



Esquema estratigráfico de secuencias del registro sedimentario del Cinturón Plegado de San Jacinto, Caribe colombiano

Hermann Darío Bermúdez, Grupo de Investigación Paleoexplorer.

Resumen

A partir de información estratigráfica, paleoambiental y paleontológica recientemente adquirida de la secuencia sedimentaria del Cinturón Plegado de San Jacinto (CPSJ), se plantea un marco geológico, de tendencias depositacionales y de estratigrafía de secuencias, para esta área del Caribe colombiano, que facilita y favorece la correlación regional y la prospección de hidrocarburos.

Tomando secciones estratigráficas claves del Cretácico tardío y Cenozoico del CPSJ, se reconocen y correlacionan superficies estratigráficas secuenciales que representan cambios en las tendencias depositacionales, asociadas a ciclos transgresivo-regresivos (T-R) y a unidades estratigráficas genéticas limitadas por dichas superficies.

Facies marinas transgresivas (TST) del Cretácico superior (Formación Cansona) y Paleógeno inferior (formaciones San Cayetano, Arroyo Seco, Luruaco y equivalentes) representan sellos regionales y potencial roca fuente para hidrocarburos líquidos; mientras que, en sectores proximales, lodolitas de paleoambientes deltaicos son favorables para la generación de gas. Situación similar se presenta en las lodolitas neógenas de las formaciones El Floral, Carmen, Las Perdices, Porquera y equivalentes, que sirven de sello a reservorios oligocenos y son favorables a la generación de gas.

Los reservorios potenciales se desarrollan durante etapas regresivas (RST), que permiten la progradación de la línea de costa y los sistemas deltaicos, e incluyen arenitas y conglomerados de paleoambientes deltaicos y costeros del Paleoceno-Eoceno tardío (formaciones San Cayetano, Arroyo Seco, Luruaco y equivalentes), arenitas fosilíferas y calizas tipo rudstone de Eoceno tardío-Oligoceno (formaciones San Jacinto, Tolviejo, Arroyo de Piedra, Molinero y equivalentes) e incluso en arenitas de shoreface del Mioceno tardío y Plioceno (formaciones Tubará, Rancho, El Cerrito y equivalentes).

Introducción

El registro sedimentario aflorante en el CPSJ involucra una compleja sucesión de rocas del Cretácico tardío y Cenozoico, que se ha agrupado en una confusa y numerosa serie de unidades litoestratigráficas.

En general, estas unidades son simples representaciones de variaciones laterales de facies, lo que ha generado un escenario estratigráfico extremadamente confuso, que no ha permitido un cabal entendimiento de la estratigrafía y evolución geológica del área.

El presente estudio constituye un aporte del Grupo de Investigación Paleoexplorer, enmarcado dentro del Proyecto “Estratigrafía y Paleontología del Caribe colombiano”, que pretenden promover el avance del conocimiento geológico y paleontológico del país. Con el presente trabajo, aun en desarrollo, se adquiere nueva información de campo y se realiza una revisión y evaluación de la información disponible, para proponer un marco estratigráfico de correlación regional, paleoambientes, secuencias estratigráficas y un modelo evolutivo del CPSJ.

Los modelos de ambientes de depósito de las sucesiones estratigráficas presentes en el CPSJ publicados en fechas recientes y apoyados por una creciente adquisición de nueva información de superficie (que incluye la descripción detallada de columnas de campo y por primera vez en más de 50 años la colecta y estudio paleontológico de los restos de microfósiles de nuevas localidades) y de subsuelo (ATG Ltda – ANH, 2008; Universidad de Caldas – ANH, 2008, 2009; Bermúdez et al. 2009; Pineda-Salgado *et al.* 2013, Bermúdez *et al.* 2013; Alfaro and Holz, 2014; Vega y Bermúdez, 2015; Bermúdez, 2015) retoman la idea de los geólogos y paleontólogos de moluscos de la primera mitad del siglo pasado (Pilsbry and Brown, 1917; Anderson, 1927, 1928, 1929; Weisbord, 1929; Butler, 1942; Clark and Durham, 1946; Barrios, 1960; Adegoke, 1967), que sugerían que en el CPSJ la sedimentación tuvo lugar en paleoambientes marinos someros, deltaicos y de zonas pantanosas; conclusiones que sin embargo fueron descartadas y pasadas por alto por la mayoría de los trabajos realizados posteriormente.

