

BIOESTRATIGRAFÍA E INFERENCIAS PALEOAMBIENTALES DE LAS ASOCIACIONES DE FORAMINÍFEROS EN LAS FORMACIONES CRETÁICAS LA LUNA-COLÓN (CUENCA DEL CATATUMBO, COLOMBIA)

German David Patarroyo^{1*}; Gustavo Adolfo Torres¹; Daniel Andrés Rincón²;
Claudia Patricia Cárdenas³; Robert Emilio Márquez²

DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v39n3-2017002>

Forma de citar: Patarroyo, G.D., Torres, G.A., Rincón, D.A., Cárdenas, C.P., y Márquez, R.E. 2017. Bioestratigrafía e inferencias paleoambientales de las asociaciones de foraminíferos en las formaciones cretácicas La Luna-Colón (Cuenca del Catatumbo, Colombia). *Boletín de Geología*, 39(3): 25-40.

RESUMEN

El estudio micropaleontológico (foraminíferos) de un núcleo de perforación y la integración con información previa en otros pozos de la Cuenca del Catatumbo, permitió la caracterización bioestratigráfica y paleoambiental del contacto entre las formaciones La Luna y Colón. Para la parte superior de la Formación La Luna (Coniaciano-Campaniano) las asociaciones de foraminíferos presentaron una baja diversidad, siendo constituidas por una alta proporción de foraminíferos infaunales y planctónicos biseriales, los cuales sugieren condiciones de mar abierto con una baja oxigenación y alta productividad superficial. Para la Formación La Luna, taxones como *Bolivinooides* spp. (*Bolivina explicata*), *Anomalina redmondi*, *Praeulimina* spp., y *Heterohelix* spp. fueron encontrados. En contraste, para la parte más inferior de la Formación Colón, las asociaciones de foraminíferos fueron diversas, principalmente compuestas por foraminíferos bentónicos epifaunales y planctónicos no quillados que sugieren condiciones de moderada a buena oxigenación en un entorno de plataforma interna. Taxones como *Globotruncana* spp., *Rugoglobigerina* spp., *Siphogenerinoides* spp., *Anomalina* spp., *Pullenia cretacea*, *Praeulimina petroleana* y *Haplophragmoides excavata* se consideraron como diagnósticos de la parte inferior de la Formación Colón (Miembro Socuy), con una edad Campaniano tardío-Maastrichtiano.

Este contraste en las asociaciones de foraminíferos y los paleoambientes interpretados ha sido observado en todos los pozos estudiados en la Cuenca del Catatumbo, lo que concuerda con estudios previos que sugieren un contacto discordante entre las dos unidades.

Palabras clave: Cretácico Superior; Cuenca del Catatumbo; foraminíferos; formaciones La Luna-Colón; paleoambientes.

BIOSTRATIGRAPHY AND PALEOENVIRONMENTAL INFERENCES OF THE FORAMINIFERAL ASSEMBLAGES IN THE CRETACEOUS FORMATIONS LA LUNA-COLÓN (CATATUMBO BASIN, COLOMBIA)

ABSTRACT

The micropaleontological survey (foraminifers) of a stratigraphic core and its integration with previous data from other wells in the Catatumbo Basin provided the biostratigraphic and paleoenvironmental characterization of the contact between La Luna and Colon formations. For the upper part of La Luna Formation (Coniacian-Santonian) the foraminiferal assemblages were less diversified, with a high proportion of infaunal foraminifera and biserial planctonics, suggesting an oxygen-depleted open marine environment probably related with higher surface productivity. Taxa such as *Bolivinooides* spp. (*Bolivina explicata*), *Anomalina redmondi*, *Praeulimina* spp., and *Heterohelix* spp. were found in this unit. In contrast, for the lowermost Colon Formation, the foraminiferal assemblages were diverse, mainly composed by epifaunal benthic foraminifera and non-keeled planctonics suggesting well to moderate oxygenated conditions in an inner shelf setting. Taxa such as *Globotruncana* spp., *Rugoglobigerina* spp., *Siphogenerinoides* spp., *Anomalina* spp., *Pullenia cretacea*, *Praeulimina petroleana* and *Haplophragmoides excavata* were considered as diagnostic of the lower Colon Formation (Socuy Member), with a late Campanian-Maastrichtian age.

This turnover in the foraminiferal assemblages and the interpreted paleoenvironments have been observed in all the studied wells in the Catatumbo Basin, agreeing with previous studies that suggest a discordant contact between these two units.

Keywords: Upper Cretaceous; Catatumbo Basin; foraminifers; La Luna-Colón formations; paleoenvironments.

¹ Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia. (*)paleo.patarroyo@gmail.com; gustshao@gmail.com

² Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) – ECOPEPETROL S.A., Piedecuesta, Santander, Colombia.
daniel.rincon@ecopetrol.com.co; robert.marquez@ecopetrol.com.co

³ Departamento de Geología, Universidad EAFIT, Medellín, Antioquia, Colombia. cpcardenag@eafit.edu.co

INTRODUCCIÓN

En las cuencas de Maracaibo y del Catatumbo la Formación La Luna ha sido reconocida como una roca generadora por excelencia, aportando alrededor del 90% de los hidrocarburos encontrados (Sutton, 1946; Talukdar y Marcano, 1994; Mann *et al.*, 2006; Pedraza y Ramírez, 2011). Por ende, distintos trabajos han tratado de definir una cronología robusta al igual que un modelo deposicional y paleoambiental para esta unidad. Los trabajos más recientes en la Cuenca de Maracaibo le atribuyen una edad de Cenomaniano a Campaniano, un ambiente de depósito bajo condiciones muy anóxicas y una paleobatimetría comprendida entre la plataforma externa y el talud (Martínez y Hernández, 1992; Erlich *et al.*, 1999; Villamil *et al.*, 1999; Parra *et al.*, 2003). Dichas interpretaciones han probado ser similares a las sugeridas tanto para la Formación La Luna en la Cuenca del Catatumbo como para unidades equivalentes en cuencas como el Valle Superior del Magdalena (VSM, formaciones Hondita y Loma Gorda; Villamil y Pindell, 1998; Villamil *et al.*, 1999; Pedraza y Ramírez, 2011; Martínez, 2003).

Cuando dicha información se compara con las unidades del Cretácico que suprayacen a la Formación La Luna (formaciones Colón y Molino), se evidencia que no se dispone de la misma cantidad de datos. Factores como una menor exposición en los afloramientos de estas unidades o su moderado a bajo potencial en hidrocarburos podrían ser los causantes de este sesgo. Si bien el contraste litológico entre las formaciones La Luna y Colón/Molino es de fácil diagnóstico, no hay un claro entendimiento de la transición estratigráfica y paleoambiental entre estas dos unidades. Estudios en la Cuenca del Maracaibo, los cuales integraron análisis micropaleontológicos (foraminíferos planctónicos y nanofósiles) y geoquímicos ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) sugieren una edad de Campaniano tardío para el contacto La Luna-Colón (Parra *et al.*, 2003). Algunos autores proponen que dicho contacto es de tipo concordante para la parte oeste de la cuenca (Quebrada Santa Elena; Notestein *et al.*, 1944; Pedraza y Ramírez, 2011), mientras que estudios en los Andes de Mérida, basados principalmente en geofísica y sondeos paleontológicos generales, sugieren que el contacto La Luna-Colón corresponde a uno de tipo discordante (Sutton, 1946; Castillo y Mann, 2006; Cooney y Lorente, 2009).

En general para la Cuenca del Catatumbo, la cronología de dicho contacto suele establecerse por el análisis bioestratigráfico de amonitas, inocerámidos y foraminíferos de la Formación La Luna o, en menor medida, de los bivalvos y amonitas de las

formaciones Colón y Molino (Hedberg y Sass, 1937; Kehrler, 1937; Notestein *et al.*, 1944; Sutton, 1946; Renz, 1959; Martínez, 1989; Pedraza y Ramírez, 2011; Ayala *et al.*, 2016).

En el caso del recobro de foraminíferos, dentro de la Formación La Luna se reportan abundantes ejemplares planctónicos y bentónicos, los cuales han sido estudiados principalmente en secciones delgadas, dada la dificultad para separar los microfósiles de la matriz calcárea (Sutton, 1946; Petters, 1955). Una situación similar se ha observado para la Formación La Luna en la parte occidental de la Cuenca del Maracaibo (De Romero y Galea-Alvarez, 1995; Parra *et al.*, 2003). En contraste, el tipo de litología presente en las formaciones Colón y Molino ha favorecido la recuperación de microfósiles mediante técnicas de preparación estándar. Aspectos sobre la bioestratigrafía de foraminíferos y los paleoambientes de la Formación Molino han sido estudiados en la Cuenca de Cesar-Ranchería y el occidente de la Cuenca de Maracaibo. (Sellier de Civreaux, 1952; Gandolfi, 1955; Martínez, 1989). En cambio, los estudios de foraminíferos en la Formación Colón, han sido restringidos en la Cuenca del Catatumbo (Cushman y Hedberg, 1930, 1941; Notestein *et al.*, 1944).

El presente trabajo ilustra los resultados de bioestratigrafía de foraminíferos en la transición entre las formaciones La Luna y Colón en la Cuenca del Catatumbo. A través de la interpretación de las asociaciones de foraminíferos encontradas en el pozo ECOPETROL-1. Este pozo, ubicado en el sector nororiental de la Cuenca del Catatumbo, perforó sedimentitas del Cretácico, corazonando la totalidad de la Formación La Luna. Basados en el recobro de las asociaciones de foraminíferos en dicho pozo se discute la cronología del contacto La Luna-Colón, al igual que se infieren las condiciones paleoambientales para el área.

LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Cuenca del Catatumbo (Norte de Santander, Colombia) corresponde a la prolongación hacia el suroeste de la Cuenca del Maracaibo, siendo sus límites la Serranía del Perijá al norte, los Andes de Mérida al oriente y el Macizo de Santander al sur (FIGURA 1; Pedraza y Ramírez, 2011). La evolución geológica de la cuenca se encuentra enmarcada dentro de cuatro fases tectónicas: (1) *rifting* durante el Jurásico, que produjo la depositación de unidades sintectónicas (Formación La Quinta), (2)

deposición de unidades clásticas y carbonatadas dentro de un margen pasivo entre el Aptiano tardío y el Campaniano tardío (formaciones Río Negro, Tibú, Mercedes, Aguardiente, Capacho y La Luna), (3) establecimiento de una cuenca tipo *foreland* durante

el Maastrichtiano tardío-Paleoceno (formaciones Colón, Mito Juan y Catatumbo) y (4) levantamiento de los Andes de Mérida y la Serranía del Perijá a partir del Neógeno (Ayala-Calvo *et al.*, 2009; Mann *et al.*, 2006; Pedraza y Ramírez, 2011).

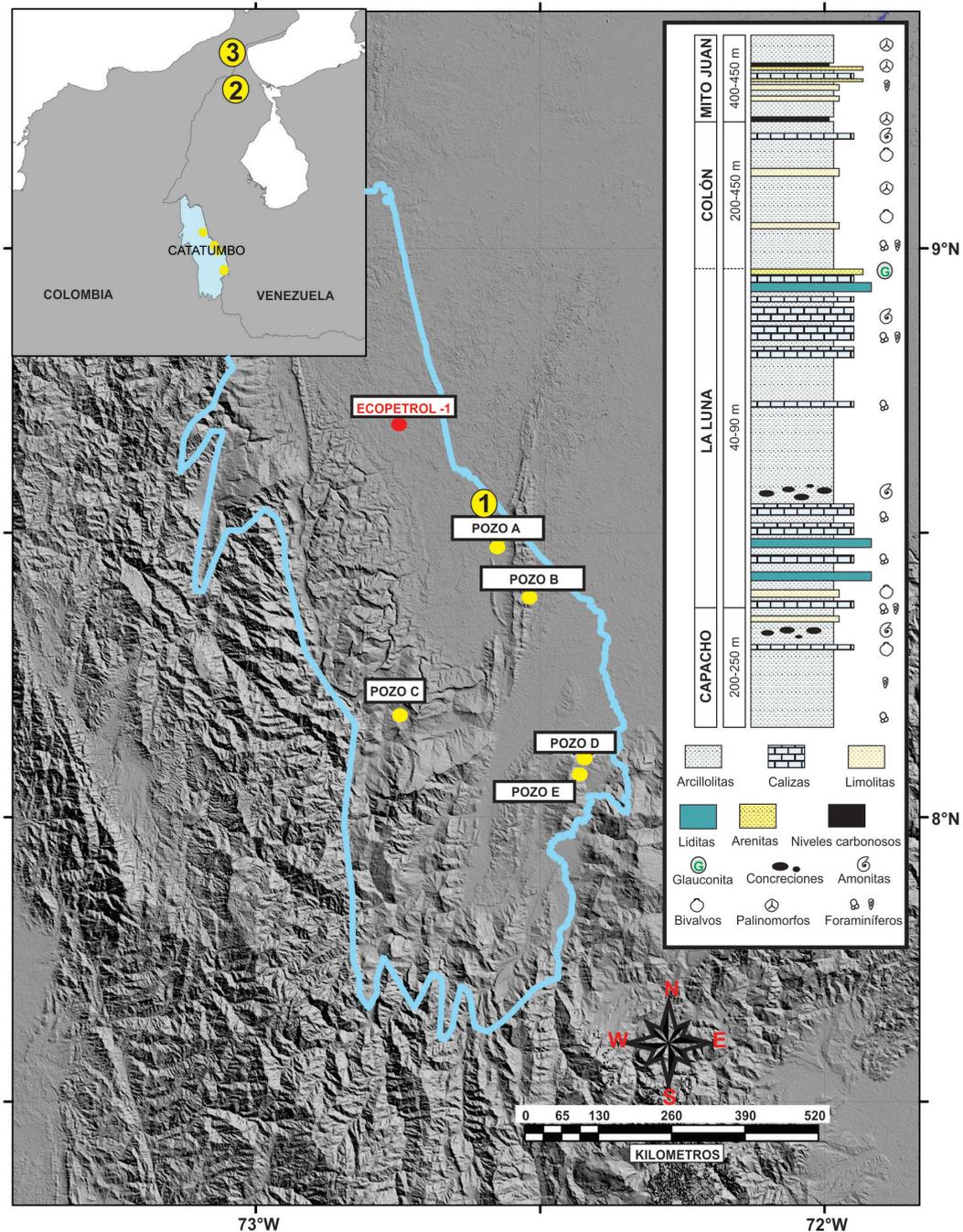


FIGURA 1. Localización del área de estudio. Secciones con estudios de foraminíferos en las formaciones Colón y/o Molino: (1) Quebrada Petrolea (Cushman y Hedberg, 1941); (2) Río Socuy (Sellier de Civrieux, 1952); (3) Río Molino (Gandolfi, 1955; Petters, 1955; Martínez, 1989). Los puntos amarillos indican otros pozos donde se han estudiado las asociaciones de foraminíferos del contacto entre las formaciones La Luna y Colón. Estratigrafía generalizada de la sucesión del Cretácico Superior en la Cuenca del Catatumbo (Basado en Notestein *et al.*, 1944; Pedraza y Ramírez, 2011). El modelo de elevación fue facilitado por ECOPEL S.A.

La sucesión del Cretácico Superior de la Cuenca del Catatumbo comprende, de base a tope, las formaciones Capacho, La Luna y Colón-Mito Juan, presentando en conjunto un espesor variable y que oscila entre los 750 y los 1400 metros dependiendo de su cercanía con el Macizo de Santander (FIGURA 1; Notestein *et al.*, 1944; Pedraza y Ramírez, 2011). Para la Formación La Luna se tienen registrados espesores que oscilan entre 40 y 90 metros tanto en subsuelo como en afloramiento, con una litología que comprende calizas con abundantes foraminíferos, shales bituminosos con concreciones y niveles centimétricos de chert hacia su parte superior (Notestein *et al.*, 1944; Clavijo, 1994; Pedraza y Ramírez, 2011). El contacto de la Formación La Luna con la subyacente Capacho es de tipo concordante (Notestein *et al.*, 1944), mientras que su contacto superior con la Formación Colón podría ser de tipo discordante (Sutton, 1946; Renz, 1959; Castillo y Mann, 2006; Cooney y Lorente, 2009).

La litología reportada para la Formación Colón corresponde en su mayoría a shales moderadamente calcáreos de color gris a gris oscuro y con espesores que oscilan entre los 200 y los 450 metros en superficie y pozos (Notestein *et al.*, 1944; Clavijo 1994). Para la parte más norte de la cuenca (Río de Oro), la Serranía del Perijá y el occidente de Venezuela, la unidad presenta capas de calizas hacia la base, las cuales son referidas como el Miembro Socuy (Sutton, 1946; Sellier de Civreaux, 1952; Julivert, 1968; Martínez, 1989). Dada la escasez de secciones de superficie completas en la cuenca y la dificultad para diferenciar esta unidad con la que la suprayace, se suele denominar en conjunto como Formación Colón-Mito Juan (Notestein *et al.*, 1944; Julivert, 1968; Clavijo, 1994; Pedraza y Martínez, 2011).

El pozo ECOPEPETROL-1, ubicado al nororiente de la Cuenca del Catatumbo, perforó en el 2014 una sucesión del Cretácico que abarca el intervalo Mito Juan-Tibú (FIGURA 1). La Formación Aguardiente era su objetivo primario, mientras que las formaciones Tibú y Cogollo fueron consideradas objetivos secundarios. La sucesión perforada está embebida dentro del tren anticlinal Socuavó Tibú-Sardinata, que con un rumbo N-NW comprende tres estructuras anticlinales independientes con una longitud aproximada de 50 km. Estas conforman las estructuras productoras de los campos de Sardinata y Tibú respectivamente (Pedraza y Ramírez, 2011).

Para el pozo ECOPEPETROL-1, la totalidad de la Formación La Luna fue corazonada (59,4 m de espesor

según registros eléctricos). El espesor registrado para la Formación Colón es de 360 m, de los que se analizaron los 80 m inferiores. De acuerdo al registro litológico del pozo ECOPEPETROL-1, la parte inferior de la Formación Colón corresponde a una sucesión de arcillolitas y margas grisáceas, mientras que la Formación La Luna comprende una sucesión dominada por biomicritas con intercalaciones de arcillolitas grises. Según los registros eléctricos y la disminución abrupta de la tasa de perforación el contacto La Luna-Colón se encuentra en 2359,2 m.

MÉTODOS

Se estudiaron un total de 27 muestras correspondientes al intervalo 2289 - 2417,4 m. De estas, 10 corresponden a ripios de perforación (2289 - 2368,3 m; parte inferior de la Formación Colón) y 17 muestras comprenden el intervalo corazonado de la Formación La Luna (TABLA 1).

TABLA 1. Listado de muestras analizadas en el pozo ECOPEPETROL-1. En negrilla se indican las muestras que resultaron estériles en microfósiles.

