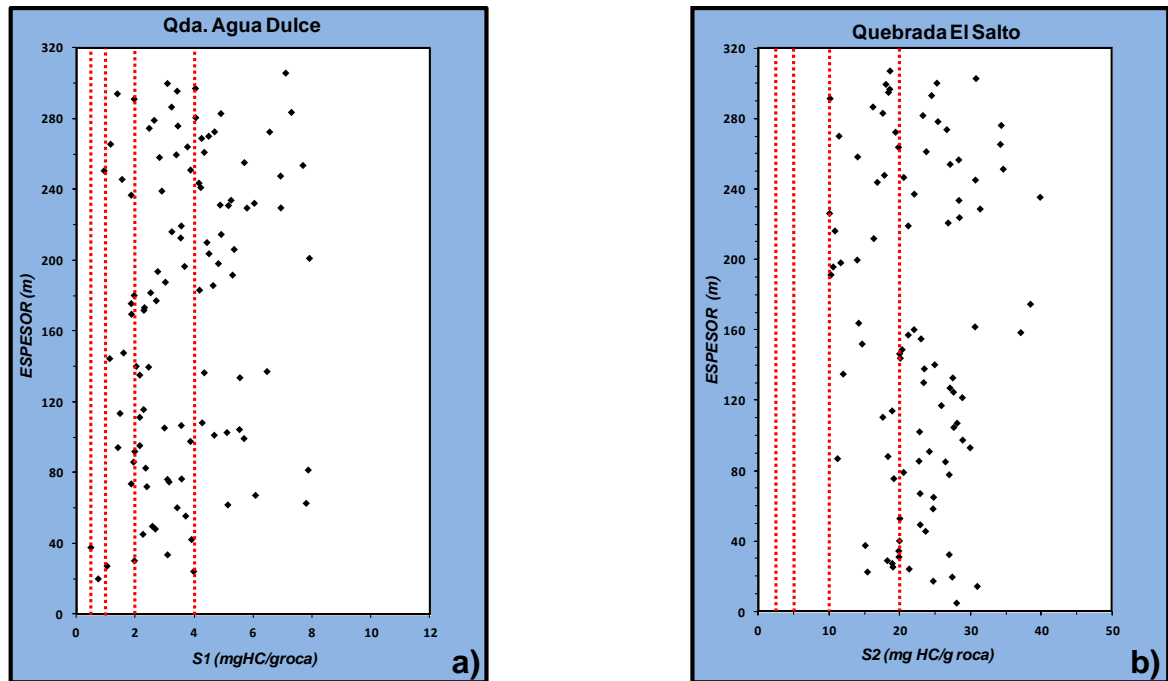


Fuente. Autor

El histograma %muestras vs Tmax (figura 15b y d) indica que un 37% de las muestras para la Qda. Agua dulce y 34% en la Qda. El Salto se encuentra en estado inmaduro, y 63% de las muestras de la Qda. Agua Dulce y 67% en la Qda. El Salto presentan un estado de madurez temprana., pero la tendencia en las dos secciones es constante.

La cantidad de hidrocarburos libres obtenido por análisis de S1, permite observar a partir de la columna de la Quebrada agua Dulce, que los valores están entre 0,5-7,92 mg HC/ g roca y el promedio es de 3,57 mg HC/ g roca; en cambio en la Qda. El Salto se presenta una disminución en los valores de este parámetro alcanzando solo rangos entre 0,03-5,05 mg HC/ g roca con promedio de 2,05 mg HC/ g roca. De acuerdo con estos rangos, el sector Noreste de la cuenca se enmarca en valores de muy buenos (figura 16).

**Figura 16.** Distribución de hidrocarburos libres de la Formación La Luna en a) Quebrada Agua Dulce y b) Quebrada El Salto.



Fuente. Autor

**5.4.5 Índice de producción y potencial petrolífero.** Estos parámetros indican que la parte Norte del área estudiada presenta una madurez temprana con valores promedio de 0,1 y el potencial petrolífero es excelente con una valor promedio de 22 mg HC/g roca.

Por el contrario la sección de la Qda. Agua Dulce, presenta una madurez temprana-media con valores promedio de 0,18 y el potencial petrolífero se encuentra con rango promedio de excelente con valores 20,3mg HC/g roca; esta madurez temprana media que se observa hacia la parte sur del área probablemente está asociado a que algunas muestras tomadas presentan valores de IP mayores a 0,2, indicando así una posible migración temprana de aceite.

Esta migración temprana puede estar asociada a las condiciones de alto contenido orgánico y al tipo de materia orgánica (Tipo II/I), lo que hace probable que dicha formación haya generado por debajo de los valores estándar de madurez de la roca.