Por el contrario mucha de la cartografía y literatura geológica publicada (Duque-Caro, 1969, 1972, 1973, 1978, 1979, 1980, 1984; Caro, 2003; Clavijo *et al.* 1998; Clavijo *et al.* 2001; Guzmán *et al.* 2004; Guzmán, 2007, entre otros) y los reportes de las operadoras petroleras y el Servicio geológico Colombiano (ESRI-ILEX. 1995; ICP-GOX, 2001a-b; Luna *et al.* 2001, entre otros) han coincidido en afirmar que es clara la presencia de sistemas depositacionales de ambientes marinos de aguas profundas, que incluso alcanzan paleo-profundidades de hasta 4000 m de columna de agua (Duque-Caro, 1980, 2001), en especial en las rocas del Paleógeno, tomando como fundamento principal modelos paleoambientales basados en foraminíferos.

Las tendencias de variaciones de tamaño de grano, así como la sucesión de paleoambientes de depósito y los resultantes patrones de somerización – profundización; permiten a su vez definir un esquema estratigráfico de secuencias, con ciclos transgresivo – regresivos, *sensu* Embry (2009), que registran ascensos y caídas relativas del nivel del mar y el desarrollo de discordancias regionales asociadas a rompimientos del ciclo sedimentario. Estas tendencias depositacionales son claves en el entendimiento de la dinámica de la sedimentación en la cuenca, primordialmente debido al pobre conocimiento de la estratigrafía del área.

El empleo de ciclos T-R y la correlación de discordancias, permite postular la existencia de unidades de carácter regional, que marcan tendencias depositacionales, las cuales funcionan a nivel de cuenca, sin tener relación directa con las litologías o paleoambientes de depósito y permiten correlacionar de una mejor manera los depósitos preservados en el subsuelo (corazones, registros, sísmica) o en superficie.

Materiales y métodos.

Numerosas columnas fueron descritas a detalle y muestreadas de marea sistemática en comisiones de campo realizadas durante los últimos 7 años, que se complementan con datos obtenidos de los análisis de pozo, publicados por la Agencia Nacional de Hidrocarburos, ANH.

Los datos bioestratigráficos que soportan las dataciones y apoyan el análisis paleoambiental incluyen foraminíferos y nanoplancton calcáreo, palinología y macro-paleontología de moluscos y crustáceos. El análisis estratigráfico de secuencias se desarrolla de acuerdo al modelo de ciclos T-R de Embry (2009).

Localización y marco geológico regional

La información aquí presentada, así como la mayoría de la que está publicada se refiere a localidades ubicadas en los anticlinorios de San Jacinto y Luruaco, en la parte norte del CPSJ, pues es allí donde afloran más extensamente las unidades litoestratigráficas involucradas (Figura 1).

Estratigrafía

Tomando como base el análisis estratigráfico y la información paleontológica y bioestratigráfica de este y otros trabajos, entre otros) se plantea un marco estratigráfico de correlación regional, que enmarca la confusa nomenclatura utilizada en el área y sirve de base para el análisis de ciclos T-R, los cuales ilustran tendencias depositacionales y superficies estratigráficas secuenciales, que separan cintas de facies de Transgressive Systems Tract (TST) y Regressive Systems Tract (RST), que puede dividirse en 6 secuencias (además del Plio-Pleistoceno, no descrito aquí), tal como se plantea en la Figura 2.

El registro sedimentario inicia con secuencias marinas del Cretácico tardío, suprayacidas por una espesa serie de rocas del Cenozoico, con numerosos horizontes fosilíferos, que incluyen principalmente moluscos, crustáceos, poliquetos, equinodermos, foraminíferos y restos de peces.