Profundidad (m)	Tipo de muestra	Unidad	Profundidad (m)	Tipo de muestra	Unidad
2289	Ripio	Colón	2382,9	Núcleo	La Luna
2298,2	Ripio	Colón	2385,1	Núcleo	La Luna
2307,3	Ripio	Colón	2388,3	Núcleo	La Luna
2316,5	Ripio	Colón	2390,8	Núcleo	La Luna
2325,6	Ripio	Colón	2394	Núcleo	La Luna
2334,8	Ripio	Colón	2396,9	Núcleo	La Luna
2343,9	Ripio	Colón	2400,6	Núcleo	La Luna
2350	Ripio	Colón	2403,3	Núcleo	La Luna
2359,2	Ripio	Colón	2406	Núcleo	La Luna
2368,3	Ripio	La Luna	2408,2	Núcleo	La Luna
2370,7	Núcleo	La Luna	2411,9	Núcleo	La Luna
2372,9	Núcleo	La Luna	2414,9	Núcleo	La Luna
2376,8	Núcleo	La Luna	2417,4	Núcleo	La Luna
2379,9	Núcleo	La Luna			

Las muestras fueron preparadas por el Laboratorio de Procesamiento Geológico (LPG) del Instituto Colombiano del Petróleo ICP-ECOPEPETROL S.A., empleando el método del peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 5% dada la competencia del material (Sohn, 1961). Una vez preparadas las muestras, fueron tamizadas

sobre las mallas 63 µm y 125 µm. Posteriormente los foraminíferos fueron seleccionados y asignados a una morfoespecie con el fin de identificar biozonas a lo largo de la sucesión sedimentaria. Se tuvo en cuenta el tipo de conchilla y el hábito de vida asociado para hacer inferencias paleoambientales de las asociaciones de foraminíferos (Corliss y Chen, 1988; Murray, 2006; Jorissen *et al.*, 2007). Igualmente, se hizo énfasis en las proporciones de especies indicadoras de paleoproductividad y paleoxigenación de acuerdo a la literatura en sucesiones del Cretácico del norte de Suramérica (Koutsoukos y Merrick, 1986; Koutsoukos, 1992; Koutsoukos y Hart, 1990; Martínez, 2003).

Para la identificación taxonómica de las especies planctónicas se consultó lo propuesto por Caron (1985), Nederbragt (1991), Georgescu (2005) y Premoli Silva y Verga (2011). La determinación taxonómica de las especies bentónicas siguió a: (1) compilaciones generales (Bolli *et al.*, 1994; Frizzell, 1954; Loeblich *et al.*, 1957; Loeblich y Tappan, 1988) y (2) estudios hechos sobre los foraminíferos de la Formación Colón o equivalentes (Cushman y Hedberg, 1930, 1941; Sellier de Civrieux, 1952; Petters, 1955; Martínez, 1989). La bioestratigrafía del pozo siguió las observaciones propuestas en los estudios que se refirieron arriba y el marco bioestratigráfico definido internamente por ECOPETROL S.A para la cuenca.

Se estimaron la riqueza (S) y la diversidad de las asociaciones de foraminíferos bentónicos utilizando los índices de Shannon-Wiener (H) mediante el Programa Past (Hammer *et al.*, 2001). El índice de Shannon Wiener indica la relación que se establece entre la cantidad de especies y la abundancia relativa (pi) que ellas presentan en la asociación.

$$H = -\sum p_i \ln(p_i) \quad (1)$$

Los valores de este índice parten de 0, representando los valores >0 una mayor riqueza de especies (Shannon, 1948; Hayek y Buzas, 1997; Magurran, 2004).

Por último se tuvieron en cuenta resultados de análisis previos de petrografía convencional, petrografía orgánica y de Carbono Orgánico Total (COT; intervalo 2298,2 - 2406 m) efectuados en muestras de ripio y corazón de las formaciones La Luna y Colón inferior. Todos estos análisis fueron efectuados en el laboratorio de geoquímica del ICP-ECOPETROL S.A.

RESULTADOS

Para el intervalo analizado en las biomicritas, bioesparitas y liditas de la Formación La Luna (2368,3 - 2417,4 m), las muestras presentaron un recobro moderado a bajo, en algunos casos <30 ejemplares por muestra, y una preservación generalmente mala por métodos de extracción convencional. En muestras de sección delgada del mismo intervalo se observó una presencia alta de microfósiles. Si bien esto puede implicar un sesgo en la información obtenida a la hora de discutir la transición entre las formaciones La Luna y Colón, estudios previos con secciones delgadas muestran que la composición de las asociaciones no varía significativamente con respecto a lo observado por métodos de extracción estándar (Parra *et al.*, 2003). Por tal motivo, los resultados que se presentarán a continuación, los cuales se discutirán en un contexto bioestratigráfico y paleoambiental, son los obtenidos por los métodos de extracción convencional.

En contraste, para el intervalo analizado en las arcillolitas fisiles y niveles calcáreos de la Formación Colón (2289 - 2359,2 m), todas las muestras presentaron un recobro alto (>150 ejemplares por muestra) y una preservación moderada a muy buena de la microfauna. Foraminíferos representativos del intervalo analizado en el pozo ECOPETROL-1, son ilustrados en la LÁMINA 1.

A continuación, se ilustran en un sentido estratigráfico los resultados:

Formación La Luna (2368,3 - 2417,4 m)

Aunque la abundancia de las formas planctónicas es dominante en casi todo el intervalo (FIGURA 2, TABLA 2), la proporción de formas bentónicas fue >50% solo hacia el tope de la Formación La Luna (entre 2372,9 - 2382,9 m). En el caso del intervalo con predominio de formas bentónicas, estas corresponden principalmente a microfósiles infaunales (>80%). Los análisis de COT muestran valores que oscilan entre 3 - 6% desde 2406 hasta 2370,7 m (FIGURA 3).

Se reconocen los géneros planctónicos trocoespirales *Muricohedbergella*, *Whiteinella* sp. y es común (>10%) la presencia de formas planctónicas biserials (*Heterohelix* spp.) y formas planctónicas indeterminadas (FIGURA 4).

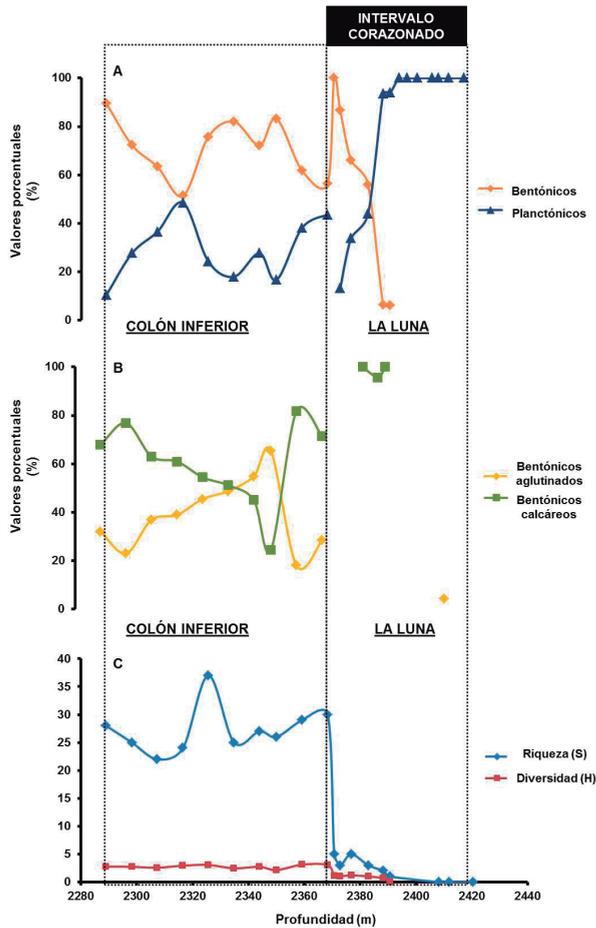


FIGURA 2. A. Proporción de las formas planctónicas y bentónicas. B. Proporción de las formas bentónicas con conchillas de tipo hialino y aglutinado. C. Riqueza de especies (S) y diversidad de las asociaciones de foraminíferos bentónicos (H) del pozo ECOPETROL-1. Se indican los intervalos correspondientes a las formaciones Colón y La Luna.

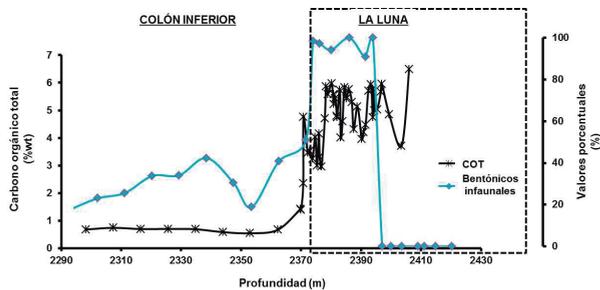


FIGURA 3. Proporción de las formas bentónicas con hábito de vida infaunal y valores del carbono orgánico total (COT) en el pozo ECOPETROL-1. El cuadro con línea discontinua indica el intervalo corazonado.

Entre las formas bentónicas se identifican las especies infaunales *Praebulimina carseyae* y *Bolivina explicata*, al igual que la epifaunal *Anomalina redmondi* (comunes en el intervalo 2370,7 - 2382,9 m). El listado completo de las especies y sus rangos estratigráficos están

referidos en la FIGURA 5. En general las muestras de este intervalo presentan valores bajos de diversidad y riqueza de las asociaciones de foraminíferos bentónicos, con valores que oscilan entre 0,69 - 1,1 y 1 - 5 respectivamente (FIGURA 2, TABLA 3).

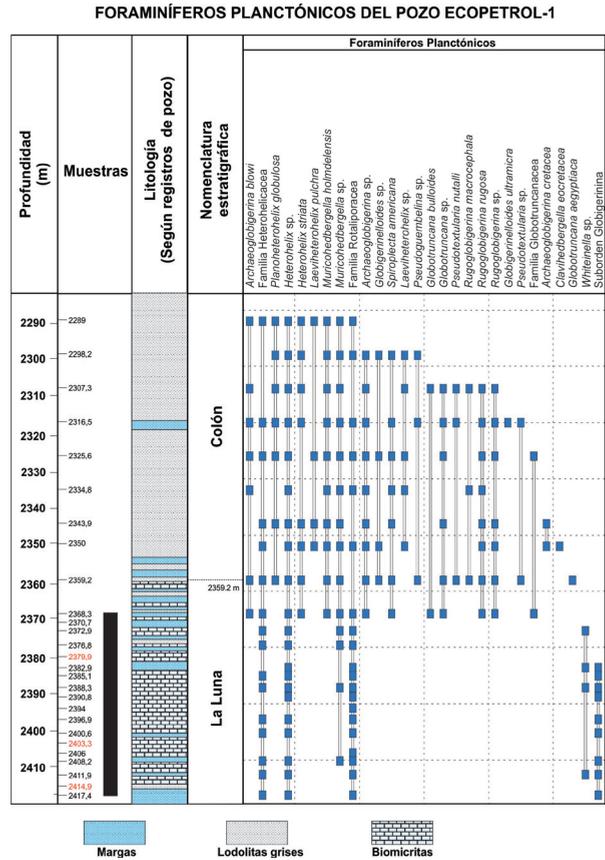


FIGURA 4. Rangos estratigráficos de los foraminíferos planctónicos encontrados en el pozo ECOPETROL-1. Los cuadros azules indican presencia de taxón. En rojo se indican las muestras que resultaron estériles en microfósiles. El recuadro negro indica el intervalo corazonado en el pozo. La litoestratigrafía de acuerdo a registros de pozo.