En la tabla 12 se resumen estos dos parámetros para las secciones levantadas:

**Tabla 12.** Evaluación de los parámetros de índice de producción y potencial petrolífero para la Formación La Luna.

<b>SECCION</b>	<b>Índice de Producción</b>	<b>Potencial Petrolífero (mg HC/g roca)</b>
<b>Qda. Agua Dulce</b>	0,18	20,3
<b>Qda. El Salto</b>	0,1	22

**Fuente.** Autor

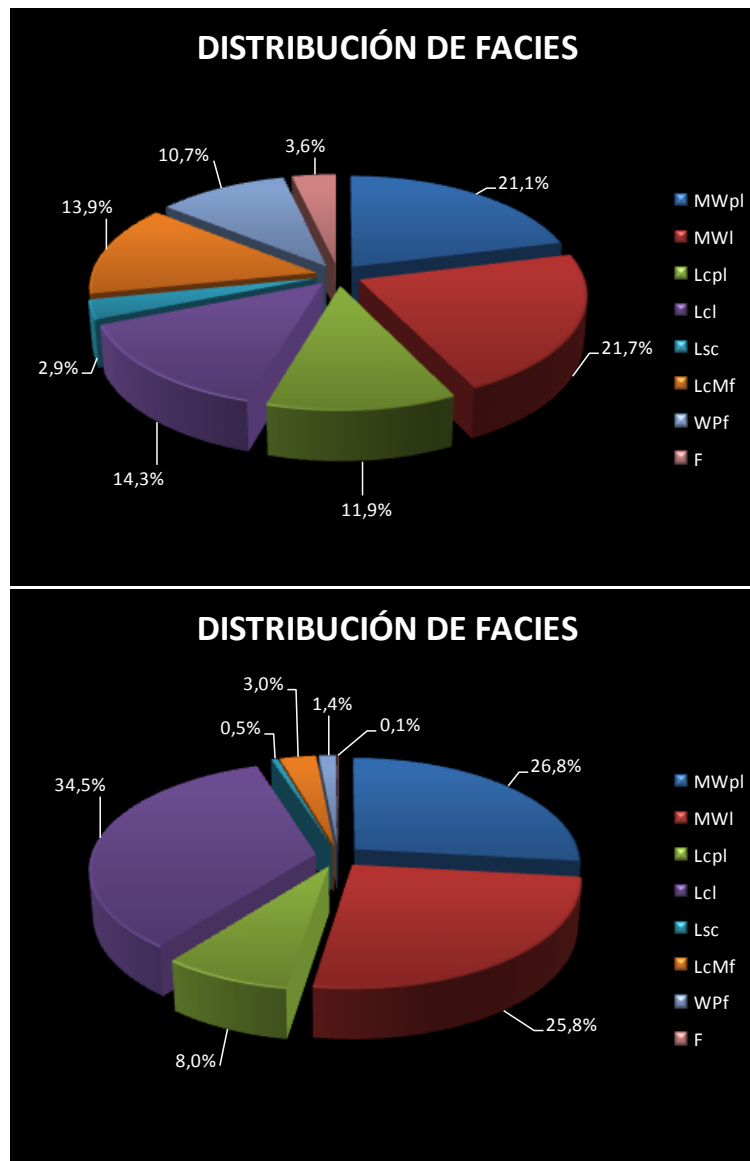
## **5.5. DEFINICIÓN DE LAS FACIES GENERADORAS DE LA FORMACIÓN LA LUNA**

Realizada la caracterización geoquímica de las columnas levantadas, y al evaluar la distribución de cada una de las facies referenciadas anteriormente y su correlación con los datos de geoquímica se observa que:

Para el área de Lebrija la facies que presenta una mayor distribución en la columna es MWI con 21,7% de espesor y MWpl con 21,1%, y para la parte de Río de Oro la mejor distribución en la columna se observa en la facies Lcl con 34,5% (Figura 17); En cuanto a geoquímica la facies que muestra las condiciones más favorables como roca potencial para toda el área de estudio es Lcl con valores promedios de TOC de 4,7% en la columna de Lebrija y 4,5% en Río de Oro, cabe

destacar que las demás facies descritas en el estudio también tienen buenas condiciones geoquímicas de roca potencial (Tabla 13 y 14).

**Figura 17.** Distribución porcentual de las facies para la Formación La Luna en a) sección Agua Dulce y b) sección El Salto.



Fuente. Autor

**Tabla 13.** Relación de facies, contenido orgánico e índice de hidrógeno en la Quebrada Agua Dulce.

<b>FACIES</b>	<b>ESPEJOR (%)</b>	<b>TOC (% wt)</b>	<b>S1 (mg HC/g roca)</b>	<b>HI (mg HC/g COT)</b>
<b>MWpl</b>	21,1	3,2	3,6	523
<b>MWI</b>	21,7	3,7	3,3	475
<b>Lcpl</b>	11,9	4,7	4,0	491
<b>Lcl</b>	14,3	4,7	3,6	470
<b>LcMf</b>	13,9	4,2	4,0	521
<b>WPf</b>	10,7	3,2	3,9	538
<b>F</b>	3,6	2,6	3,7	589
<b>Lsc</b>	2,9	3,1	3,4	527

Fuente. Autor

**Tabla 14.** Relación de facies, contenido orgánico e índice de hidrógeno en la Quebrada El Salto.

<b>FACIES</b>	<b>ESPEJOR (%)</b>	<b>TOC (%wt)</b>	<b>S1 (mg HC/ g roca)</b>	<b>HI (mg HC/g COT)</b>
<b>MWpl</b>	26,8	3,7	2,5	578
<b>MWI</b>	25,8	4,0	2,3	532
<b>Lcpl</b>	8,0	4,1	2,4	519
<b>Lcl</b>	34,5	4,5	2,2	507
<b>LcMf</b>	3,0	4,9	2,2	501
<b>WPf</b>	1,4	0,5	0,2	253
<b>F</b>	0,1	3,4	1,0	535

Fuente. Autor

Una vez obtenida la estadística geoquímica de cada una de las litofacies, se procede a correlacionar estos valores con la información estratigráfica, para establecer los segmentos que pueden tener las mejores condiciones de generación (tabla 15), donde se observa lo siguiente: Para el área de Lebrija los

mejores segmentos, son los 1 y 3 y para el área de Rio de oro, son los segmentos 1 y 4; estos segmentos son dominados por la facies Lcl siendo así los intervalos generadores por excelencia.