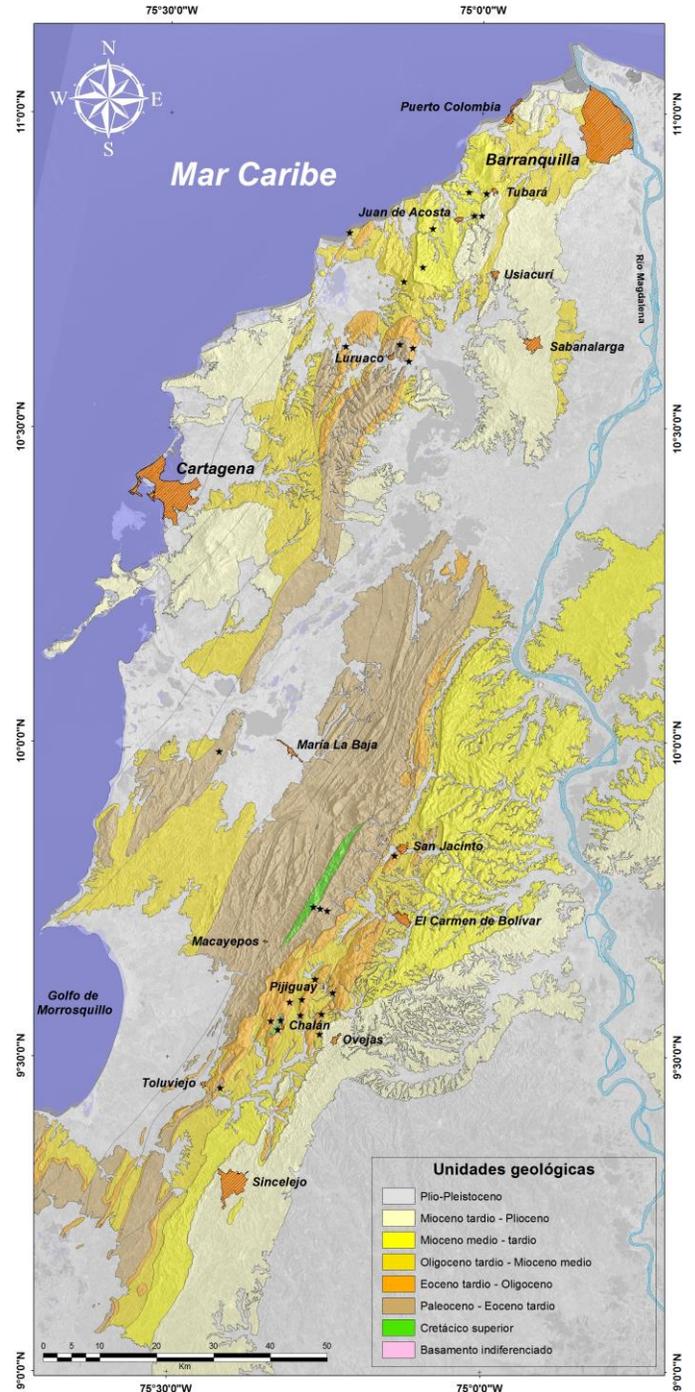


Figura 1. Localización del área de estudio (extremo norte del CPSJ, entre los anticlinorios de San Jacinto, al sur y Luruaco, al norte, entre las ciudades de Cartagena y Barranquilla), incluyendo la ubicación de las localidades mencionadas en el texto (estrellas negras).