Otros microfósiles marinos en este intervalo correspondieron a fragmentos de gasterópodos, ostrácodos (pared lisa) y dientes de peces. En las muestras es ocasional la presencia ocasional de fragmentos de chert (origen diagenético).

Formación Colón (Intervalo 2289 - 2370,7 m)

La relación entre las formas planctónicas y bentónicas muestra que las últimas son predominantes estratigráficamente por encima del contacto La Luna-Colón (2370,7 m), comprendiendo más del 60% de la asociación salvo en las muestras 2316,5 y 2368,3 m (FIGURA 2).

TABLA 2. Proporciones de las formas planctónicas, bentónicas calcáreas, aglutinadas e infaunales en las muestras analizadas del pozo ECOPETROL-1.

Muestra	Planctónicos (%)	Bentónicos (%)	Bentónicos aglutinados (%)	Bentónicos calcáreos (%)	Bentónicos infaunales (%)	Bentónicos epifaunales (%)
2289	10,5	89,5	32,1	67,9	17,8	82,8
2298,2	27,7	72,3	23,1	76,9	23,1	79,1
2307,3	36,6	63,4	36,9	63,1	25,6	74,4
2316,5	48,6	51,4	39,0	61	33,8	66,2
2325,6	24,2	75,8	45,5	55	34,1	65,9
2334,8	18,0	82	48,8	51,2	42,4	57,6
2343,9	27,8	72,2	54,9	45,1	30,5	69,5
2350	16,7	83,3	65,5	24,5	18,8	81,2
2359,2	38,2	61,8	18,1	81,9	40,9	59,1
2368,3	43,6	56,4	28,6	71,4	51,1	48,9
2370,7	0	0	0	100	98,5	1,5
2372,9	13,2	86,8	0	100	97,4	2,6
2376,8	33,9	66,1	0	100	94,3	5,7
2379,9	0	0	0	0	0	0
2382,9	44	56	0	100	100	0
2385,1	100	0	0	0	0	0
2388,3	93,5	6,5	4,3	95,7	90,9	9,1
2390,8	93,9	6,1	0	100	100	0
2394	100	0	0	0	0	0
2396,9	100	0	0	0	0	0
2400,6	100	0	0	0	0	0
2403,3	0	0	0	0	0	0
2406	100	0	0	0	0	0
2408,2	100	0	0	0	0	0
2411,9	100	0	0	0	0	0
2414,9	0	0	0	0	0	0
2417,4	100	0	0	0	0	0

FORAMINIFEROS BENTÓNICOS DEL POZO ECOPETROL-1

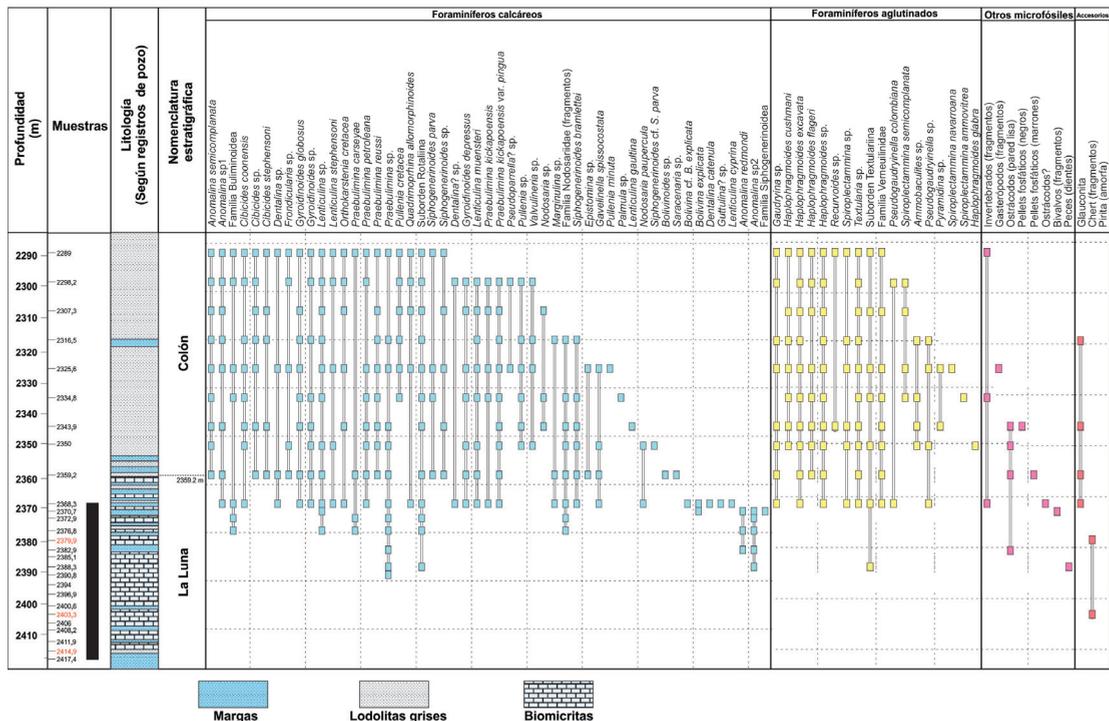


FIGURA 5. Rangos estratigráficos de los foraminíferos bentónicos encontrados en el pozo ECOPETROL-1. Los cuadros azules indican presencia de taxón. En rojo se indican las muestras que resultaron estériles en microfósiles. El recuadro negro indica el intervalo corazonado en el pozo. La litoestratigrafía de acuerdo a registros de pozo.

Las asociaciones de foraminíferos bentónicos se encuentran constituidas por conchillas de tipo calcáreo y aglutinado, siendo dominantes (>60%) las primeras en casi todas las muestras. Solo para el intervalo 2343,9 - 2350 m, la proporción de las conchillas de tipo aglutinado supera el 50% (FIGURA 2, TABLA 2). Respecto al hábito de vida de los foraminíferos bentónicos, que es definido por la morfología de las conchillas, las formas bentónicas infaunales tienen proporciones más bajas que las observadas en la Formación La Luna, con valores <30% en las muestras superiores de la Formación Colón (2350, 2307,3 - 2289 m; TABLA 2). A diferencia de los valores de COT registrados en la Formación La Luna, por encima de 2370,3 m, se encuentran por debajo del 1% en la Formación Colón (FIGURA 3).

En general las formas planctónicas encontradas corresponden principalmente a formas no quilladas, siendo las especies que presentan valor bioestratigráfico *Archaeoglobigerina cretacea*, *A. blowi*, *Rugoglobigerina macrocephala*, *Laeviheterohelix pulchra* y *Spiroplecta americana*, (FIGURA 4). En una baja proporción (<2% de la asociación), se identifican también las formas *Globotruncana aegyptiaca* y *G. bulloides*. Entre las formas bentónicas calcáreas los taxones epifaunales más representativos (>2% de la asociación) corresponden a *Anomalina semicomplanata*, *Cibicides stephensoni*, *Gyrodinoides depressus* y *Lenticulina muensteri* entre otros. Las formas infaunales con valor bioestratigráfico corresponden a *Orthokarstenia cretacea*, *Pullenia cretacea*, *Praeulimina petroleana* y *Siphogenerinoides bramlettei*, que figuran en proporciones moderadas a bajas (2 - 5% de la asociación). Entre las formas bentónicas aglutinadas se encuentran *Haplophragmoides excavata*, *Pseudogaudryinella colombiana* y *Spiroplectamina navarroana* con proporciones <2%. El listado completo de las especies y sus rangos estratigráficos están referidos en la FIGURA 5. En general los valores de diversidad y riqueza de las asociaciones de foraminíferos bentónicos son mayores que los observados en la Formación La Luna, oscilando entre 3,07 - 2,46 los de diversidad y >20 los de riqueza respectivamente. (FIGURA 2, TABLA 3).

Microfósiles marinos adicionales corresponden a ostrácodos no reticulados, fragmentos de gasterópodos e invertebrados. Es conspicua la presencia de glauconita (muestra 2368,3 m) y de pellets fosfáticos (marrones y negros).

TABLA 3. Estimaciones de riqueza de especies (S), diversidad (H) en las asociaciones de foraminíferos bentónicos del pozo ECOPETROL-1.

Muestra	Riqueza (S)	Diversidad (H)
2289	28	2,77
2298,2	25	2,73
2307,3	22	2,57
2316,5	24	2,95
2325,6	37	3,07
2334,8	25	2,46
2343,9	27	2,73
2350	26	2,15
2359,2	29	3,12
2368,3	30	3,05
2370,7	5	1,10
2372,9	3	1,03
2376,8	5	1,21
2382,9	3	1,00
2388,3	2	0,69
2390,8	1	0

DISCUSIÓN

Teniendo en cuenta la información obtenida, se discute el modelo de edad y los paleoambientes propuestos para el contacto La Luna-Colón en el pozo ECOPETROL-1.