**Tabla 15.** Relación de los segmentos estratigráficos con la principal facies generadora.

<b>SEGMENTO</b>	<b>Qda. Agua Dulce</b>	<b>Qda. El Salto</b>
<b>1</b>	Lcl	Lcl
<b>2</b>	MWI	MWI
<b>3</b>	Lcl	Lcl
<b>4</b>	MWI	Lcl
<b>5</b>	MWpl	MWpl
<b>6</b>	LcMf	F

**Fuente.** Autor

## **5.6. DEFINICIÓN DE LOS MIEMBROS DE LA FORMACIÓN LA LUNA**

Para llevar a cabo este objetivo, se tuvo en cuenta la siguiente información:

- Se tomó como primera referencia la columna levantada en el área de Lebrija, en la cual trabajos previos han reportado los tres miembros de la Formación La Luna, mencionados anteriormente (Miembros Salada, Pujamana y Galembó).
- Los datos geoquímicos anteriormente mostrados, no muestran cambios que indiquen la presencia de los 3 miembros como se esperaba.
- Los espesores para la Formación La Luna, en la parte Noreste de la Cuenca del VMM se reportan así: Miembro Salada-Pujamana 130 a 240m

aproximadamente y para el Miembro Galembo los espesores varían entre 330 a 340m aproximadamente, estos datos son tomados de la literatura.

- Teniendo en cuenta la descripción litológica original reportada por Morales *et al.*, 1958, los miembros se definen en la tabla 16.

**Tabla 16.** Definición de los miembros para la Formación La Luna.

SALADA	PUJAMANA	GALEMBO
Shales calcáreos con estratificación delgada, negros, duros, en capas delgadas de calizas negras de textura fina con cintas y concreciones de pirita; además presenta concreciones elípticas de caliza.	Shales calcáreos con estratificación delgada, de color gris a negro.	Shales calcáreos con estratificación delgada, negro, duro, con algunas intercalaciones de caliza arcillosa; se observan concreciones de caliza discoidal con amonitas, capas de chert estratificado azul-negro, capas fosfáticas hacia el tope con fragmentos de hueso y de vertebras de peces y escasos dientes.

**Fuente.** Morales *et al.*, 1958

De acuerdo a la información mostrada (geoquímica, estratigráfica y los espesores reportados para cada uno de los miembros de la Formación La Luna, las secciones levantadas en este trabajo se relacionaron con el Miembro Galembo.

## 5.7. ASOCIACIÓN DE FACIES

Considerando que las sucesiones verticales de facies pueden ser diferentes para el mismo ambiente depositacional debido a que los elementos geomorfológicos pueden migrar, desaparecer o formarse durante episodios de progradación y agradación, se puede prever la ocurrencia de diferentes sucesiones en posiciones específicas variando a lo largo del rumbo y buzamiento depositacional.

Teniendo en cuenta lo anterior fue posible identificar cuatro asociaciones de facies:

- **Asociación (LI):** Depositadas en un ambiente de baja energía posiblemente con circulación restringida y con aporte continental, situado por debajo del nivel de oleaje en condiciones normales, y representa la parte más somera de la secuencia descrita.
- **Asociación (Lcl, MWpl, Lcpl, MWI, Lsc):** Interpretada como un ambiente de baja energía comprendido entre el nivel base del oleaje y el de tormentas, caracterizado por la acumulación de partículas de micrita y lodo terrígeno.
- **Asociación (MWI, MWpl, Lcl, Lcpl, Lsc):** Interpretada como un ambiente de baja energía comprendido entre el nivel base del oleaje y el de tormentas pero más somera que la secuencia anterior, caracterizado por la acumulación de partículas de micrita y el incremento del carácter calcáreo.
- **Asociación (MWpl, LcMf, MWI, Lcpl, Lcl, WPf, Lsc):** Depositada en un ambiente de energía baja a media, encontrada por encima y debajo del nivel base del oleaje, caracterizada por la presencia de pellets, fosfatos y un aumento en fragmentos de bioclastos posiblemente de bivalvos y peces.
- **Asociación (WPf, F, MWI, LcMf, Lsc, MWpl):** Se interpreta como una sucesión de energía media a baja, por debajo del nivel base del oleaje, caracterizada por la presencia fosforitas.
- **Asociación (LcMf, WPf):** Se interpreta como una sucesión de energía baja, por debajo del nivel base del oleaje, caracterizada por la presencia fosfatos.

## 5.8. MODELO DEPOSICIONAL

Para definir el ambiente de depósito de la Formación La Luna en la CVMM, se tuvo en cuenta las siguientes apreciaciones:

- La cuenca cretácica colombiana durante la depositación de la Formación *La Luna*, correspondía a un mar epicontinental bordeado por el escudo de Guyana al Oriente y por la Cordillera Central al Occidente (Guerrero *et al.*, 2000 en Bernal, 2009).
- Peters *et al.*, 2005, propone una relación entre el ambiente deposicional, litofacies y tipo de Kerógeno, (Tabla 17).

