

ROLE OF SEDIMENTARY PROCESSES IN THE GENERATION OF HYDROCARBONS IN THE LA LUNA FORMATION

ROL DE LOS PROCESOS SEDIMENTARIOS EN LA GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS EN LA FORMACIÓN LA LUNA

LASCARRO, N. F.¹; MANCO, J. D.²; ROJAS, M. E.³

¹ **M.Sc. Frank Lascarro-Navarro, Ingeniero Geólogo, Fundación Universitaria del Área Andina, e-mail: flascarro@areandina.edu.co**

² **MSc. Dino Carmelo Manco-Jaraba, Ingeniero de Minas, Universidad de La Guajira, e-mail: dinomancojaraba@gmail.com**

³ **M.Sc. Elías Ernesto Rojas-Martínez, Geólogo, Fundación Universitaria del Área Andina, e-mail: eliaser@hotmail.com**

Entidad

Calle 43 No. 57 - 14. Fundación Universitaria del Área Andina. Bogotá. Colombia.
Tel: (601) 22 22800
E-mail: flascarro@areandina.edu.co

Recibido: 27/07/2022 / Aceptado: 18/11/2022

Resumen

Las litologías de la Formación La Luna son ampliamente reconocidas en Colombia por ser roca generadora de hidrocarburos, su génesis está asociada a condiciones ambientales deposicionales anóxicas que prevalecieron durante el Barremiano al Maestrichtiano a nivel global, conformada por una amplia secuencia de lutitas negras con gran cantidad de materia orgánica, intercalada con estratos calcáreos delgados, presentando un espesor total de hasta 600 m; se divide en tres Miembros (Salada, Pujamana y Galembó) cuya sección tipo se encuentra en el estado de Zulia, Venezuela. Su carácter estratigráfico y sedimentológico conlleva a que la Formación La Luna tenga un gran potencial como roca generadora y roca reservorio de yacimientos no convencionales. Esta investigación tiene una metodología basada en la búsqueda, recopilación y examinación exhaustiva de publicaciones realizadas a nivel nacional e internacional, relacionadas con estudios efectuados en la Formación La Luna, enfocados en su importancia sedimentológica e implicaciones como roca generadora de hidrocarburos. La Formación La Luna presentan propiedades físicas y químicas para la acumulación y generación de hidrocarburos con porosidad totalmente saturadas de kerógeno en al menos un 10%-20%, considerándose con alto potencial hidrocarburífero en la cuenca del Catatumbo, Valle Medio del Magdalena y Cesar-Ranchería, cuyo volumen acumulado de hidrocarburo está alrededor de los 2000 Millones de Barriles de Petróleo (MBP) in situ, a profundidades que varían entre los 1.000 a 5.000 m, así como en la cuenca Guajira offshore (aun casi inexplorada) que cuenta con reportes de gas de entre 92 a 3500 GPCG (Miles de Millones de Pies Cúbicos de Gas) las cuales son de gran interés para posteriores estudios más detallados y evaluaciones económicas que permitan lograr su desarrollo comercial en miras a mejorar las condiciones económicas, sociales y científicas del país.

Palabras clave: Formación La Luna, Hidrocarburos, Roca Generadora, Sedimentología.

Abstract

The lithologies of the La Luna Formation are widely recognized in Colombia for being hydrocarbon-generating rock, its genesis is associated with anoxic depositional environmental conditions that prevailed during the Barremiano to Maestrichtiano globally, formed by a wide sequence of black lutitas with a large amount of organic matter, interspersed with thin limestone strata, presenting a total thickness of up to 600 m; it is divided into three Members (Salada, Pujamana and Galembó) whose type section is located in the state of Zulia, Venezuela. Its stratigraphic and sedimentological character leads to the La Luna Formation having great potential such as generating rock and reservoir rock from unconventional deposits. This research has a methodology based on the search, collection and exhaustive examination of publications made at national and international level, related to studies carried out in the La Luna Formation, focused on its sedimentological importance and implications such as hydrocarbon-generating rock. The Moon Formation exhibits physical and chemical properties for the accumulation and generation of hydrocarbons with fully kerogen-saturated porosity by at least 10%-20%, considered to have high hydrocarbon potential in the Catatumbo basin, Middle Magdalena Valley and Cesar-Ranchería, whose cumulative volume of hydrocarbon is around 2000 Million Barrels of Petroleum (MBP) in situ, at depths ranging from 1,000 to 5,000 m, as well as in the offshore Guajira basin (still almost unexplored) which has gas reports from 92 to 3500 GPCG (Billion Cubic Feet of Gas) which are of great interest for further further studies and economic assessments to achieve their commercial development in order to improve economic conditions, social and scientific of the country.

Keywords: Formation of the moon, generating rock, hydrocarbons, sedimentology.

1. INTRODUCCIÓN

La Formación La Luna está constituida por una secuencia sedimentaria de lutitas bituminosas intercaladas con calizas y areniscas; presentando un espesor total de hasta 600 m. Se han establecido tres Miembros (Salada, Pujamana y Galembó) que la conforman (Rangel *et al.*, 2000), siendo reconocida como roca madre y reservaría de hidrocarburos en Colombia, cuyo origen se encuentra asociado a condiciones ambientales deposicionales anóxicas que prevalecieron durante el Cretácico (Ballesteros & Parra, 2012).

La Luna puede correlacionarse con otras Formaciones a nivel mundial, su amplia distribución juega un rol fundamental para que países entren en el mapa petrolero global, recibiendo diferentes nombres, como Formación Chonta (Perú y Ecuador) (Morán & Fyfe, 1933) (Poiré *et al.*, 2018) (Tschopp, 1953), Villeta (Renzoni, 1962), Chipaque (Hubach, 1931), Gachetá (Hubach, 1957), La Luna y San Rafael (García-González *et al.*, 2009) (Colombia); en Venezuela llamada La Luna, aflorante al norte del piedemonte sur de los Andes de Mérida y denominada Navay en las cuencas de Barinas-Apure y Guanare

(Garner, 1926), de igual manera llamada Formación Querecual al oriente de Venezuela (Lugo *et al.*, 2009)(Yoris, 1989). La Luna también se encuentra presente en Trinidad y Tobago, donde recibe el nombre de Naparima Hill (Iyare *et al.*, 2020)(Rambarran, 1995); en Guyana, Suriname, y llega hasta el norte de Brasil, sin embargo, no estuvo a la suficiente profundidad para generar petróleo; en Estados Unidos, rocas similares y de la misma edad son conocidas como Greenhorn y Bridge Creek (Eicher & Diner, 1989)(Elder & Kirkland, 1985)(Macdonald & Byers, 1988).

En Colombia la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) reportó una producción promedio mensual de hidrocarburo líquido (petróleo) para el 2016 de 886.198 Kbpd y para el 2020 de 712.556 Kbpd, en los campos donde la Formación La Luna es la roca generadora o madre (El Tiempo, 2017)(Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2021). El carácter estratigráfico y sedimentológico de la Formación La Luna conlleva a que tenga un gran potencial como roca generadora de petróleo y roca reservorio de yacimientos no convencionales, sin embargo esta última aún

es desconocida en gran parte del territorio colombiano (Villamil, 2003; Quero *et al.*, 2007a; Garcia & Parra, 2003; Arango & Blandón, 2006).

El objetivo de esta investigación es identificar el rol de los procesos sedimentarios en la generación de hidrocarburos en la Formación La Luna.

2. METODOLOGÍA

Esta investigación se enfoca en la búsqueda, recopilación y examinación exhaustiva de publicaciones realizadas a nivel nacional e internacional relacionada con la Formación La Luna, enfocada a su importancia sedimentológica y su implicación como roca generadora de hidrocarburos. Se emplearon bases de datos como: Google Académico, Scielo, Researchgate, Science Direct, Springer-Link, Academia.edu y Scopus, bibliotecas institucionales de la Universidad Nacional de Colombia, Universidad Industrial de Santander (UIS), Universidad EAFIT, Universidad de Pamplona, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Universidad de Caldas, Fundación Universitaria del Área Andina, Universidad y el Servicio Geológico Colombiano, así como publicaciones digitales de la ANH, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y toda la relacionada en la web.

3. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Antecedentes

La Formación La Luna, originalmente llamada “La Luna Limestone” fue descrita inicialmente por (Garner, 1926), el cual le dio este nombre para designar una secuencia de limolitas de colores negro y gris oscuro laminadas y shales calcáreos, expuestos en la Quebrada La Luna en la Serranía de Perijá, Venezuela (Bermúdez *et al.*, 2020).

La Formación La Luna se subdivide en tres miembros a lo largo del occidente de Venezuela, el Inferior (Miembro La Aguada), constituida por calizas densas de color gris oscuro con concreciones; Medio (Miembro Chejendé), compuesta por shales negros y margas; y Superior (Miembro Timbetes), constituida por calizas laminadas con concreciones, aflorando en el occidente y suroccidente de la Cuenca de Maracaibo, descrita por (Renz, 1959; Guerrero *et al.*, 2021; Castellanos & Baldovino, 2021).

Son Notestein *et al.*, (1944) y Morales *et al.*, (1958), quienes introducen el nombre de Formación La Luna en Colombia, a partir de los estudios realizados en la Concesión Barco, en la cuenca del Catatumbo, denominación aceptada por la industria petrolera, debido su marcada similitud litológica a la unidad aflorante en el Valle Medio del Magdalena, datada con una edad Turoniano inferior a Bantoniano (Royero, 1996; Sarmiento *et al.*, 2015; Moreno & Sarmiento, 2002; Villamizar *et al.*, 2020).

En el Valle Medio del Magdalena (Morales *et al.*, 1958), subdividió la Formación en tres miembros: Salada, Pujamana y Galemo. Por otra parte, su espesor varía entre 150 y 600 metros, donde (Zumberge, 1984), la describe litológicamente como una secuencia de rocas tipo shales carbonatados de coloración oscura a grisácea, interestratificado con lodolitas y algunos niveles de chert con abundante presencia de foraminíferos calcáreos planctónicos y otros organismos pelágicos (Figura 1).

La ANH y la UIS en el 2010, en sus estudios “Evaluación del potencial hidrocarburífero de las cuencas colombianas y Open Round Colombia” muestran que la Formación La Luna es la mayor fuente generadora de

hidrocarburos (líquido y gaseoso) que se ha dado en las cuencas colombianas del Valle Medio del Magdalena, Caguan-Putumayo, Catatumbo, Guajira, Guajira Offshore, Llanos Orientales, Valle Superior del Magdalena, y en la cuenca Cesar-Ranchería (García-González *et al.*, 2009).

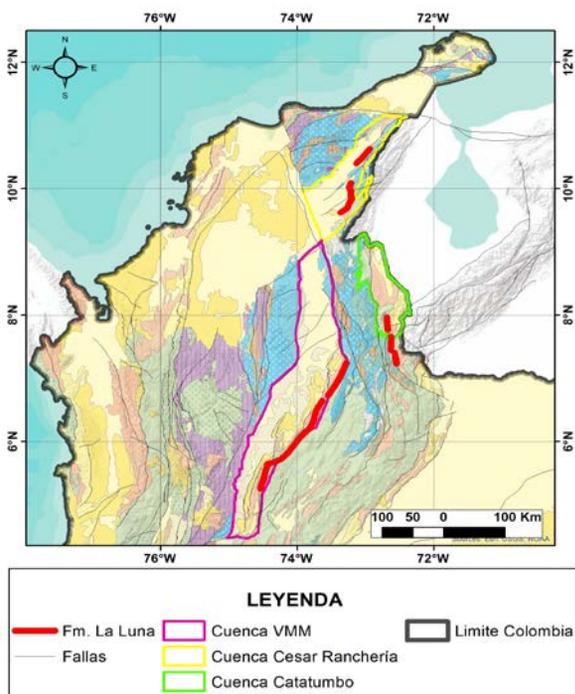


Figura 1: Afloramientos de la Formación en las cuencas Valle Medio del Magdalena (VMM), Cesar Ranchería y Catatumbo. Fuente: (Instituto Colombiano de Geología y Minería *et al.*, 1988), modificado por los autores.

Estratigrafía

La Formación La Luna en Colombia, se encuentra conformada por tres Miembros (Morales *et al.*, 1958), no obstante, fue hasta el 2015 que (Zumberge, 1984), realizaron descripciones litológicas, petrofísicas y faciales que permiten caracterizarlos y sustentar sus diferencias.

Miembro Salada

Según Morales *et al.*, (1958), incluye en este miembro shales calcáreos de color negro,

laminados en capas delgadas con aspecto de pizarras. Su sección tipo se encuentra en la Quebrada Salada, en la desembocadura al Río Sogamoso y yace en contacto conforme con la infrayacente Formación Calizas del Salto.

Zumberge (1984), sugiere que “*la transición de Shale terrígenos de la Formación El Salto a las biomicritas de foraminíferos planctónicos sustenta la superficie de inundación y permite afirmar que se trata de la superficie transgresiva más notable del Cretácico del VMM y extensible a la Cuenca Cretácica Colombiana al Límite Cenomaniano – Turoniano*” (Morales *et al.*, 1958; Guerrero & Sarmiento, 1996; Villamil, 1998; Guerrero *et al.*, 2000; Sarmiento-Rojas *et al.*, 2006; Gelvez *et al.*, 2020; Torrado *et al.*, 2020). Así mismo, la describen en dos segmentos, el Inferior se define como un conjunto de capas gruesas de calizas biomicritas duras con laminación plana paralela con presencia baja de concreciones discoidales de diagénesis temprana que deforman las biomicritas en la compactación. En el segundo segmento se reconoce la común ocurrencia de capas delgada de “chert” diagenético dentro de las calizas biomicritas, adicionalmente se intercalan capas de pseudoesparita y niveles con concreciones discoidales y esféricas (Figura 2).

Miembro Pujamana

Dividida en tres segmentos por (Zumberge, 1984), caracterizando el primer segmento como calizas biomicritas blandas, donde la petrofacies resalta características diferentes en las que sobresale la poca presencia de cuarzo tamaño limo fino y minerales arcillosos, este segmento cuenta con la ocurrencia de foraminíferos plantónicos y los bentónicos escasos que aumentan

progresivamente hacia el techo; la laminación es plana paralela continua y subdiscontinua, y es común la presencia de foraminíferos aplastados en el proceso de compactación durante la diagénesis temprana. Las texturas predominantes son wackestones sobre las capas de packstone.

El segundo segmento es diferenciable del primer segmento por su apreciable endurecimiento de las biomicritas por intervalos, así como por las intercalaciones de capas de chert; Las calizas biomicriticas se caracterizan por presentar aumento en los minerales arcillosos, así como abundante aplastamiento de conchillas, al igual que procesos de silicificación parcial tanto de los microfósiles como de la matriz micrítica y textura wackestone predominante (Zumberge, 1984; Niño Rondón *et al.*, 2021).

El tercer segmento está constituido por rocas biomicritas endurecidas de textura wackestone, con frecuentes capas de aspecto nodular de chert diagenético, diferenciada del segmento anterior por poseer hacia el techo concreción. Microscópicamente las biomicritas contienen foraminíferos bentónicos parcialmente rellenos de sílice. Es común el cemento microcristalino que por sectores silicifica la mayor parte de la matriz, es frecuente la presencia de lodo fosfático (Figura 3).