Bioestratigrafía del Pozo ECOPETROL-1

Formas planctónicas de la Formación La Luna como el género *Whiteinella*, sugieren un rango de edad Cenomaniano más tardío-Santoniano de acuerdo a Caron (1985) y Premoli Silva y Verga (2011). Otras formas planctónicas que se encontraron en la Formación La Luna como *Planoheterohelix globulosa* y *Muricohedbergella* spp., presentan rangos bioestratigráficos más amplios y por ende también fueron encontrados en las muestras pertenecientes a la Formación Colón (FIGURA 6). A su vez, la presencia de formas bentónicas calcáreas como *Anomalina redmondi* y *Bolivina explicata* sugieren una edad de Coniaciano-Campaniano (Bürgl y Dumit, 1954; Petters, 1955; Martínez, 2003; FIGURA 6). Con la anterior evidencia, se propone que la Formación La Luna, en el pozo ECOPETROL-1, tiene una edad Coniaciano-Santoniano.

En los Andes de Mérida y la región de Maracaibo ha sido propuesto el Miembro Tres Esquinas, originalmente para la parte más basal de la Formación Colón (Notestein *et al.*, 1944; Julivert, 1968). En la actualidad se considera como el tope de la Formación La Luna (De Romero y Galea-Alvarez, 1995). Esta unidad que presenta entre 1 - 3 metros de espesor, se caracteriza por la

presencia de niveles fosfáticos, areniscas glauconíticas y microfósiles principalmente bentónicos del género *Bolivinooides*. A nivel regional el género *Bolivinooides* es muy común en sucesiones del Santoniano-Campaniano en la parte central del Tetis, presentando una gran diversificación en sus formas a lo largo del Santoniano (Dubicka y Peryt, 2016). Dentro del material analizado en ECOPETROL-1, solo en la muestra 2368,3 m la presencia de glauconita es significativa. En analogía al Miembro Tres Esquinas la presencia puntual de glauconita y la primera ocurrencia de *Bolivina explicata*

en 2368,3 m podrían ser evidencias composicionales del tope de la Formación La Luna (FIGURA 5). La especie referida se viene reportando para la parte superior de la Formación La Luna y en menor medida la parte inferior de Colón (Cushman y Hedberg, 1930; Petters, 1955), proviniendo su holotipo de una localidad no especificada en los Andes de Mérida. Por características morfológicas *B. explicata* haría parte en realidad del género *Bolivinooides*, por lo que una redefinición taxonómica de esta especie es recomendable a futuro.

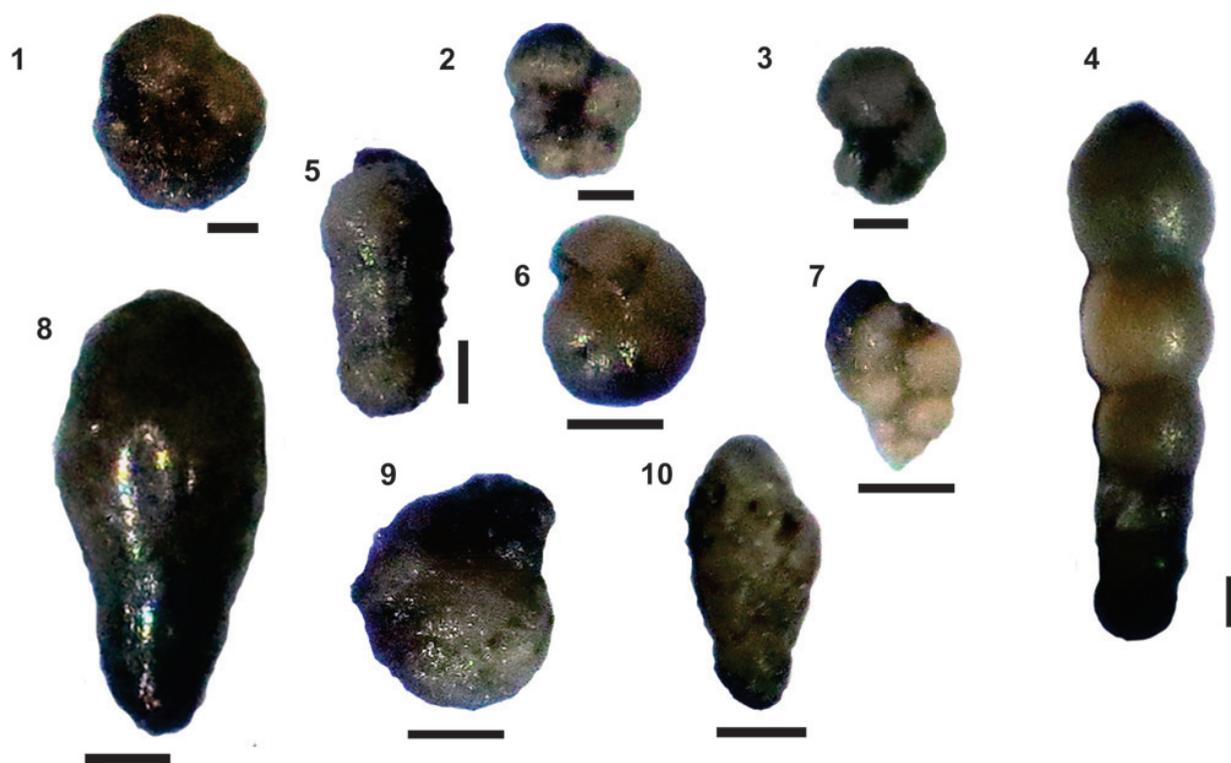


LÁMINA 1. Foraminíferos representativos del intervalo analizado en el pozo ECOPETROL-1. La escala representa 100 μm . (1) *Archaeoglobigerina blowi*, muestra 2359,2 m; (2) *Rugoglobigerina rugosa*, muestra 2350 m; (3) *Muricohedbergella* sp., muestra 2408,2 m; (4) *Dentalina catenula*, muestra 2368,3 m; (5) *Orthokarstenia cretacea*, muestra 2298,2 m; (6) *Pullenia cretacea*, muestra 2298,2 m; (7) *Laeviheterohelix* sp., muestra 2298,2 m; (8) *Bolivina explicata*, muestra 2368,3 m; (9) *Anomalina redmondi*, muestra 2376,8 m; (10) *Praebulimina* sp., muestra 2372,9 m.

Adicional a la presencia de *B. explicata*, entre 2,5 y 6 metros estratigráficamente por debajo de la muestra con glauconita (2368,3 m), es común la presencia de individuos, asignados a la familia Siphogenerinoididae por su baja preservación. Para el Miembro Tres Esquinas del Perijá de Venezuela, también se han reportado previamente especies de esa familia como *Orthokarstenia clarki* y *Orthokarstenia whitei* (De Romero y Galea-Alvarez, 1995).

Otra especie bentónica común para la parte superior de la Formación La Luna es *Anomalina redmondi*

(FIGURA 5). Esta forma bentónica es considerada diagnóstica de la parte superior de la Formación La Luna en el Valle Medio del Magdalena (VMM) por Petters (1955) e indicativa del Coniaciano tardío y el Santoniano (FIGURA 6), con referencias en secciones del VMM y la parte norte del VSM (Subcuenca de Girardot; Bürgl y Dumit, 1954; Tchegliakova y Mojica, 2001; Martínez, 2003). La presencia de *A. redmondi* en ECOPETROL-1 constituye el primer registro de la especie en la cuenca, siendo 2370,7 m su última ocurrencia estratigráfica (FIGURA 5).

TAXONES CON RELEVANCIA BIOESTRATIGRÁFICA DEL POZO ECOPEPETROL-1

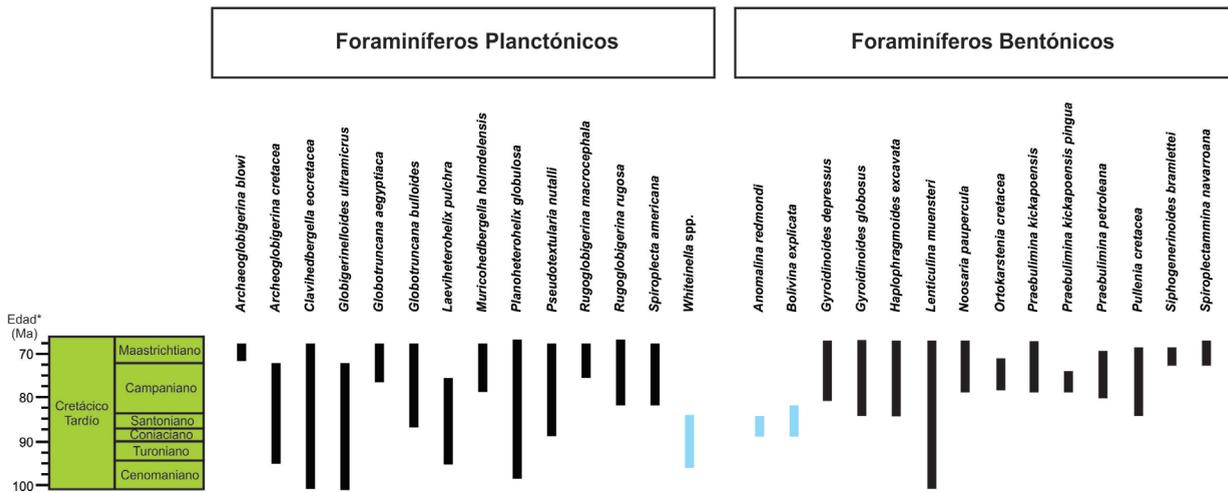


FIGURA 6. Taxones con relevancia bioestratigráfica del pozo ECOPEPETROL-1. En azul se indican los rangos bioestratigráficos de los taxones que se identificaron únicamente en la Formación La Luna. El resto de especies referidas fueron identificados para la Formación Colón y solo se tuvieron en cuenta sus primeras ocurrencias en pozo (extinciones en el registro estratigráfico). *Cronoestratigrafía del Cretácico, según Gradstein *et al.* (2012).