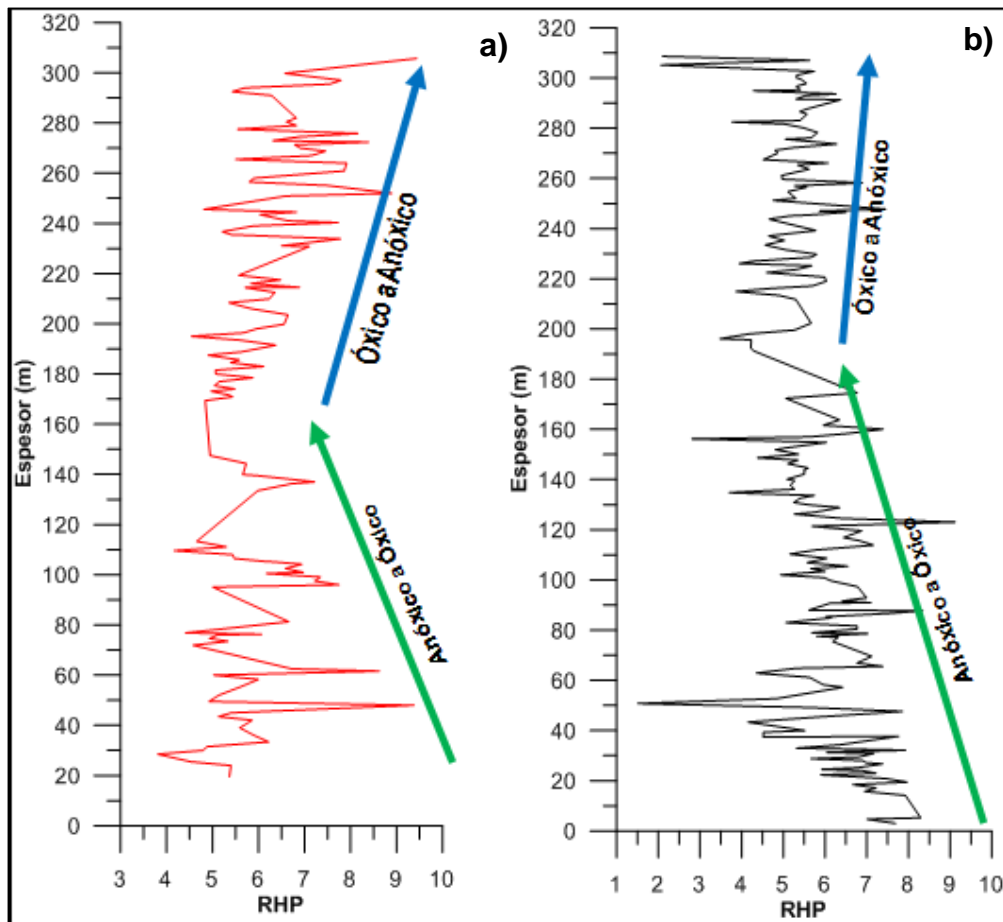
**Tabla 17.** Relación del ambiente deposicional, litofacies y tipo de Kerógeno de acuerdo a la roca fuente.

Tectonic setting	Depositional environment	Lithofacies	Kerogen type
Marine source rocks			
Restricted basin	Anoxic with clay	Marine shale	II
Restricted basin	Anoxic, saline with or without clay	Carbonate	IIS
Epicontinental seaway	Anoxic	Shale, carbonate	II
Upwelling shelfal area	Anoxic or suboxic	Shale, carbonate, chert, phosphorite	II, IIS
Open ocean	Oxic or suboxic	Prodelta shale	III
Non-marine source rocks			
Coastal swamp	Anoxic	Coal	III
Paralic basin	Oxic or suboxic	Prodelta shale	III
Open lacustrine	Anoxic, freshwater	Oil shale	I
Restricted lacustrine	Anoxic, saline	Oil shale	IIS
Marginal lacustrine, fluvial	Oxic or suboxic	Siltstone, shale	II/III

**Fuente.** Tomado de Biomarker-Guide Volumen 1, 2005.

- Arthur and Schlager, (1979), argumentan que las rocas carbonatadas contiene entre 0,1-1% de COT, pero durante eventos de anoxicidad esos valores pueden alcanzar valores entre 6-9% de COT, debido a las condiciones que colaboran con una mayor deposición de materia orgánica.
- La curva de RHP, muestra dos secuencias bien diferenciadas una de aumento de la anoxicidad del ambiente en la parte superior, y otra con aumento de los valores de oxígeno en la parte inferior (figura 18).