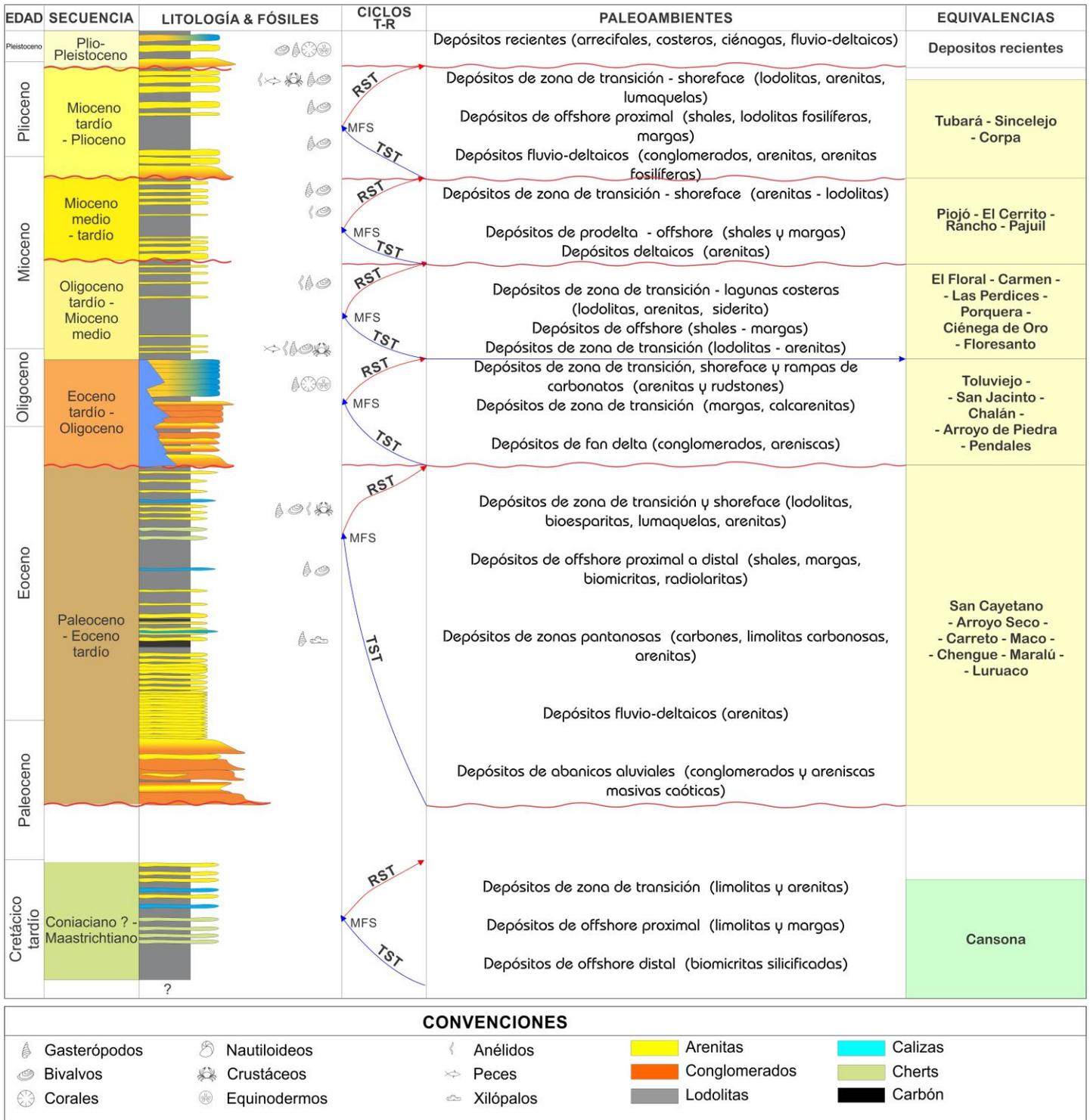


Figura 2. Columna estratigráfica generalizada, construida a partir de la compilación de secciones de campo y pozo, ilustrando los ciclos T-R y los paleoambientes de depósito reconocidos en el área norte del CPSJ.

Secuencia Coniaciano? - Maastrichtiano.

Litoestratigrafía. Las rocas más antiguas que afloran en el área (de las cuales no se conoce la base), corresponden al Coniaciano - Maastrichtiano, representado por la Formación Cansona la cual está constituida por shales, margas, cherts y calizas micríticas de color gris oscuro a negro, dispuestas en capas tabulares delgadas a medias (Figura 3), que hacia la parte alta de la unidad permiten el desarrollo de capas de arenisca, progresivamente más potentes, en una clara secuencia grano-creciente.



Figura 3. Principales facies del Cretácico superior en el CPSJ (Formación Cansona). A y B) Porcelanitas y cherts con interposición de capas de bentonita de la parte media de la unidad en el cerro Cansona, sobre la vía El Carmen de Bolívar – Macayepo. C) Capas delgadas de chert de la parte alta de la unidad en el arroyo El Salto, Chalán, Sucre. D) Margas y limolitas fosilíferas de parte alta de la unidad en la sección del arroyo El Salto. E) Margas en el arroyo Peñitas, entre Chalán y La Ceiba, Sucre. F) Margas y shales de la parte alta de la unidad en el Cerro Cansona. G) Areniscas y lodolitas de la parte alta de la unidad en la sección de Cerro Cansona. H) Contacto discordante entre las intercalaciones de arenitas y lodolitas cretácicas con los conglomerados de la Formación San Cayetano (Paleoceno - Eoceno) en el Cerro Cansona.

Paleontología y edad. En el sector de Chalán, Sucre, a partir de palinología, foraminíferos y nanoplancton calcáreo, las rocas allí aflorantes se dataron como Campaniano – Maastrichtiano (Universidad de Caldas - ANH, 2009; Bermúdez *et al.* 2009; Dueñas y Gómez, 2013), pero se tienen

datos que sugieren que la edad de la Formación Cansona puede extenderse hasta el Santoniano (Guzmán *et al.* 2004) e incluso el Coniaciano (Duque-Caro, 1973), según determinaciones bioestratigráficas con ammonites colectados en el sector de Cerro Cansona, Bolívar, donde la secuencia expuesta es más espesa.