Miembro Galembo

La diferencia entre el miembro Pujamana y Galembo es notoria con la aparición del primer nivel de calizas biomicritas fosfáticas intercaladas con biomicritas compactas. Las calizas biomicritas fosfáticas se caracterizan por presentarse en capas medias y gruesas en las que se aprecia la laminación afectada por bioturbación y formando secuencias granocrecientes (Zumberge, 1984; Peñalosa

et al., 2020). La subdividido en dos segmentos, el Primer segmento (inferior) forma 3 secuencias granocrecientes en las que se reconocen biomicritas de foraminíferos bentónicos, limo fino a muy fino de cuarzo, con matriz de micrita, lodo fosfático en general afectado por procesos intensos de silicificación, y con apariencia de chert. Las rocas en la posición intermedia son biomicritas de foraminíferos bentónicos, algo limosas y con bioclastos fosfáticos. El segundo segmento (superior) cuenta con espesores de mayor tamaño y con desarrollo de parasecuencias más discretas, sin embargo, se diferencian al menos tres de ellas en las que se mantiene el mismo esquema de superficies de inundación y sucesiones de capas granocrecientes. Las capas de la base de estas secuencias son calizas biomicritas de foraminíferos bentónicos con textura wackestone y packstone variable, en este segmento se encuentra la mayor ocurrencia de materiales terrígenos formados por granos subangulares a subredondeados de cuarzo, de bioclastos fosfáticos y pellets, marcando una tendencia somerizante (Figura 4).

Zumberge (1984), expone claramente que los tres miembros cuentan con porosidad totalmente saturadas de kerógeno en al menos un 10%-20%.

Estudios geoquímicos y propiedades físicas

La Formación La Luna ha sido considerada como la fuente generadora de gran parte del hidrocarburo en el norte de Suramérica, debido a sus características físicas y altos contenidos de materia orgánica, considerada incluso recientemente con el potencial de producir gas (Barrero *et al.*, 2007)(García-González, 2010)(Unión Temporal Prospección (UPME), 2018)(Ruiz, 2013)(Quero *et al.*, 2007b).

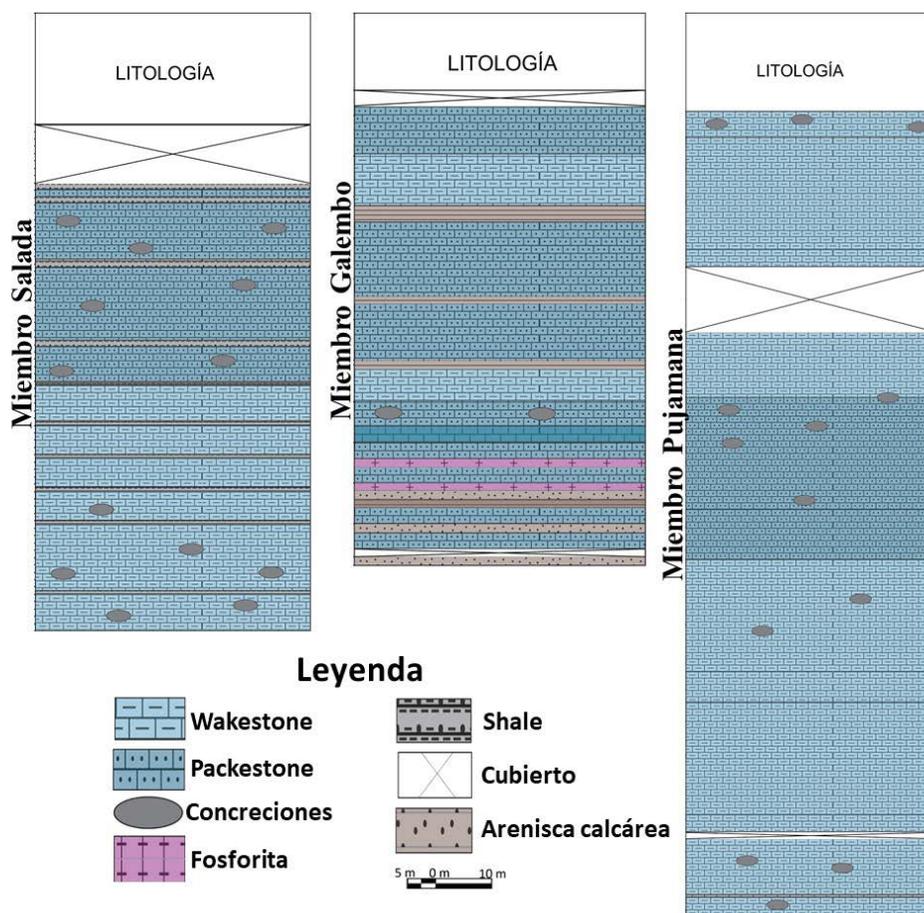


Figura 2. Columna litoestratigráfica. Fuente: Tomado y adaptado de (Zumberge, 1984).

Cuenca Valle Medio del Magdalena

Sin embargo, las eventuales variaciones laterales de facies, su historia de enterramiento y exhumación en las diferentes zonas donde se depositó, sugieren que las propiedades de las litologías que la integran podrían cambiar lateralmente de acuerdo a los procesos sedimentológicos ocurridos durante su sedimentación, se resume entonces sus propiedades a lo largo de la cuenca del Catatumbo, Valle Medio del Magdalena y Cesar-Ranchería, por ser las zonas donde mayormente se ha estudiado.

Los análisis de Carbono Orgánico Total (TOC por sus siglas en inglés) llevados a cabo por (Pacheco Sintura *et al.*, 2015), permiten conocer la cantidad de materia orgánica total presente en las muestras, La Formación La Luna muestra contenidos de TOC de 1,6% hasta 10,8% (Tabla 1). Su proveniencia es marina, principalmente de algas, lo que indica buenas condiciones para la generación de hidrocarburos (kerógeno tipo II) (Zou *et al.*, 2010)(Aguilera *et al.*, 2009; Araujo & Rivera, 2020; Bonilla *et al.*, 2021).

Tabla 1. Resultados de TOC para las muestras de la Formación La Luna.

Muestra	Peso Muestra (g)	Peso Ceniza (g)	wt% Ceniza	wt% Materia Orgánica	Error
---------	------------------	-----------------	------------	----------------------	-------

Formación	Kscs1	1.991	3.001	98.009	1.991	0.005
	Kscs2	1.586	3.132	98.414	1.586	0.014
	Kscm1	6.853	2.963	93.147	6.853	0.000
	Kscsm2	10.684	2.672	89.316	10.684	0.094
	Kscil1	8.900	2.886	91.100	8.900	0.054
	Ksci2	7.491	2.681	92.509	7.491	0.205

Fuente: (Pacheco Sintura *et al.*, 2015).

Al comparar los resultados con los rangos de calificación asignados para evaluar el potencial de generación de hidrocarburos, más del 80% de las muestras presentan un contenido de materia orgánica alto (Tabla 2).

Tabla 2. Relación entre carbono orgánico total y el potencial de hidrocarburos.

Carbono Orgánico Total (wt%)	Potencial de los Recursos
<0.5	Muy Pobre
0.5 a 1	Pobre
1 a 2	Medio
2 a 4	Bueno
4 a 10	Muy bueno
>10	Desconocido

hidrocarburo líquido y gas seco (Ro 0,5%-1,2%) (García-González *et al.*, 2009) (Moreno-Sánchez & Hincapié-Jaramillo, 2010); como se observa en la Figura 3 sobre la historia de subsidencia, donde se nota que la Formación La Luna entró a la ventana de generación de petróleo en el Paleógeno inferior.

La Figura 4 muestra la tabla de eventos de formación del sistema petrolífero, conformado por Formación La Luna como roca generadora, Los Santos, Rosablanca, Tablazo y La Luna (en calizas fracturadas), La Paz, Formación Mugrosa – Colorada como roca reservorio. Y Formaciones Paja y Simití como roca sello (Alonso *et al.*, 2020).