**Figura 18.** Curva de RHP para la Formación La Luna en los sectores de a) Lebrija y b) Rio de Oro.



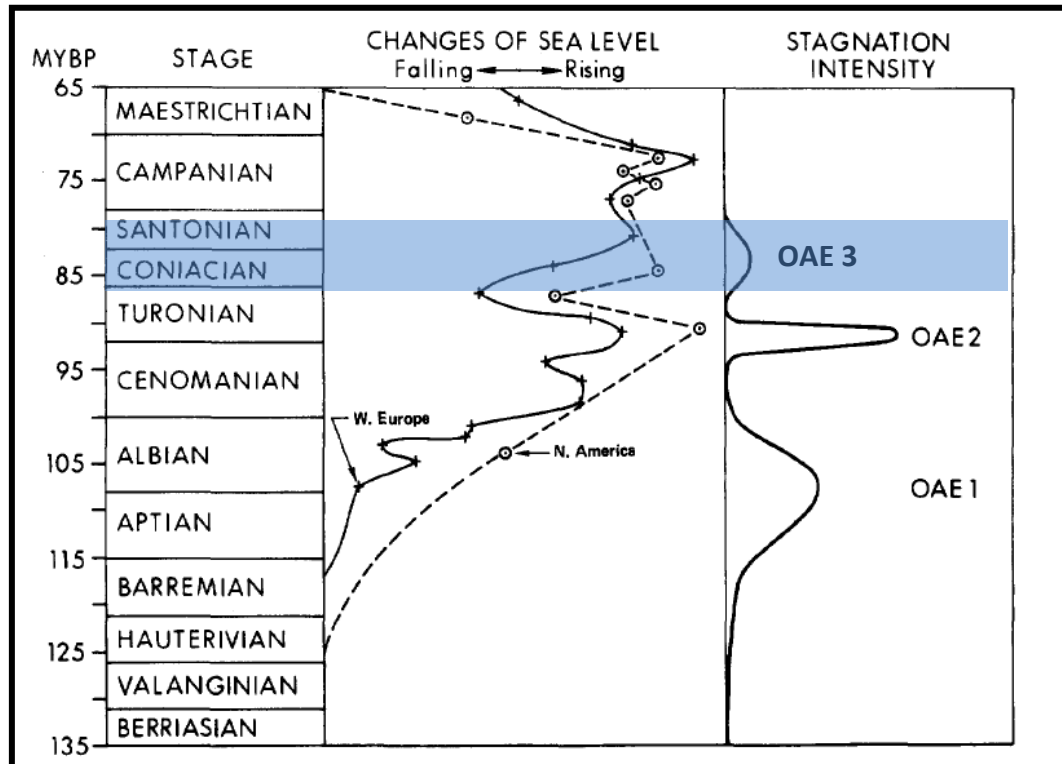
Fuente. Autor

- En el área de Lebrija se reporta una mayor productividad biológica, reflejada por el aumento de calizas con textura Wackestone, a diferencia del área de Rio de Oro.
- La baja energía del medio, permitió la deposición de rocas lodosas, como Lodolitas, Lodolitas calcáreas, y con carácter calcáreo como Mudstone y Wackestone.
- Un aumento en el régimen de energía hacia la parte superior de las secuencias permito la deposición de rocas calcáreas con presencia de fragmentos de conchas de bivalvos, como Wackestone, Packstone y fosforitas.
- Se interpreta la presencia de corrientes ascendentes, como una de las causas probables del contenido de fosforo y sílice.
- Alto contenido orgánico, colores oscuros de la roca, olor bituminoso, laminación delgada, presencia de organismos de tamaños pequeños y fósiles traza sugieren condiciones bajas en niveles de oxígeno; además que la presencia de pirita sugiere un ambiente que pudo variar de condiciones subóxicas (0-0,2 ml/O<sub>2</sub>) a disóxicas (0,2-1,0 ml/O<sub>2</sub>).

Las anteriores características, indican que la Formación *La Luna* posiblemente fue depositada en un ambiente de plataforma carbonatada epeirica, la cual es relacionada con mares epicontinentales (Schlanger, 2005), circulación restringida, bajo ángulo de inclinación que permite la acumulación de las facies lodosas que se encuentra en la secuencia y los sedimentos carbonatados tienden a ser micríticos, principalmente derivado de organismos. Además, durante este periodo el nivel de oxígeno era muy bajo, el cual se asocia con los niveles altos de COT,

un evento global de anoxicidad reportado como OAE III (figura 19) y condiciones propicias (reductoras) para la formación de pirita, chert y fosforita.

**Figura 19.** Eventos anóxicos durante el Cretáceo.



**Fuente.** Modificado de Arthur y Schlanger, 1979.

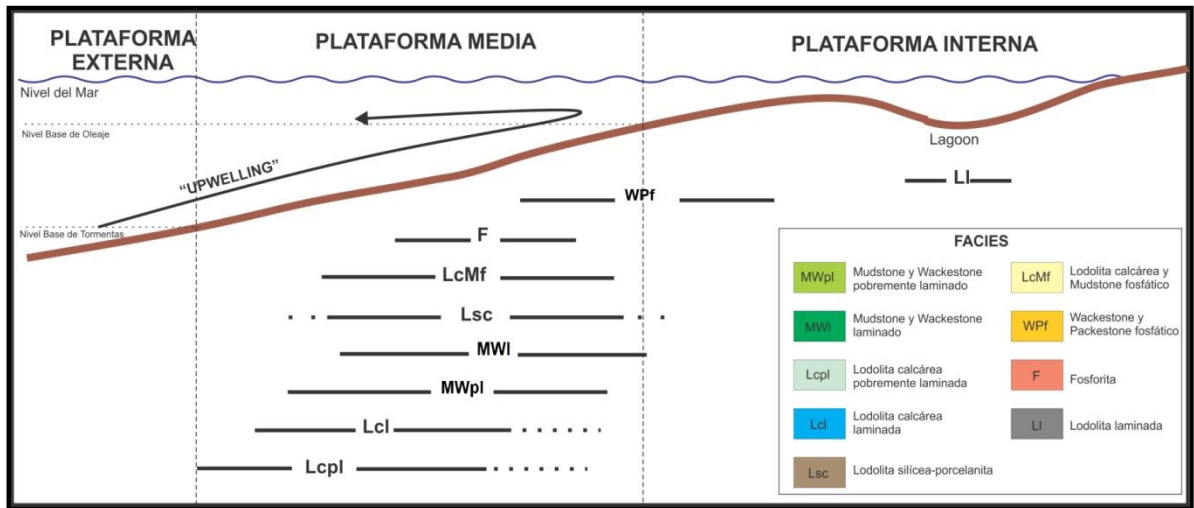
La parte inferior de las secciones estratigráficas corresponde a las litologías lodosas, con alto aporte terrígeno de grano muy fino, tamaño limo y arcilla, y un aporte bajo de material carbonatado, lo que indica que posiblemente se encontraba cerca al continente, además la laminación que esta presenta corresponde a regímenes de energía bajo, posiblemente relacionado con una circulación restringida de la cuenca que puede ser consecuente con su deposición en un ambiente de Lagoon.