Paleoambientes de depósito. Las facies observadas, esencialmente lúlicas, pero progresivamente más someras, indican que lo que una vez se pensó correspondía a depósitos de paleoambientes profundos (batiales, según Guzmán, 2007, siguiendo el modelo clásico que plantearon muchos trabajos de Duque-Caro y los operadoras petroleras), parece en realidad incluir varios ciclos transgresivo–regresivos con segmentos acumulados en paleoambientes marinos, relativamente someros de *offshore* y zona de transición, que hacia el techo de la unidad, en el sector de Cerro Cansona, permiten la acumulación de areniscas con estratificación cruzada *hummocky* (Figura 3, G-H), lo que implica acción de las tormentas y una línea de costa no muy lejana.

Estratigrafía de secuencias. Aunque de la base del ciclo no se conocen afloramientos, los depósitos de *offshore* del TST están bien expuestos en el sector de Cerro Cansona, Bolívar, donde dan lugar a estratos progresivamente más someros (*offshore* - zona de transición) del RST también visibles en Chalán, Sucre.

Secuencia Paleoceno tardío - Eoceno tardío.

Litoestratigrafía. En forma discordante, sobre las rocas de la Formación Cansona, se desarrolló un conjunto de gravas, arenas y lodos, que registran un periodo de levantamiento tectónico, con alto aporte de sedimento y descenso relativo del nivel del mar, que incluso generó intensa erosión en el área (los datos bioestratigráficos revelan la ausencia del Paleoceno temprano), dando lugar a los depósitos de las formaciones Arroyo Seco, San Cayetano, Maco, Carreto, Chengue y equivalentes.

La base del Paleógeno en el Anticlinorio de San Jacinto, está constituida por conglomerados gruesos y litoarenitas que incluso pueden incluir, en el núcleo del anticlinal de Chalán, clastos, tamaño bloque (de hasta 3 m de diámetro) de granitos y neises (ATG Ltda – ANH, 2008). Estos niveles inferiores están bien expuestos en Chalán y al W de El Carmen de Bolívar (Figura 4, A-C) y son sucedidos por sucesiones arenosas con intercalaciones de lodolitas moteadas y carbonosas (Figura 4, D-E), donde se han identificado niveles fosilíferos de gasterópodos de agua dulce (Figura 5, A-D) asociados a limolitas carbonosas y carbones (Anderson, 1928; Butler, 1942; Clark and Durham, 1946; Bermúdez *et al.* 2013; Bermúdez, 2015).

La parte media-alta de la unidad muestra el desarrollo de facies de arenitas y lodolitas de color oscuro, así como, localmente, algunos niveles de radiolaritas en secciones

distales (Figura 4, F-G). Estas rocas contienen numerosos horizontes de acumulaciones mecánicas de restos fósiles (Figura 5, E-P), muy extendidos entre Chalán, Sucre y San Jacinto, Bolívar, con abundantes ejemplares (cientos de especies) de bivalvos, gasterópodos y escafópodos, además de equinodermos, corales, crustáceos y anélidos poliquetos (Anderson, 1928; Butler, 1942; Clark and Durham, 1946; Adegoke, 1967; Bermúdez *et al.* 2009; Bermúdez *et al.* 2013; Bermúdez, 2015). Por su parte el segmento superior de la unidad muestra un progresivo aumento de las facies arenosas, aunque aún predominan las lodolitas y margas, tal como se aprecia muy bien en el arroyo Seco, al este de Tolviejo, Sucre (Figura 4, H).