Los datos de reflectancia de la vitrinita que la ubican en la ventana de generación de

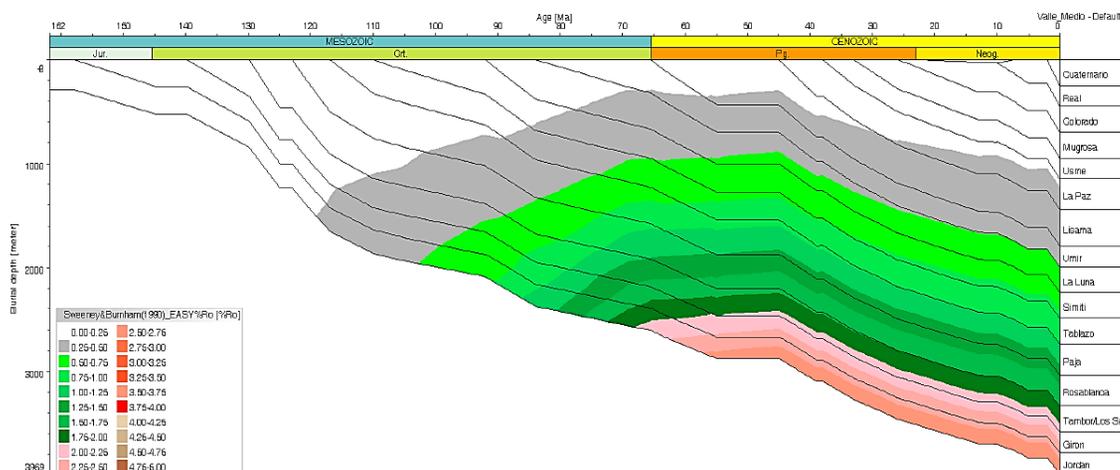


Figura 3. Diagrama de la historia de la subsidencia de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena. En esta figura se ilustra la variación del %Ro con el tiempo. Fuente: (García-González *et al.*, 2009).

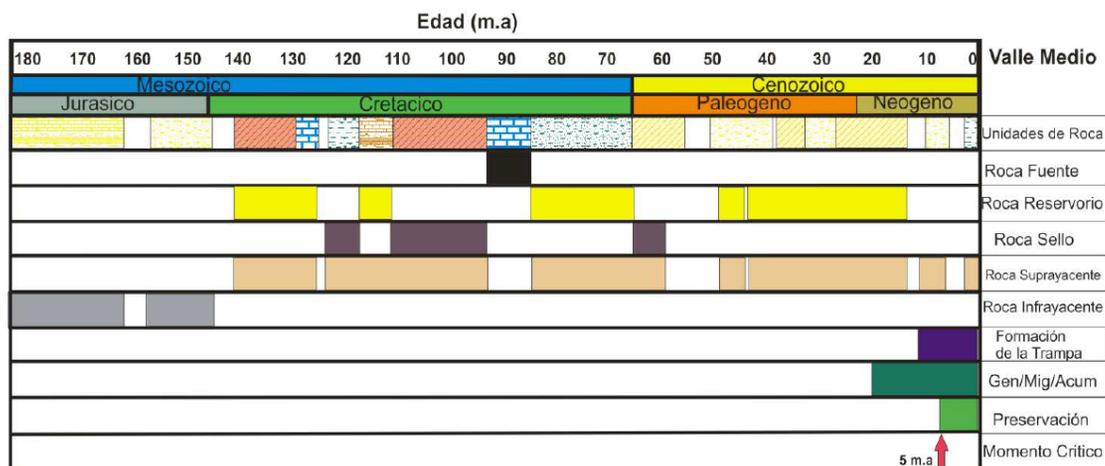


Figura 4. Tabla de eventos del sistema petrolífero del Valle Medio del Magdalena.
Fuente: (García-González *et al.*, 2009).

La Formación La Luna aflora en esta cuenca hacia el sector occidental (Figura 5) muestra resultados de TOC con valores entre 0.5% y 6.0%, evidenciado que en el sector norte de la cuenca se encuentra en

ventana de generación de crudo y el sector sur se encuentra en la fase inicial de la ventana de generación de gas (ECOPETROL, 2000).

Mapa Geológico

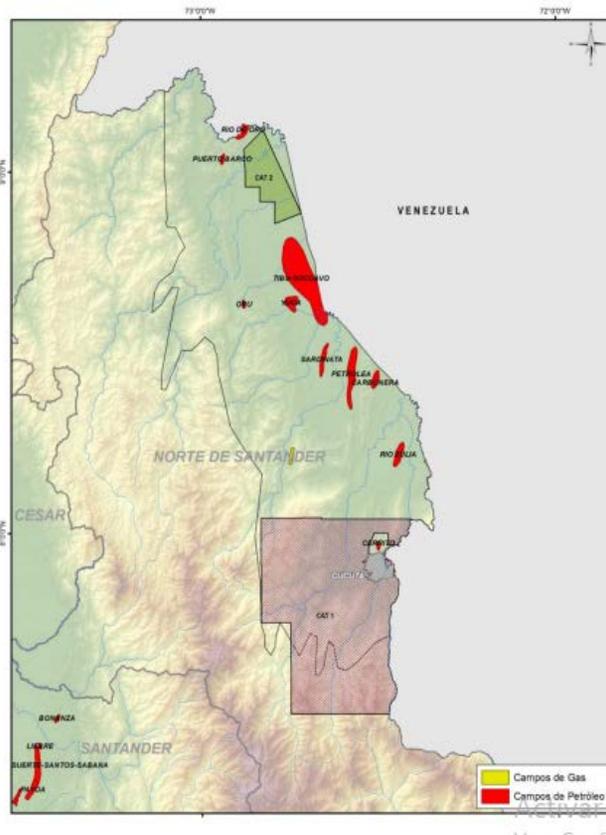
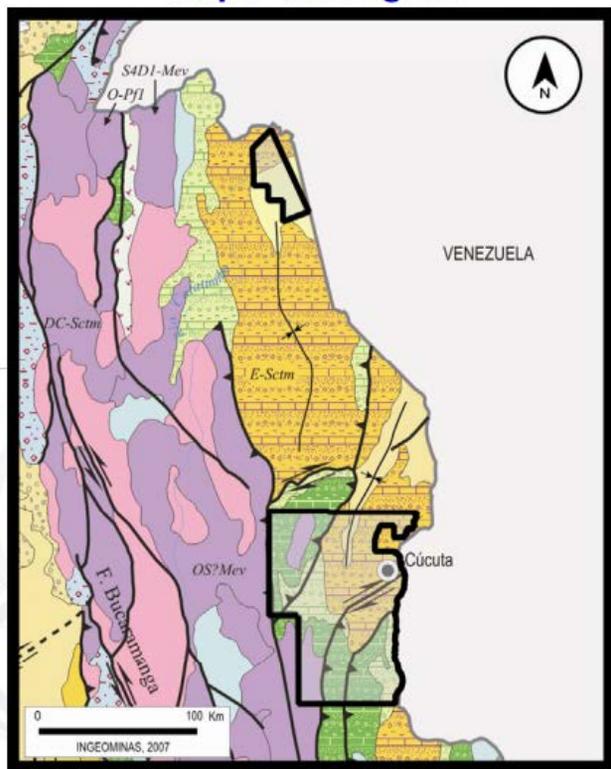


Figura 5. Ubicación de la Formación La Luna en la cuenca del Catatumbo. Fuente: (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2009).

La Formación La Luna cuenta con kerógeno tipo II para esta cuenca (García-González *et al.*, 2009). Los datos de reflectancia de la vitrinita que la ubican en la ventana de generación de hidrocarburo líquido y gas seco (Ro 1%-1,5%), como se

observa en el diagrama de historia de subsidencia, donde se nota que la Formación La Luna entró a la ventana de generación de petróleo en el Paleógeno inferior (Figura 6).