Seguido se encuentra una etapa que corresponde a la secuencia más profunda de la formación, en donde se observan intercalaciones entre lodolitas calcáreas, calizas Mudstone y Wackestone y niveles escasos de porcelanitas (por desintegración de organismos silíceos y aporte del continente, aunque no se descarta que puedan tener un origen volcánico. Rangel *et al.*, 2000) que corresponde a la asociación 2 y 3, y se encuentran relacionadas a una secuencia de aumento en la concentración de oxígeno. Por el contrario en la parte superior se observa que las condiciones cambian debido a la presencia de litologías como calizas fosfática con textura Mudstone, Wackestone y Packstone, lodolitas fosfáticas, y fosforitas y al aumento de los fósiles encontrados como conchas que son más abundantes a comparación de la parte inferior, pellets, pelóides y una mayor abundancia de porcelanitas que corresponde a la asociación 4 y 5; lo anterior indica posiblemente un aumento en la energía; además la curva de RHP muestra una caída en el nivel de oxígeno del sistema, que puede estar asociado a un aumento de nutrientes y productividad biológica debido a la presencia de corrientes ascendentes, que son precursoras de fosfatos y sílice y puede ser una evidencia del aumento relativo del nivel del mar, ya que las rocas fosfáticas estas relacionadas con eventos transgresivos.

La parte Norte la sección es de carácter más lodoso, debido a una mayor profundización de la cuenca, además el espesor de esta formación en esta parte puede ser mayor, ya que no se reconoció la base y el tope en la sección levantada (Qda. El Salto).

A continuación se muestra el modelo de depositación de la Formación La Luna.

Figura 20. Modelo deposicional de la Formación La Luna.



Fuente. Autor

## 6. CONCLUSIONES

- ✓ La Formación La Luna en los sectores de la “Quebrada Agua Dulce y Quebrada El Salto”, tiene un espesor aproximado de 310m y 313m respectivamente, para estas secciones fue posible identificar 9 litofacies (Lcl, Lcpl, MWI, MWpl, Lsc, LcMf, WPf, F y LI) bajo el criterio litológico y de estructuras sedimentarias presentes, que permitió definir 6 segmentos correlacionables teniendo en cuenta su distribución; además se observa que hacia la parte Norte del área, dicha formación presenta un mayor porcentaje de los niveles lodosos, que podrían indicar una mayor profundización de la cuenca hacia ese sector.
- ✓ Los análisis geoquímicos indican que la Formación La Luna en la parte noreste de la Cuenca del Valle medio del Magdalena presenta una riqueza orgánica en rangos de Muy bueno-Excelente y presenta un Kerógeno Tipo II/I; además los valores de la Tmax muestra que la parte Noreste de la cuenca está entrando en la ventana de generación de aceite, y los datos de S1 que hay un aumento de la madurez hacia la parte sur del área.
- ✓ Las facies que presentan un mayor porcentaje en la columna para la parte de Lebrija es MWI con 21,7% de espesor y MWpl con 21,1%, y para el área de Rio de Oro es la facies Lcl con 34,5%; En cuanto a geoquímica las facies que muestra las condiciones más favorables como roca potencial para toda el área de estudio es lcl con valores promedios de TOC de 4,7% en la columna de Lebrija y 4,5% en Rio de Oro, y hacen su mejor presencia en el segmento 1 y 3 para el área de Agua Dulce y en los segmento 1 y 4 para el área de el Salto, siendo así los mejores intervalos generadores.

- ✓ La curva de RHP indica la presencia de dos eventos, el primero hacia la base que está relacionado con un aumento en la concentración de oxígeno y un segundo evento en la parte superior asociado a un aumento de la anoxicidad del medio, y que puede ser relacionado con el Evento Anóxico Global conocido como OAE3, de acuerdo a las edades reportadas por Morales *et al.*, 1958.
- ✓ Teniendo en cuenta características litológicas originales, parámetros geoquímicos y espesores reportados en la literatura para cada miembro de la Formación La Luna, fue posible correlacionar las secciones levantadas con el miembro Galembo.
- ✓ La Formación La Luna fue posiblemente depositada en un ambiente de plataforma de carbonatos epeirica, la cual permite que material micrítico sea el principal sedimento carbonatado presente, con regímenes de baja energía y en condiciones de disminución de la concentración de oxígeno.
- ✓ En la parte superior de la sección levantada en el área de Agua Dulce donde se observa rocas con altos contenidos de fosfatos y sílice puede estar asociado la presencia de corrientes de surgencia que a su vez puede ser una de las causas de la disminución en el contenido de oxígeno.
- ✓ La Formación La Luna presenta condiciones geoquímicas óptimas para ser considerada como un posible prospecto de yacimiento de aceite no convencional "Oil Shale".