Para la Formación Colón, la presencia de los taxones planctónicos *Archaeglobigerina*, *G. aegyptiaca*, *Rugoglobigerina* y *Pseudotextularia* (FIGURA 4) sugieren una edad de Campaniano tardío-Maastrichtiano, siguiendo los reportes globales de Caron (1985), Nederbragt (1991) y Premoli Silva y Verga (2011). Esto coincide con lo descrito a nivel regional por Cushman y Hedberg (1941), Gandolfi (1955), Petters (1955) y Martínez (1989; cronoestratigrafía *sensu* Gradstein *et al.*, 2012). De acuerdo a la cronoestratigrafía del Cretácico, el intervalo estudiado estaría comprendido entre las zonas de foraminíferos planctónicos *Globotruncana aegyptiaca* y *Abatomphalus mayaroensis* (Gradstein *et al.*, 2012). Géneros planctónicos diagnósticos como *Rugoglobigerina* o *Laeviheterohelix* son hallados exclusivamente en las muestras de la Formación Colón (FIGURA 4).

La microfauna bentónica de la Formación Colón en el pozo ECOPEPETROL-1 corresponde en buena medida a la ya reportada en el Miembro Socuy (Cushman y Hedberg, 1941; Sellier de Civrieux, 1952; Martínez, 1989). Por ejemplo, especies como *Pullenia cretacea*, *Haplophragmoides excavata*, *Gyroidinoides depressus*, *Praebulimina petroleana* y *Orthokarstenia cretacea* están presentes en ECOPEPETROL-1 (FIGURA 5). En un sentido regional, dichos taxones han sido referidos como indicativos de las formaciones Colón/Molino inferior en secciones de afloramiento del Catatumbo

y la Serranía del Perijá (Zona de *Pullenia cretacea*; Cushman y Hedberg, 1941; Martínez, 1989).

Inferencias paleoambientales del Pozo ECOPEPETROL-1

Para el caso del pozo ECOPEPETROL-1, las asociaciones de foraminíferos planctónicos y bentónicos indican variaciones en la batimetría como en la oxigenación de las masas de agua y los sedimentos de fondo (FIGURA 7). Por ejemplo en las muestras analizadas para la Formación La Luna, la mayor proporción de las formas planctónicas (quilladas y no quilladas) respecto a las bentónicas y la predominancia de ciertas formas bentónicas infaunales como *Praebulimina*, indica según análogos modernos (Corliss y Chen, 1988; Murray, 2006; Jorissen *et al.*, 2007) condiciones de mar abierto (plataforma externa). El predominio de formas planctónicas biseriales en la Formación La Luna indicaría que las masas de agua tenían ciertas condiciones de estrés que favorecieron el predominio de pocas especies, particularmente *Heterohelix* spp (Koutsoukos y Merrick, 1986; Martínez, 2003).

Información adicional sobre dichas condiciones es proporcionada por la mayor ocurrencia de formas bentónicas de tipo infaunal, así como en la menor diversidad en las asociaciones bentónicas, lo que sugiere condiciones con mayor contenido de materia orgánica (MO) y menor oxigenación en los sedimentos de fondo.

De acuerdo al modelo TROX (Trophic OXygen Model; Jorissen *et al.*, 1995), una mayor predominancia de las formas infaunales estaría directamente relacionado a condiciones de eutrofismo en las masas de agua

superiores (FIGURA 7). Los altos valores de COT (>3%) en las muestras de la Formación La Luna en comparación con los registrados en la Formación Colón apoyarían esta aseveración (FIGURA 3).

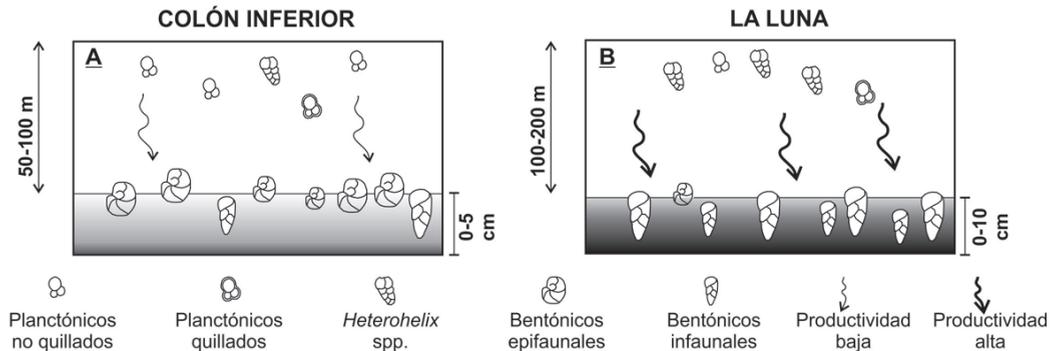


FIGURA 7. Interpretación paleoambiental del intervalo analizado en el pozo ECOPETROL-1. Se indica la paleobatimetría estimada y el grado de oxigenación en el sedimento de fondo. **A.** Parte inferior de la Formación Colón. **B.** Formación La Luna.

De acuerdo a estudios detallados en asociaciones de foraminíferos bentónicos del Cretácico, extraídos por métodos estándar como en nuestro caso, las escasas formas encontradas en las muestras de La Luna (bulimínidos), corresponden a formas oportunistas, detritívoras, y que debieron ser particularmente resistentes a condiciones de baja oxigenación en los sedimentos de fondo (Koutsoukos y Merrick, 1986; Koutsoukos y Hart, 1990; Martínez, 2003). A su vez estudios de petrografía orgánica en muestras de la Formación La Luna indican que la materia orgánica dominante corresponde a la de tipo amorfo (MOA), predominantemente marina (~98%) y con contenidos bajos de fitoclastos de origen continental (<5%).

y petrografía orgánica, se infiere que las condiciones de eutrofismo interpretadas en la Formación La Luna estarían asociadas a fenómenos de surgencia (*upwelling*). Interpretaciones de alta productividad superficial han sido sugeridas en asociaciones de foraminíferos planctónicos y macrofósiles (Villamil y Arango, 1998) del Turoniano-Campaniano tardío en otras cuencas de Colombia (Vergara, 1994; Martínez, 2003), Venezuela (Erlich *et al.*, 1999; Parra *et al.*, 2003) y Brasil (Koutsoukos y Merrick, 1986; Koutsoukos y Hart, 1990). En secciones delgadas observadas para el mismo intervalo, se observaron la misma relación en las asociaciones de foraminíferos planctónicos y bentónicos (FIGURA 8). Cabe mencionar que el tipo de litología predominante en las muestras analizadas de la Formación La Luna corresponde a biomicritas, y la acumulación seleccionada de los foraminíferos en estas también sugeriría condiciones de mar abierto y alta productividad superficial (Martínez, 2003).

Por ende, basados en las proporciones de los foraminíferos infaunales, el predominio de planctónicos biserials (*Heterohelix* spp.) y los resultados previos de geoquímica

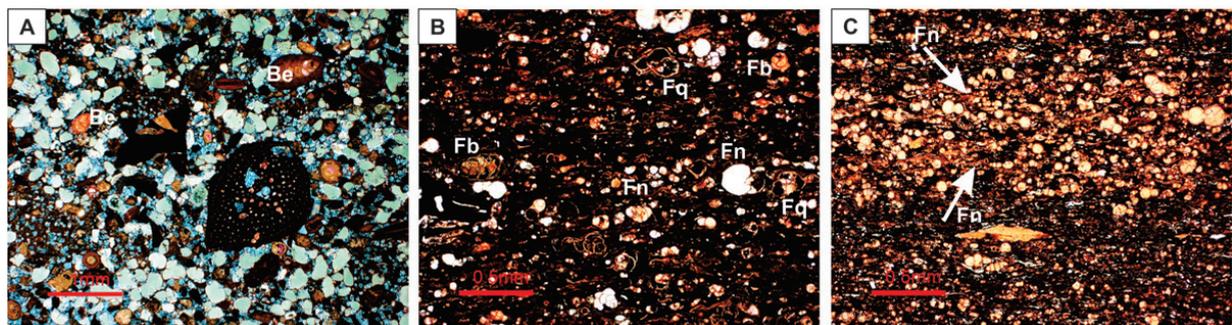


FIGURA 8. Secciones delgadas ilustrativas y microfósiles de la Formación La Luna en el pozo ECOPETROL-1. **A.** Muestra 2354,6 m. Posible Miembro Tres Esquinas. Nótese la presencia común de la glauconita y del foraminífero bentónico *Bolivina explicata* (Be). **B.** Muestra 2376,2 m. Parte superior de la Formación La Luna. Nótese la acumulación masiva de foraminíferos planctónicos quillados (Fq) y no quillados (Fn) junto con foraminíferos bentónicos infaunales (Fb). **C.** Muestra 2403,3 m. Parte media de la Formación La Luna. Nótese la acumulación masiva de foraminíferos planctónicos y la ausencia de formas bentónicas.

Las asociaciones de foraminíferos bentónicos encontradas en las muestras de la Formación Colón, indican un cambio hacia condiciones de plataforma interna, particularmente por la presencia y abundancia de rotálidos (*Anomalina*, *Cibicides*, *Gyroldinoides*, *Lenticulina* entre otros), formas uniseriales y multiseriales alargadas (*Siphogenerinoides*, *Nodosaria*, *Fronicularia*), al igual que formas aglutinadas de distinta morfología (*Haplophragmoides*, *Spiroplectammina*). Para el caso de las formas planctónicas la presencia de géneros como *Archaeoglobigerina*, *Rugoglobigerina* y *Laeviheterohelix* entre otros, ha sido relacionada con entornos neríticos medios en sucesiones del Campaniano-Maastrichtiano de Trinidad y Brasil (Kugler y Bolli, 1967; Koutsoukos y Merrick, 1986; Koutsoukos y Hart, 1990). A su vez, la predominancia de organismos bentónicos con conchillas calcáreas y aglutinadas está relacionado con sedimentos depositados en la plataforma media e interna según análogos modernos (Murray, 2006). Igualmente, la riqueza de las asociaciones, la variedad en los morfogrupos de los bentónicos encontrados (planoespirales, trocoespirales, uniseriales alargados) y una mayor proporción de las formas con hábitos de vida epifaunal, estaría relacionado con condiciones de buena a moderada oxigenación en los sedimentos de fondo (FIGURA 8).