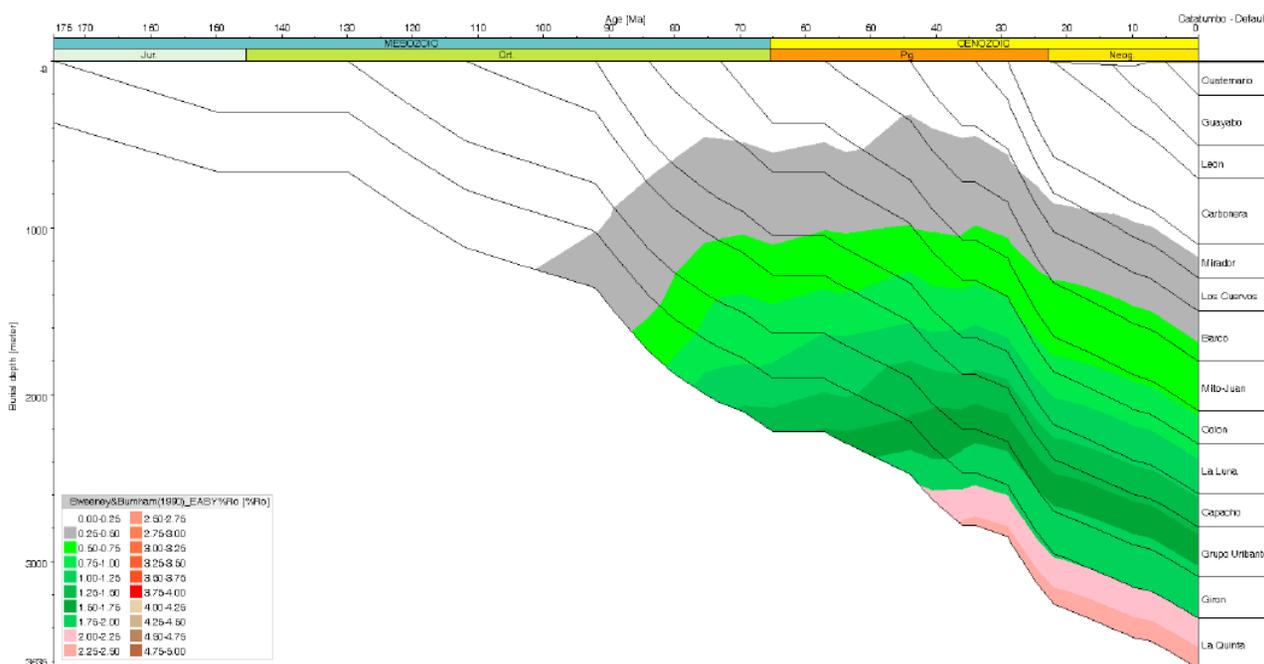


Figura 6. Diagrama de la historia de la subsidencia de la Cuenca del Catatumbo. En esta figura se ilustra la variación del %Ro con el tiempo. Fuente: (García-González *et al.*, 2009).

La Figura 7 muestra la tabla de eventos de generación del sistema petrolífero, conformado por Formación La Luna como roca generadora junto con la Formación Capacho, Colón, Cuervos, y León como roca sello, y Formaciones como Barco, Mirador y Carbonera como rocas reservorio.

Cuenca Cesar-Ranchería

En la Cuenca de Cesar-Ranchería, las rocas

fuentes están constituidas por la secuencia Cretácica, que comprende el Grupo Cogollo, la Formación la Luna y la Formación Molino (Figura 8). Los niveles que presentan altos contenidos de materia orgánica para la Formación La Luna son los miembros inferiores y medio, cuyos valores de TOC varían entre 2 y 4% con un valor promedio de 3% (Aguilera *et al.*, 2009).

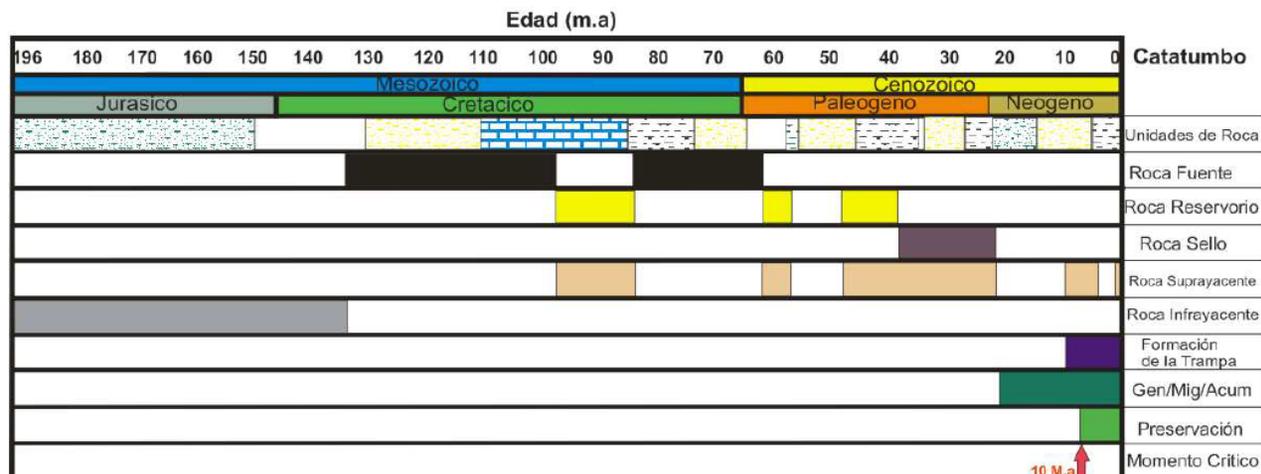


Figura 7. Tabla de eventos del sistema petrolífero de la cuenca del Catatumbo. Fuente: (García-González et al., 2009).

Mapa Geológico

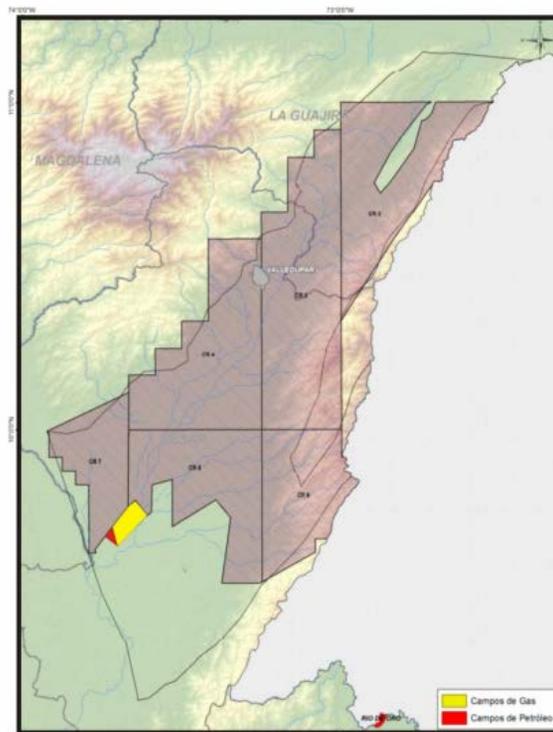
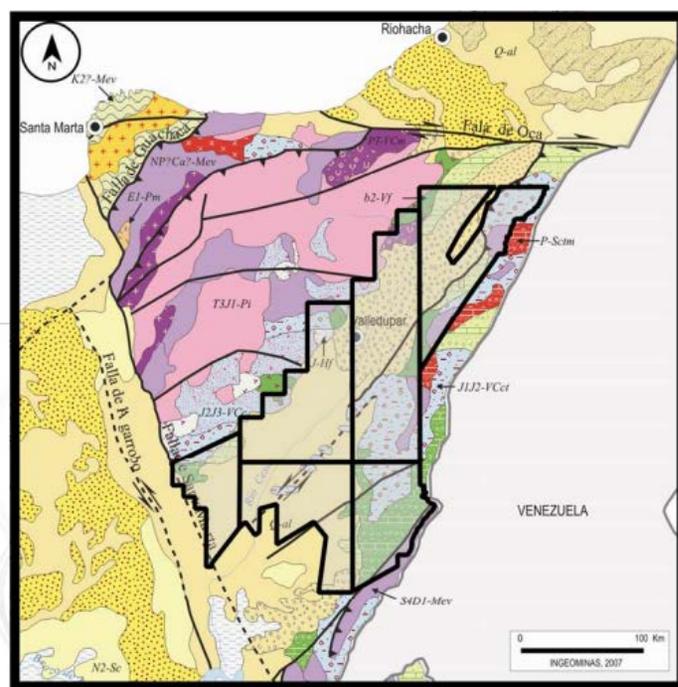


Figura 8. Ubicación de la Formación La Luna en la cuenca Cesar-Ranchería. Fuente: (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2009).