## 7. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios de bioestratigrafía y palinología que permita determinar por datos de batimetría la profundidad de la cuenca y definir los contactos con la formación infrayacente y suprayacente, además de apoyar los datos de los miembros presentes en el área de estudio.
- Realizar estudio de isotopos de Oxigeno y contenido de azufre que permitan relacionar la Formación La Luna con los eventos de anoxicidad.
- Realizar el levantamiento de la Formación La Luna en lugares diferentes, sobre la parte Norte de la cuenca, que sirva para correlacionar de una mejor manera su distribución y tener un mejor control facial.

## REFERENCIAS

- **Abouelresh, Mohamed and Slatt, Roger**, 2012. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett Shale in east-central Fort Worth Basin, Texas. AAPG Bulletin, V. 96, N° 1, p. 1-22.
- **Aguilera, Roberto**, 2009. Play Calcáreo de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena. ¿Un Gigante Dormido?. RA Geología E.U. Presentado a ACGGP “X simposio Bolivariano Exploración Petrolera en Cuencas Subandinas, Cartagena, 4p.
- **Arthur, Michael A. and Schlager, Seymour O.**, 1979. Cretaceous “Oceanic Anoxic Events” as Causal Factors in Development of Reef-Reservoired Giant Oil Fields. AAPGE Bulletin, V. 63, N°6, p. 870-885.
- **Barrero, D., Pardo A., Vargas C. and Martínez F.**, 2007. Colombian Sedimentary Basins. ANH, p. 45.
- **Bernal, Luis A.**, 2009. Caracterización Estratigráfica y Petrográfica de la Formación *La Luna* en Sector del tablazo, Valle Medio del Magdalena. Universidad Nacional de Colombia. Presentado a ACGGP “X simposio Bolivariano Exploración Petrolera en Cuencas Subandinas, Cartagena, 6p.
- **Brookfield, M.; Hemmings, D. and Van Straaten, P.**, 2009. Paleoenvironments and origin of the sedimentary phosphorites of the Napo Formation (Late Cretaceous, Oriente Basin, Ecuador. Journal of South American Earth Sciences, N° 28, p. 180-192.
- **Carvajal, Humberto**, 2004. Nuevas consideraciones acerca del estado de madurez termal de la Formación *La Luna* en el Valle Medio del Magdalena, Colombia. Tesis de Grado, Universidad Industrial de Santander, 106p.

- **Chutakositkanon, Vichai; Charusiri, Punya and Sashida, Katsuo**, 2000. Lithostratigraphy of Permian marine sequences, khao Pun Area, central Thailand: Paleoenvironment and tectonic history. *Island Arc* 9, p. 173-187
- **Clavijo J., Mantilla, L., Pinto J., Bernal, L. y Pérez, A.**, 2008. Evolución Geológica de la Serranía de San Lucas, Norte de Valle del Magdalena y Noroeste de la Cordillera Oriental. .
- **Cooper, M.A., Addison, F.T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R.H., Hayward, A.B., Howe, S., Martinez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A.J., and Taborda, A.**, 1995, Basin Development and Tectonic History of the Eastern Cordillera, Llanos Basin and Middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bull.*, V.19, p. 1421-1443.
- **Cruz M.**, 2005. Aplicación del análisis fractal a los yacimientos naturalmente fracturados (YNF): ejemplo en la Formación Rosablanca del Valle Medio del Magdalena (tesis de pregrado). Escuela de Geología, Universidad industrial de Santander, 189p.
- **Dengo, C. A., and Covey M. C.**, 1993, Structure of the Eastern Cordillera of Colombia; Implications for trap styles and regional tectonics. *AAPG Bull.*, V.77, p. 1315- 1337.
- **Ercegovac, Marko and Kostic, Aleksandar**, 2006. Organic facies and palynofacies: Nomenclature, classification and applicability for petroleum source rock evaluation. *International Journal of Coal Geology*, V. 68, p. 70-78.
- **Etayo, F., Renzoni, G., and Barrero, D.**, 1969, Contornos sucesivos del mar Cretácico en Colombia. Memoria Primer Congreso Colombiano de Geología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, p. 217-252.
- **Etayo, F., Barrero, D., Lozano, H., Espinosa, A., Gonzales, H., Orego, A., Zambrano, F., Duque, H., Vargas, R., Nuñez, A., Alvarez, J., Ropaín,**

**C., Ballesteros, I., Cardozo, E., Forero, H., Galvis, N., Ramirez, C., and Sarmiento, L.,** 1983. Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia. Publicaciones Especiales INGEOMINAS no. 14, p.1-235.