Estudios en asociaciones de foraminíferos modernos (Corliss y Chen, 1988; Murray, 2006; Jorissen *et al.*, 2007) proponen que una proporción predominante de las formas epifaunales está relacionada con condiciones oligotróficas a mesotróficas en las masas de agua y por ende, un empobrecimiento moderado a leve en el oxígeno disuelto dentro de los sedimentos de fondo (Jorissen *et al.*, 2007). No obstante, hay que tener presente que no se conoce hasta qué punto las asociaciones previas al Neógeno tenían comportamientos análogos a las actuales (Thomas *et al.*, 2000). Asociaciones de foraminíferos bentónicos con interpretaciones de plataforma media y moderada oxigenación no solamente han sido reportadas para la coetánea Formación Molino (Martínez, 1989), sino que han sido sugeridas para distintas sucesiones del Campaniano-Maastrichtiano en otras cuencas de Colombia (VSM; Martínez, 2003; Guerrero *et al.*, 2000).

Si bien las muestras analizadas para la Formación Colón corresponden a ripios de perforación, el tipo de litología presente es homogéneo, principalmente margas y arcillolitas, soportando la interpretación de una plataforma media para el ambiente de depositación. Variaciones menores tanto en las proporciones de las formas infaunales y epifaunales como los valores del COT no estarían condicionados por el ambiente de

sedimentación, sino por fluctuaciones locales en el nivel del mar y la paleoproductividad (Martínez, 1989).

El contacto de las formaciones La Luna-Colón en la Cuenca del Catatumbo

Basados en la información discutida en bioestratigrafía y las inferencias paleoambientales, se hace evidente que existe un contraste en las asociaciones de foraminíferos entre el Colón basal y la Formación La Luna del pozo ECOPETROL-1. La variación en la calidad de preservación de las formas (planctónicas y bentónicas), independiente del posible efecto tafonómico por la litología, y las proporciones de las formas de hábito de vida infaunal encontradas, también apoyan esta noción. Cabe mencionar que de acuerdo a los registros eléctricos del pozo ECOPETROL-1 el contacto La Luna-Colón se propone en 2359,2 m. Sin embargo, la muestra 2368,3 m contiene aún especímenes característicos de la Formación Colón. Por ende, el contacto La Luna-Colón estaría ubicado en realidad a esa profundidad según las asociaciones de foraminíferos.

En un sentido regional, el contraste en las asociaciones de foraminíferos encontrados en el pozo ECOPETROL-1 y otros pozos previos soportaría la propuesta previa de una discordancia para el contacto La Luna-Colón en la región del Catatumbo (Sutton, 1946; Cooney y Lorente, 2009). En la medida que se ha venido aclarando el rango cronoestratigráfico de la Formación Colón/Molino, también lo ha hecho el de la discordancia propuesta. Inicialmente se le asignaba una edad comprendida entre el Campaniano y Maastrichtiano, planteando que el intervalo de tiempo faltante correspondía al Santoniano (Sutton, 1946). Esto, basado en las asociaciones de foraminíferos y las amonitas encontradas en la Formación Colón (Cushman y Hedberg, 1930, 1941; Notestein *et al.*, 1944; Sutton, 1946). Sin embargo, el estudio detallado de las asociaciones de foraminíferos planctónicos mostró que al menos para la Formación Molino (sección Río Molino) la sucesión que suprayace a la Formación La Luna sería de edad Campaniano tardío-Maastrichtiano temprano (Martínez, 1989). Estudios palinológicos efectuados sobre la sección de Río Molino, coinciden con esa interpretación de edad (Yepes, 2001).

En el caso de los análisis de las asociaciones efectuados tanto en el pozo ECOPETROL-1 como en otros pozos en la Cuenca del Catatumbo, una interpretación de edad similar a la de Martínez (1989) viene siendo propuesta para la Formación Colón, sugiriendo entonces que el faltante de tiempo podría corresponder al Campaniano temprano. Esto,

soportado por el hecho de que los microfósiles encontrados en el tope de la Formación La Luna tanto en el pozo ECOPETROL-1 como en otros pozos de la cuenca, no sugieren una edad más joven que el Santoniano. A su vez, estudios micropaleontológicos sobre el tope de la Formación La Luna en Venezuela plantean una edad de Campaniano para el contacto con la Formación Colón/Molino, sugiriendo entonces que el hiato propuesto para la región del Maracaibo comprendería parte del Campaniano temprano al Campaniano tardío (Sellier de Civrieux, 1952; De Romero y Galea-Alvarez, 1995; Parra, *et al.*, 2003).

Se ha planteado que para el Campaniano temprano eventos tectónicos asociados a la interacción de las placas de Suramérica, Pacífica y Proto-Caribe causaron que la Cuenca de Maracaibo pasara de ser un margen pasivo a uno activo (Cooney y Lorente, 2009). Dicha discordancia ha sido utilizada en la industria como un límite de tectono-secuencia, si bien se estima que la edad de la parte más basal de la Formación Colón así como el tope de la Formación La Luna podrían ser diacrónicos en un sentido oriente-occidente (De Romero y Galea-Alvarez, 1995; Lugo y Mann, 1995; Villamil y Pindell, 1998; Parra *et al.*, 2003; Castillo y Mann, 2006). Estudios bioestratigráficos de alta resolución dentro de la Cuenca del Catatumbo permitirían definir el carácter diacrónico de esta discordancia.

CONCLUSIONES

Una serie de aspectos bioestratigráficos y paleoambientales fueron definidos a partir del estudio de las asociaciones de foraminíferos planctónicos y bentónicos del pozo ECOPETROL-1:

1. Formas diagnósticas de edad como *Whiteinella*, *Anomalina redmondi* y *Bolivina explicata* fueron encontrados en la parte superior de la Formación La Luna. Basadas en estas, una edad general de Coniaciano-Santoniano es sugerida.
2. Una edad de Campaniano tardío a Maastrichtiano es propuesta para el intervalo correspondiente a la Formación Colón. Foraminíferos planctónicos y bentónicos característicos de la parte basal de Colón (Miembro Socuy) como *Archaeoglobigerina*, *Globotruncana aegyptiaca*, *Rugoglobigerina*, *Pseudotextularia*, *Haplophragmoides excavata*, *Siphogenerinoides parva* y *Pullenia cretacea*, fueron encontradas.
3. Para la Formación La Luna, una baja riqueza de las asociaciones y el predominio de las formas

planctónicas y bentónicas infaunales, junto con los valores altos de carbono orgánico total, sugieren condiciones de plataforma externa, al igual que eutrofismo en las aguas superficiales y una baja oxigenación en los sedimentos de fondo.

4. En contraste, para la suprayacente Formación Colón, se observa un cambio en las condiciones paleoambientales. Condiciones oligotróficas a mesotróficas de las aguas superficiales y una moderada a buena oxigenación de los sedimentos dentro de un entorno de plataforma interna son sugeridas. Una mayor riqueza en las asociaciones de foraminíferos bentónicos, así como el predominio de las formas bentónicas (principalmente epifaunales) sobre las planctónicas sugieren esta interpretación.
5. En el pozo ECOPETROL-1, al igual que en otros pozos de la cuenca, no se ha observado una transición entre las dos interpretaciones paleoambientales y bioestratigráficas para el contacto La Luna-Colón. En cambio, se trata de un cambio abrupto, sugiriendo un contacto discordante entre las dos unidades, en afinidad con trabajos previos en la cuenca.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Colombiano del Petróleo (ICP-ECOPETROL S.A.) se agradece los permisos para publicar los resultados de este trabajo. Diego Gómez (Stratos Consultoría Geológica) colaboró en la obtención de las imágenes de los ejemplares. Dos revisores aportaron comentarios y sugerencias para mejorar el manuscrito original.

Esta contribución desea rendir homenaje a José Ignacio Martínez†; mentor, amigo, y apasionado investigador de los foraminíferos y la paleoceanografía del Cretácico y el Holoceno en Colombia.

REFERENCIAS

- Ayala, R., Carrillo, J., y Macsotay, O. 2016. Invertebrados del Cretácico Superior de la Formación Colón (Campaniense-Maastrichtiense), Andes de Venezuela. *Acta Científica Venezolana*, 67(2):48-68.
- Ayala-Calvo, R.C., Bayona-Chaparro, G.A., Ojeda-Marulanda, C., Cardona, A., Valencia, V., Padrón, C.E., Yoris, F., Mesa-Salamanca, J., y García, A. 2009. Estratigrafía y procedencia de las unidades comprendidas entre el Campaniano y el Paleógeno en la subcuenca de Cesar: aportes a la evolución tectónica del área. *Geología Colombiana*, 34: 3-33.