El Ro (reflectancia de la vitrinita) ubican en la ventana de generación de hidrocarburo líquido y gas seco con valores de (0.5%-1%), como se observa en la Figura 9 se nota que la Formación La Luna entró a la ventana de generación de petróleo en el Cretácico superior.

La Figura 10, muestra la tabla de eventos de generación del sistema petrolífero, conformado por Formación La Luna como roca generadora junto con el Grupo Cogollo y la Formación Molino. Formación Molino y las intercalaciones de shales que ocurren en

la Formación La Luna y el Grupo Cogollo como roca sello, así como los shales de las Formaciones Barco y Cerrejón. Colón, Cuervos, y León como roca sello. Y como rocas reservorio se cuentan con Formación Río Negro, las calizas fracturadas de la

Formación Lagunitas, las areniscas del Miembro Tocuy, la Formación Aguas Blancas, las calizas y los cherts fracturados de la Formación La Luna y las areniscas del Miembro Tocuy, Formación Molino.

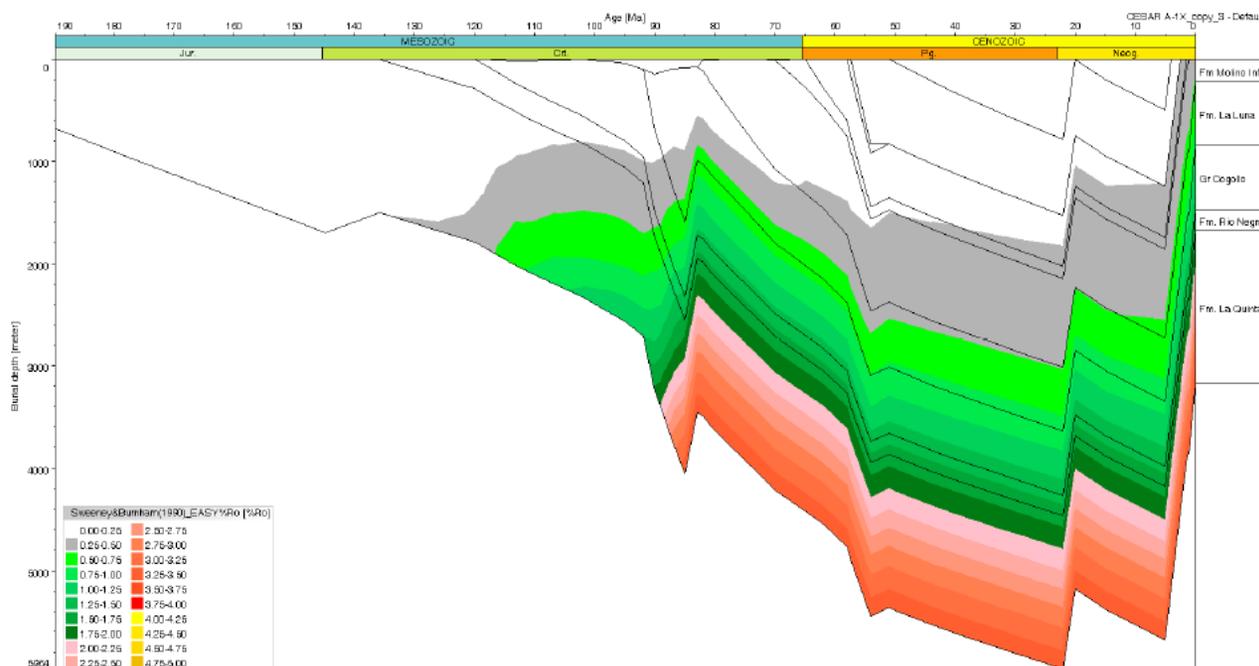


Figura 9. Diagrama de la historia de la subsidencia de la Cuenca del Cesar-Ranchería. En esta figura se ilustra la variación del %Ro con el tiempo. Fuente: (García-González *et al.*, 2009).

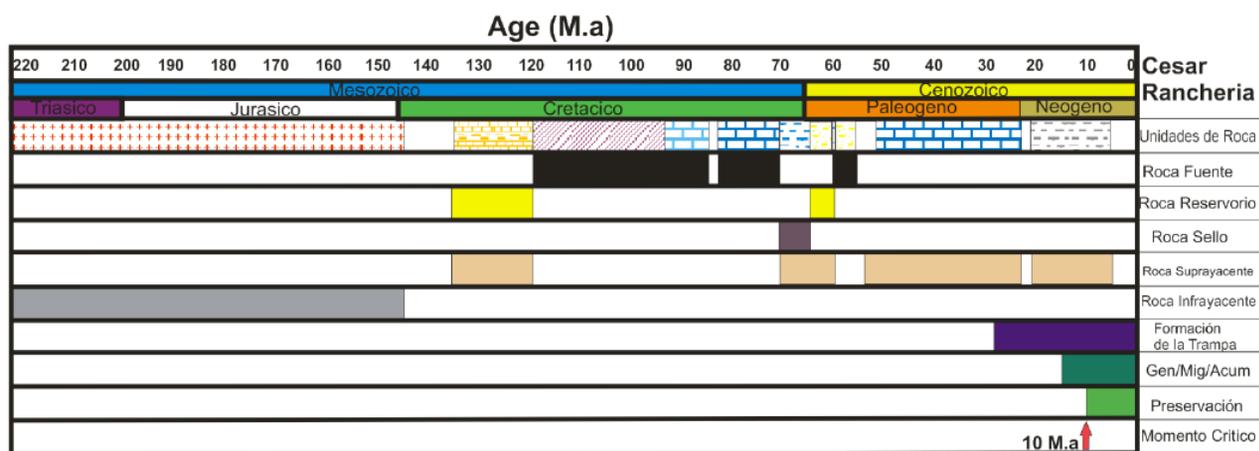


Figura 10. Tabla de eventos del sistema petrolífero de la cuenca del Cesar-Ranchería. Fuente: (García-González *et al.*, 2009).

Los análisis petrogenéticos y sedimentológicos realizados por Zumberge (1984) y Pacheco Sintura *et al.*, (2015), exponen claramente que debido a las características de deposición en ambientes anóxicos marinos la Formación La Luna presentan propiedades físicas y químicas para la acumulación y generación de hidrocarburos con porosidad totalmente saturadas de kerógeno en al menos un 10%-20%.

La distribución de los diferentes campos de producción de petróleo y gas en las cuencas colombianas permite confirmar la existencia de sistemas petrolíferos activos, cuya principal roca generadora de hidrocarburos es la Formación La Luna, lo cual es corroborado mediante los resultados obtenidos de diferentes autores.

4. CONCLUSIONES

El potencial hidrocarburífero de la Formación La Luna se considera alto en la cuenca del Catatumbo, Valle Medio del Magdalena y la cuenca Cesar-Ranchería, cuyo volumen acumulado de hidrocarburo está alrededor de los 2000 Millones de Barriles de Petróleo (MBP) *in situ*, a profundidades que varían entre los 1.000 a 5.000 m (Suárez-Rueda, 2016), así como en la cuenca Guajira offshore (aun casi inexplorada) que cuenta con reportes de gas de entre 92 a 3500 GPCG (Miles de Millones de Pies Cúbicos de Gas) las cuales son de gran interés para posteriores estudios más detallados y evaluaciones económicas que permitan lograr su desarrollo comercial en miras de mejorar las condiciones económicas, sociales y científicas del país.