- **Gomez, Olga,** 2006. Separación de los grupos macerales del carbón el uso de flotación en columna. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 93p.
- **Kaur Sihra, Kamalpreet,** 2010. Integrating vitrinite reflectance, Rock-Eval Pyrolysis, Fluorescence microscopy, and palynology of the Athabasca oil sand, Kearl Lake area, northeastern Alberta. Tesis de Maestría, Brock University, Ontario, 159p.
- **Kingston, D. R.; Dishroon, C. P. and Williams, P. A.,** 1983. Global Basin Classification System. The American Association of Petroleum Geologist Bulletin, V. 67, N° 12, p. 2175-2193.
- **Langford, F. and Blanc-Valleron,** 1990. Interpreting Rock-Eval Data Using Graph of Pyrolizable Hydrocarbons vs. Total Organic Carbon. AAPG Bulletin, V. 74, p. 799-804.
- **Llamosa A., Oscar Eduardo,** 2010. Analisis de la continuidad lateralde las sub-unidades reservorio de la Formación Esmeraldas (zona D) en un sector del campo La Cira Infantas, Cuenca del valle medio del Magdalena. Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 100p.
- **Loucks, Robert and Ruppel, Stephen,** 2007. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas. AAPG Bulletin, V. 91, N° 4, p. 579-601.
- **Margotta, C., Jose A., y Ramirez C., Katty M.,** 2004. Caracterizacion quimioestratigrafica de la sección basal de la Formación Querecual, Isla Chimana Grande, Estado Anzoategui. Tesis especial de grado, Universidad central de Venezuela, Caracas, 151p.

- **Maughann, Ward, Pachon, Castro, Abozaglo, Saenz y Durán, 1967.** Columna estratigráfica de la *Formación La Luna*, Levantada en la Quebrada La Sorda.
- **Miceli, Andrea and Philp, R., 2012.** Organic geochemistry of the Woodford Shale, Southeastern Oklahoma; How variable can shales be?. AAPG Bulletin, V. 96, N° 3, p. 493-517.
- **Morales, L. G., and the Colombian Petroleum Industry, 1958.** General geology and oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia, in habitat of oil a symposium: Am. Assoc. Petroleum Geologist, 55p.
- **París y León, 1993.** Fallas activas de Colombia. INGEOMINAS, Cali, Colombia. p. 45.
- **Peters, K., 1986.** Guidelines for Evaluating Petroleum Source Rock Using Programmed Pyrolysis. AAPG Bulletin, V. 70, N° 3, p. 318-329.
- **Peters, K., and Cassa, M., 1994.** Applied Source Rock Geochemistry. The Petroleum System from Source to Trap. AAPG Memoir 60. p. 93-120.
- **Peters, Kenneth; Walters, Clifford and Moldowan, Michael, 2005.** The Biomarker Guide "Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History. Second edition, Cambridge University Press.
- **Rangel, A.; Parra, P. and Niño, C., 2000.** The *La Luna* formation: Chemostratigraphy and organic facies in the Middle Magdalena Basin. Organic Geochemistry, N° 31, p. 1267-1284.
- **Rolón, L., Lorenzo, j., Lowrie, A. and Barrero, D., 2001.** Trust, Kinematics and Hydrocarbon Migration in the Middle Magdalena Basin, Colombia, South America. GCSSEPM Foundation 21<sup>st</sup> Annual Research Conference, 16p.

- **Rolón, L.**, 2004. Structural geometry of the Jura-Cretaceous Rift of the Middle Magdalena Valley Basin- Colombia. (Msc. Thesis). Department of Geology and Geography, West Virginia University, 69p.
- **Royero, G. Jose Maria & Clavijo T. Jairo**, 2001. Memoria explicativa del mapa geológico generalizado del Departamento de Santander a escala 1:400.000. Ingeominas, p. 92.
- **Sarmiento, Luis. F.**, 2001. Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes. Inferences from tectonic models. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam, 295 p.
- **Simandl, G. J., Paradis, S. and Fajber, R.**, 2011. Sedimentary Phosphate Deposits “Mineral Deposit Profile F07”. Geological Fieldwork, 6p.
- **Slatt, Roger and Rodriguez, Norelis**, 2012. Comparative sequence stratigraphy and organic geochemistry of gas shales: Commonality or coincidence?
- **Tissot, B. P. y Welte, D.H.**, 1984. Petroleum formation and occurrences. 2 ed. New York, Springer, 720p.
- **Tyson, R.V.** 1995. Sedimentary Organic Matter: Organic Facies and Palynofacies. Primera Edición. Chapman & Hall, London.
- **VERA. T. (1994)**. Estratigrafía principios y métodos. Editorial Rueda. Madrid España. 650 Pág.
- **Villamil, T. and Pindell, L.**, 1998. 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, p. 286-317.

- **Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J and Restrepo, H., 1973.** Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, departamento de Santander y Norte de Santander. Ingeominas, Bogotá. Boletín Geológico, V. VIII, N° 3, p. 1-140.
- **Wright, V. and Burchette, T., 1998.** Carbonate Ramps. Geological Society Special Publication, N°149.
- **Zapata, E.; Padron, V.; Madrid, I.; Kertzus, V.; Truskowski, I. and Lorente, M.A., 2003.** Biostratigraphic, Sedimentologic and Chemostratigraphic Study of the *La Luna* Formation (Late Tortonian-Campanian) In The San Miguel And Las Hernandez Sections, Western Venezuela. *Palaios*, Vol. 18, p. 367-377.

## **PAGINAS WEB**

- <http://www.aiu.edu/publications/student/spanish/180-207/sedimentologia-sedimentology.html>
- <http://www.geologia.uson.mx/academicos/amontijo/carbonatadas/Introduccion.htm>