- Bolli, H.M., Beckmann, J.P., and Saunders, J.B. 1994. Benthic foraminiferal biostratigraphy of the South Caribbean region. Cambridge University Press. Cambridge, 411p.
- Bürgl, H., y Dumit, Y. 1954. El Cretáceo Superior en la región de Girardot. Boletín Geológico, 2: 23-48.
- Caron, M. 1985. Cretaceous planktic foraminifera. In: Bolli, H.M., Saunders, J., and Perch-Nielsen, K. (Eds.). Plankton Stratigraphy. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 17-86.
- Castillo, M.V., and Mann, P. 2006. Cretaceous to Holocene structural and stratigraphic development in south Lake Maracaibo, Venezuela, inferred from well and three-dimensional seismic data. AAPG Bulletin, 90(4): 529-565.
- Clavijo, J. 1994. Mapa geológico generalizado del Departamento de Norte de Santander. Escala 1:250.00. Memoria Explicativa. Bucaramanga: INGEOMINAS.
- Cooney, P.M., and Lorente, M.A. 2009. A structuring event of Campanian age in western Venezuela, interpreted from seismic and paleontological data. Geological Society Special Publications, 328: 687-703.
- Corliss, B.H., and Chen, C. 1988. Morphotype patterns of Norwegian Sea deep-sea benthic foraminifera and ecological implications. Geology, 16(8): 716-719.
- Cushman, J.A., and Hedberg, H.D. 1930. Notes on some foraminifera from Venezuela and Colombia. Contributions from the Cushman Laboratory for Foraminiferal Research, 6: 64-69.
- Cushman, J.A., and Hedberg, H.D. 1941. Upper Cretaceous foraminifera from Santander del Norte, Colombia. Contributions from the Cushman Laboratory for Foraminiferal Research, 17: 79-100.
- De Romero, L.M., and Galea-Alvarez, F.A. 1995. Campanian *Bolivinooides* and microfacies from Luna Formation, western Venezuela. Marine Micropaleontology, 26(1-4): 385-404.
- Dubicka, Z., and Peryt, D. 2016. *Bolivinooides* (Benthic foraminifera) from the Upper Cretaceous of Poland and western Ukraine: Taxonomy, evolutionary changes and stratigraphic significance. Journal of Foraminiferal Research, 46(1): 75-94.
- Erlich, R.N., Macsotay, O., Nederbragt, A.J., Palmer-Koleman, S.E., and Lorente, M.A. 1999. Paleogeology, paleogeography, and depositional environments of the Upper Cretaceous rocks of Western Venezuela. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 153(1-4): 203-238.
- Frizzell, D.L. 1954. Handbook of Cretaceous Foraminifera of Texas. University of Texas Press. Austin, 232p.
- Gandolfi, R. 1955. The genus *Globotruncana* in northeastern Colombia. Bulletin of American Paleontology, 30(155): 1-20.
- Georgescu, M.D. 2005. On the systematics of rugoglobigerinids (planktonic foraminifera, late Cretaceous). Studia Geologica Polonica, 124: 87-97.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D., and Ogg, G.M. 2012. The geologic time scale 2012. Elsevier. Amsterdam, 1176p.
- Guerrero, J., Sarmiento, G., and Navarrete, R.E. 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. Geología Colombiana, 25: 45-110.
- Hammer, O., Harper, D.A.T., and Ryan, P.D. 2001. PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. Palaeontologia Electronica, 4(1): 1-9.
- Hayek, L.A.C., and Buzas, M.A. 1997. Surveying natural populations. Columbia University Press. Nueva York, 562p.
- Hedberg, H.D., and Sass, L.C. 1937. Synopsis of the geologic formations of the western part of the Maracaibo Basin, Venezuela. Boletín de Geología y Minas (Venezuela), 1(2-4): 73-112.
- Jorissen, F.J., De Stigter H.C., and Widmark, J.G.V. 1995. A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats. Marine Micropaleontology, 26(1-4): 3-15.
- Jorissen, F.J., Fontanier, C., and Thomas, E. 2007. Paleooceanographical indicators based on deep-sea benthic foraminiferal assemblage characteristics. Developments in Marine Geology, 1: 263-325.

- Julivert, M. 1968. Lexique stratigraphique international. Vol 5. Amérique Latine, Fasc. 4a Colombie. Paris, 651p.
- Kehrer, L. 1937. Some observations on Cretaceous and Pre-cretaceous beds in the south western and northern-central parts of Venezuela. *Boletín de Geología y Minas (Venezuela)*, 1(2-4): 47-70.
- Koutsoukos, E.A.M, and Merrick, K.A. 1986. Foraminiferal paleoenvironments from the Barremian to Maastrichtian of Trinidad, West Indies. I Geological Conference of the Geological Society of Trinidad & Tobago, pp. 85-101.
- Koutsoukos, E.A.M., and Hart, M.B. 1990. Cretaceous foraminiferal morphogroup distribution patterns, paleocommunities and trophic structures: A case study from the Sergipe Basin, Brazil. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, 81: 221-246.
- Koutsoukos, E.A.M. 1992. Late aptian to maastrichtian foraminiferal biogeography and palaeoceanography of the Sergipe Basin, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 92(3-4): 295-324.
- Kugler, H.G., and Bolli, H.M. 1967. Cretaceous biostratigraphy in Trinidad. *Boletín Informativo, Asociación Venezolana de Geología, Minería y Petróleos*, 10: 209-236.
- Loeblich, A.R. Jr., and Tappan, H. 1988. Foraminiferal genera and their classification. Van Nostrand Reinhold. New York, 970p.
- Loeblich, A.R. Jr., Tappan, H., Beckmann, J.P., Bolli, H.M., Montarano G.E., and Troelsen, J. 1957. Studies in Foraminifera. Smithsonian Institution. Washington D.C., 323p.
- Lugo, J., and Mann, P. 1995. Jurassic–Eocene tectonic evolution of Maracaibo basin, Venezuela. *AAPG Memoir*, 62: 699-725.
- Magurran, A.E. 2004. *Measuring Biological Diversity*. Blackwell Publishers. Oxford, 260p.
- Mann, P., Escalona, A., and Castillo, M.V. 2006. Regional geologic and tectonic setting of the Maracaibo supergiant basin, western Venezuela. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 90(4): 445-477.
- Martínez, R. J.I. 1989. Foraminiferal biostratigraphy and paleoenvironments of the Maastrichtian Colon mudstones of Northern South America. *Micropaleontology*, 35(2): 97-113.
- Martínez, J.I. 2003. The Paleocology of late Cretaceous upwelling events from the Upper Magdalena Basin, Colombia. *Palaios*, 18(4-5): 305-320.
- Martínez, J.I., and Hernández, R. 1992. Evolution and drowning of the late cretaceous Venezuelan carbonate platform. *Journal of South American Earth Sciences*, 5(2): 197-210.
- Murray, J.W. 2006. *Ecology and applications of benthic foraminifera*. Cambridge University Press. Cambridge, 426p.
- Nederbragt, A. 1991. Late Cretaceous biostratigraphy and development of Heterohelicidae (planktic foraminifera). *Micropaleontology*, 37(4): 329-372.
- Notestein, F., Hubman, C., and Bowler, J. 1944. Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America. *Bulletin of the Geological Society of America*, 55(10): 1165-1216.
- Parra, M., Moscardelli, L., and Lorente, M.A. 2003. Late Cretaceous anoxia and lateral microfacies changes in the Tres Esquinas Member, La Luna Formation, Western Venezuela. *Palaios*, 18: 321-333.
- Pedraza, P., and Ramírez, Y. 2011. Catatumbo Basin. ANH-Fondo Editorial Universidad EAFIT, Medellín, 135p.
- Petters, V. 1955. Development of Upper Cretaceous foraminiferal faunas in Colombia. *Journal of Paleontology*, 29(2): 212-225.
- Premoli Silva, I., and Verga, D. 2011. *Practical manual of Cretaceous planktonic foraminifera*. New Editing by Marie Rose Petrizzo and Isabella Premoli Silva. International School on Planktonic Foraminifera 3rd Course: Cretaceous Planktonic Foraminifera. Perugia, 1-265.
- Renz, O. 1959. Estratigrafía del Cretáceo en Venezuela occidental. *Boletín de Geología (Venezuela)*, 5(10): 3-48.
- Sellier de Civrieux, J.M. 1952. Estudio de la microfauna de la sección-tipo del Miembro Socuy de la Formación

- Colón, Distrito Mara, Estado Zulia. *Boletín de Geología y Minas (Venezuela)*, 2(5): 231-310.
- Shannon, C.E. 1948. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27: 379-423.
- Sohn, I.G. 1961. Techniques for preparation and study of fossil ostracodes. In: Moore, R. (Ed.). *Treatise on Invertebrate Paleontology, part Q, Arthropod 3. Crustacea Ostracoda*. Geological Society of America and University of Kansas Press. pp: Q63-Q70.
- Sutton, F.A. 1946. Geology of Maracaibo basin, Venezuela. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 30(10): 1621-1739.
- Talukdar, S., and Marcano, F. 1994. Petroleum System of the Maracaibo Basin, Venezuela. The petroleum system-from source to trap: American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Memoir, 60: 463-481.
- Tchegliakova, N., and Mojica, J. 2001. El Senoniano de la barrera de Girardot-Guataquí, Valle Alto del Magdalena, Colombia: Precisiones sobre la estratigrafía y establecimiento de una zonación micropaleontológica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 25(94): 37-75.
- Thomas, E., Zachos, J.C., and Bralower, T.J. 2000. Deep-sea environments on a warm Earth: latest Paleocene-early Eocene. In: Huber, B., MacLeod, K., and Wing, S. (Eds.). *Warm climates in Earth History*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 132-160.
- Vergara, L. 1994. Stratigraphic, micropaleontologic and organic geochemical relation in the Cretaceous of the Upper Magdalena Valley, Colombia. *Giessener Geologische Schriften*, 50. Giessen, 179p.
- Villamil, T., and Arango, C. 1998. Integrated stratigraphy of latest Cenomanian and early Turonian facies of Colombia. In: Pindell, J., and Drake, C. (Eds.). *Paleogeographic evolution and non-glacial eustacy, Northern South American*. SEPM Special Publication 58. Tulsa, pp. 129-159.
- Villamil, T., Arango, C., and Hay, W.W. 1999. Plate tectonic paleoceanographic hypothesis for the Cretaceous source rocks and cherts of northern South America. In: Barrera, E., and Johnson, C.C. (Eds.). *Evolution of the Cretaceous Ocean-Climate System*. Geological Society of America, pp. 191-202.
- Villamil, T., and Pindell, J. 1998. Mesozoic paleogeographic evolution of northern South America: Foundations for sequence stratigraphic studies in passive margin strata deposited during non-glacial times. In: Pindell, J., and Drake, C. (Eds.). *Paleogeographic evolution and non-glacial eustacy, Northern South America*. SEPM Special Publication 58. Tulsa, pp. 238-318.
- Yepes, O. 2001. Maastrichtian/Danian dinoflagellate cyst biostratigraphy and biogeography from two equatorial sections in Colombia and Venezuela. *Palynology*, 25: 217-249.

Trabajo recibido: mayo 09 de 2017
Trabajo aceptado: agosto 04 de 2017