Según los distintos análisis en el Valle Medio del Magdalena las propiedades petrofísicas muestran que la Formación La Luna tiene

buena capacidad para almacenamiento de hidrocarburos gaseosos y esta podría presentar un adecuado comportamiento frente al fracturamiento.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2009). Open Round Colombia.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2021). Producción Mensual de Hidrocarburos. <https://www.anh.gov.co/estadisticas-del-sector/sistemas-integrados-operaciones/estadisticas-producción>
- Aguilera, R. C., Sotelo, V. A., Burgos, C. A., Arce, C., Gómez, C., Mojica, J., Castillo, H., Jiménez, D., & Osorno, J. (2009). Organic geochemistry atlas of Colombia: An exploration tool for mature and frontier basins. *Earth Sciences Research Journal*, 13, 1–174.
- Alonso, L., Castellanos, L. y Meseguer, O. (2020). Efectos alelopáticos de residuos de *Sorghum Halepense* (L.) sobre dos arvenses dicotiledóneas en condiciones de laboratorio. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 11(1). DOI: <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i1.354>
- Arango, F., & Blandón, A. (2006). Carbones y Lutitas Carbonosas como Rocas Fuentes de Hidrocarburos Terciarios en la Cuenca Cesar-Ranchería Colombia: Evidencias Petrológicas y Geoquímicas [PAPER IN SPANISH] Coals and Carbonaceous Shales as Source Rocks of the Tertiary Hydrocarbon in the. In EAGE Publications (Ed.), 9th Simposio Bolivariano-Exploracion Petrolera en las Cuencas Subandinas.
- Araujo, T. C. y Rivera, M. E. (2020). Índices de sequía para la cuenca del Rio Cesar – Colombia. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 11(2). DOI:

- <https://doi.org/10.24054/19009178.v2.n2.2020.4671>
- Ballesteros, C. C., & Parra, J. M. (2012). Estudio estratigráfico secuencial para la formación La Luna en el costado oriental de la cuenca del valle medio del Magdalena. Universidad Industrial de Santander.
- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. A., & Martínez, J. F. (2007). Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. In Agencia Nacional de Hidrocarburos (Ed.), Agencia Nacional de Hidrocarburos - A.N.H.- (Issues 978-958-98237-0-5).
http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Cuencas-sedimentarias/Documents/colombian_sedimentary_basins.pdf
- Bermúdez, N., Gallegos, D. S. y Botello-Suárez W. A. (2020). Desarrollo de un dispositivo autónomo para el mejoramiento de la calidad del agua en el humedal córdoba (Bogotá, Colombia). *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 11(1). DOI: <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i1.355>
- Bonilla, C. A., Rubio, Y. M. y Bonilla, S. A. (2021). Afectación por derrames de crudo ocasionados por acciones subversivas al oleoducto Caño Limón Coveñas. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 12(2).
<https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/article/view/2572>
- Castellanos, L. y Baldovino, A. L. (2021). Enfermedades foliares más importantes del cultivo de la fresa en la zona de Pamplona. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 12(1). DOI: <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/article/view/2569/3133>
- ECOPETROL. (2000). Atlas of Sedimentary Basins and Petroleum Geology of Colombia.
- Eicher, D. L., & Diner, R. (1989). Origin of the cretaceous bridge creek cycles in the western interior, United States. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 74(1), 127–146. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0031-0182\(89\)90023-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0031-0182(89)90023-0)
- El Tiempo. (2017). En 20 campos se produce el 66% del petróleo del país. <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/los-20-campos-petroleros-de-colombia-con-mayor-produccion-84750>
- Elder, W. P., & Kirkland, J. I. (1985). Stratigraphy and Depositional Environments of the Bridge Creek Limestone Member of the Greenhorn Limestone at Rock Canyon Anticline Near Pueblo, Colorado. In L. M. Pratt, E. G. Kauffman, & F. B. Zelt (Eds.), *Fine-Grained Deposits and Biofacies of the Cretaceous Western Interior Seaway: Evidence of Cyclic Sedimentary Processes* (Vol. 4, pp. 122–249). SEPM Society for Sedimentary Geology. <https://doi.org/10.2110/sepmfg.04.122>
- García-González, M. (2010). Shale gas potential in the Eastern Cordillera of Colombia. *AAPG Bulletin*.
- García-González, M., Mier-Umaña, R., Cruz-Guevara, L., & Vásquez, M. (2009). Informe ejecutivo: evaluación del potencial hidrocarburífero de las cuencas colombianas. In Agencia Nacional de Hidrocarburos (p. 219). Universidad Industrial de Santander y Agencia Nacional de Hidrocarburos.

- http://oilproduction.net/files/cuencas_petroleras_de_colombia-2009.pdf
- García, D., & Parra, P. (2003). Áreas con Mayor Potencial de Carga de Petróleo: Cuenca Valle Medio del Magdalena (VMM) y Occidente de la Cordillera Oriental, Colombia. 8th Simposio Bolivariano-Exploración Petrolera En Las Cuencas Subandinas, cp-33.
- Garner, A. H. (1926). Suggested nomenclature and correlation of geological formations in Venezuela. *Amer. Inst. Min. Metall. Eng., Trans*, 677–684.
- Gelvez, S. D., Rivera, M. E. y Solano, O. F. (2020). Análisis estadístico de parámetros hidrometeorológicos, físicoquímicos y microbiológicos incidentes en la calidad de la quebrada Monteadentro. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 11(2). DOI: <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i2.872>
- Guerrero, J., & Sarmiento, G. (1996). Estratigrafía Física, Palinológica, Sedimentológica y Secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero: Implicaciones en Exploración Petrolera. *Geología Colombiana*, 20, 3–66. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/31386>
- Guerrero, J., Sarmiento, G., & Navarrete, R. (2000). The Stratigraphy of the W Side of the Cretaceous Colombian Basin in the Upper Magdalena Valley. Reevaluation of Selected Areas and Type Localities Including Aipe, Guaduas, Ortega, and Piedras The Stratigraphy of the W Side of the Cretaceous Colombian Basi. *Geología Colombiana*, 25, 45–110.
- Guerrero, J., Hernández, B. y Castellanos, L. (2021). Calidad del agua para sistemas de riego en Colombia. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 12(2). <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/article/view/2573/3137>
- Hubach, E. (1931). Exploración en la región de Apulo-San Antonio Viotá. *Boletín de Minas y Petróleos*, 4(25–27), 41–60.
- Hubach, E. (1957). Estratigrafía de la sabana de Bogotá y alrededores. *Boletín Geológico*, 5(2), 93–112. <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/boletingeo/article/view/286>
- Instituto Colombiano de Geología y Minería, Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero, Espinosa, A., González-Iregui, H., Núñez-Tello, A., Orrego-López, A., Etayo-Serna, F., Mendoza-Forero, J. H., Vargas-Higuera, R., Duque-Caro, H., & Paris, G. (1988). Mapa Geológico de Colombia. Escala 1:1.500.000. http://adminmiig.sgc.gov.co/Lists/Recurso_sSGC/DispForm.aspx?ID=3212
- Iyare, U. C., Ramsook, R., Blake, O. O., & Faulkner, D. R. (2020). Petrographical and petrophysical characterization of the late cretaceous Naparima Hill Formation, Central Range, Trinidad, West Indies. *International Journal of Coal Geology*, 230, 103592. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coal.2020.103592>
- Lugo, P., Truskowski, I., López, L., & Lo Mónaco, S. (2009). Evaluación bioestratigráfica y geoquímica de la formación querecual aflorante al noreste del estado Anzoátegui, Venezuela. *Revista de La Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 24(2), 27–37. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652009000200003&Ing=es&nrm=iso&tlng=es
- Macdonald, R. H., & Byers, C. W. (1988). Depositional history of the Greenhorn Formation (Upper Cretaceous),

- northwestern Black Hills. *The Mountain Geologist*.
- Morales, L. G., Podesta, D. J., Hatfield, W. C., Tanner, H., Jones, S. H., Barker, M. H., O'donoghue, D. J., Moler, C. E., Dubois, E. P., Jacobs, C., & Goss, C. R. (1958). General geology and oil occurrences of middle Magdalena valley, Colombia: South America. In *Hábitat del aceite* (pp. 641–695). AAPG Special Volumes. <https://doi.org/https://doi.org/10.1306/SV18350C25>
- Morán, M., & Fyfe, D. (1933). Geología de la Región del Bajo Pachitea. *Bol. Ofic. Dir. Min. Ind.*, 12(41), 43–54.
- Moreno-Sánchez, M., & Hincapié-Jaramillo, G. (2010). Estudio de isótopos de Carbono (delta 13 C) y Estroncio (87 Sr/86 Sr) en los depósitos Cretáceos-Terciarios de la Cordillera Oriental. Universidad de Caldas.
- Moreno, G., & Sarmiento, G. (2002). Estratigrafía Cuantitativa de las Formaciones Tablazo y Simití en las localidades de Sáchica (Boyacá) y Barichara -San Gil (Santander), Colombia. *Geología Colombiana*, 27, 51–74.
- Niño Rondón, C. V., Castro Casadiego, S. A. y Ortíz Fonseca, D. M. (2021). Análisis de herramientas para desarrollar un sistema de apoyo ambiental para identificar residuos sólidos. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 12(2). <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/article/view/2572/3136>
- Notestein, F. B., Hubman, C. W., & Bowler, J. W. (1944). Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America. *GSA Bulletin*, 55(10), 1165–1216. <https://doi.org/10.1130/GSAB-55-1165>
- Pacheco Sintura, P. A., Cardona Molina, A., & Cortés, F. B. (2015). Compositional characterization and storage capacity of shale samples from La Luna and Conejo Formations (Middle Magdalena basin and the Eastern Cordillera): Implications for evaluation of cretaceous shale gas in Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 0(37 SE-), 45–53. <https://doi.org/10.15446/rbct.n37.43685>
- Peñaloza, L. K., Carvajal, F. A. y Hernández, N. J. (2020). Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal de la microcuenca El Volcán a partir de la compra de áreas estratégicas. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 11(1). DOI: <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i1.381>
- Poiré, D. G., Pérez, L. M., Iribarne, M., Quevedo, C. D., & Vergani, G. D. (2018). Sedimentología, paleoecología y estratigrafía secuencial de la Formación Chonta, Cretácico, en el perfil de Puerto Ocopa-Río Pangá, Cuenca de Ene, departamento Junín, Perú. IX INGEPET, Exploración, Explotación, Procesamiento y Transporte De Hidrocarburos, 1–16.
- Quero, V., López, L., Lo Mónaco, S., Cartillo, M., Escobar, G., & Escobar, M. (2007a). Petroleum source rock evaluation of the La Luna Formation at Táchira state sections, Venezuela. In *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia* (Vol. 30, pp. 326–335). scielon.
- Quero, V., López, L., Lo Mónaco, S., Cartillo, M., Escobar, G., & Escobar, M. (2007b). Evaluación de la Formación La Luna como roca madre de petróleo en secciones del estado Táchira, Venezuela. *Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería Universidad Del Zulia*, 30, 326–335.
- Rambarran, T. (1995). Historical Development of The Petroleum Geology in Trinidad-Field Trip. Geological Society of Trinidad & Tobago.
- Rangel, A., Parra, P., & Niño, C. (2000). The La Luna formation: chemostratigraphy and

- organic facies in the Middle Magdalena Basin. *Organic Geochemistry*, 31(12), 1267–1284.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00127-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00127-3)
- Renz, O. (1959). Estratigrafía del Cretácico en Venezuela occidental. *Boletín de Geología. Boletín Geológico*, 5(10), 3–48.
- Renzoni, G. (1962). Apuntes acerca de la litología y tectónica de la zona al este y sureste de Bogotá. *Boletín Geológico*, 10(1-3 SE-Artículos), 59–80.
<https://revistas.sgc.gov.co/index.php/boletingeo/article/view/208>
- Royero, J. G. (1996). Geología de la plancha 65 Tamalameque (Departamento de Cesar y Bolívar), escala:1:100.000 (Memoria explicativa). INGEOMINAS.
- Ruiz, M. C. (2013). Caracterización litoestratigráfica de la Formación la Luna mediante el análisis de multiatributos sísmicos en la prospección de hidrocarburos no convencionales. In Departamento de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia.
- Sarmiento-Rojas, L. F., Van Wess, J. D., & Cloetingh, S. (2006). Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 383–411.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.003>
- Sarmiento, G., Puentes, J., & Sierra, C. (2015). Evolución geológica y estratigrafía del sector norte del Valle Medio del Magdalena. In *Geologia Norandina* (Issue 12, pp. 51–83).
http://sociedadcolombianadegeologia.org/wp-content/uploads/2017/06/Norandina_No.12_Art4.pdf
- Suárez-Rueda, C. O. (2016). Arenas basales del Cretáceo inferior, potencial roca hidrocarburífera en la región central de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, Colombia. Master's thesis.
- Torrado, J. M., Castellanos, L. y Céspedes, N. (2020). Evaluación de alternativas biológicas para el control de *Ascochyta* Spp. en el cultivo de arveja, Pamplona, Norte de Santander. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 11(1). DOI: <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i1.353>
- Tschopp, H. J. (1953). Oil Explorations in the Oriente of Ecuador, 1938–19501. *AAPG Bulletin*, 37(10), 2303–2347.
<https://doi.org/10.1306/5CEADD94-16BB-11D7-8645000102C1865D>
- Unión Temporal Prospección (UPME). (2018). *Prospección Evaluación De Las Cuencas Y Oferta De Hidrocarburos Convencionales Y No Convencionales* (Contrato No. C-041 DE 2018; Issue 11).
- Villamil, T. (1998). Chronology, Relative Sea-Level History and a New Sequence Stratigraphic Model for Basinal Cretaceous Facies of Colombia. In *Paleogeographic Evolution and Non-Glacial Eustasy, Northern South America* (Vol. 58, pp. 161–216). SEPM Society for Sedimentary Geology.
<https://doi.org/10.2110/pec.98.58.0161>
- Villamil, T. (2003). Regional Hydrocarbon Systems of Colombia and Western Venezuela: Their Origin, Potential, and Exploration. In *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation and Plate Tectonics* (Vol. 79, pp. 697–736). American Association of

Petroleum Geologists.
<https://doi.org/10.1306/M79877>

Villamizar, Y., Ramón, J. D. y López, L. A. (2020). Análisis de las condiciones del recurso hídrico en la quebrada escorial, Pamplona Norte de Santander. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 11(1). DOI: <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i1.382>

Yoris, F. (1989). Consideraciones sobre la Formación Querecual de Venezuela oriental. *GEOS Revista Venezolana de Ciencias de La Tierra*, 50(29), 126–138. http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_geos/article/view/7014

Zou, C., Dong, D., Wang, S., Li, J., Li, X., Wang, Y., Li, D., & Cheng, K. (2010). Geological characteristics and resource potential of shale gas in China. *Petroleum Exploration and Development*, 37(6), 641–653. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(11\)60001-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1876-3804(11)60001-3)

Zumberge, J. E. (1984). Source Rocks of the La Luna Formation (Upper Cretaceous) in the Middle Magdalena Valley, Colombia. In J. G. Palacas (Ed.), *Petroleum Geochemistry and Source Rock Potential of Carbonate Rocks* (Vol. 18, pp. 127–133). American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/10.1306/St18443C9>