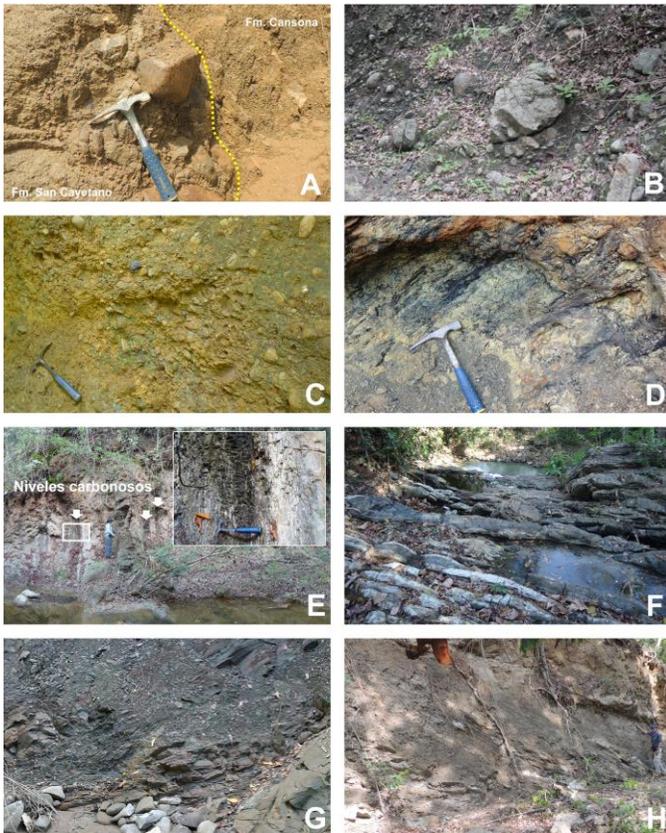


Figura 4. Principales facies del Paleógeno inferior en el CPSJ. A) Contacto discordante entre los conglomerados de la Formación San Cayetano y los shales de la Formación Cansona, en la vía El Carmen de Bolívar – Macayepo. B) Conglomerados de la Formación Arroyo Seco al E de Tolviejo, Sucre. C) Niveles caóticos de conglomerados de la base de la Formación Arroyo Seco en el arroyo El Salto, Chalán, Sucre. D) Limolitas y carbones de la parte baja de la Formación Arroyo Seco en el arroyo El Salto, Chalán. E) Intercalación de arenitas líticas, lodolitas y lentes de carbón sobre el Arroyo Mancomoján, Pijguay, Bolívar. F) Capas onduladas de radiolaritas hacia la parte media-alta de la Formación San Cayetano al W de María La Baja, Bolívar. G) Shales de la parte media-alta de la Formación Luruaco en el Arroyo El Limón, al W de Arroyo de Piedra, Atlántico. H) Secuencias grano-crecientes de margas a litoarenitas en la parte alta de la Formación Arroyo Seco, al E de Tolviejo, Sucre.

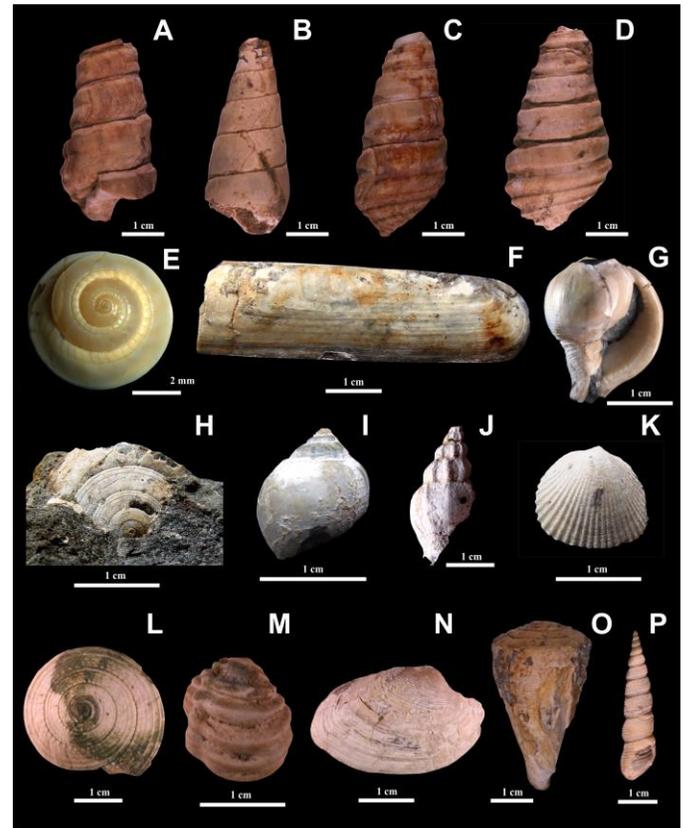


Figura 5. Algunos moluscos del Paleógeno temprano en el CPSJ. A) *Faunus* sp. B) *Pachytilus cansoasensis* Olsson 1931. C) *Hannatoma emendorferi* Olsson 1931. D) *Hannatoma gesteri* Hanna and Israelsky 1925. E) *Nemrac carmenensis* Clark 1946. F) *Solena (Eosolen) bolivariensis* Clark 1946. G) *Peruficus olssoni* Clark 1946. H) *Architectonica (Stellaxis) gabrielensis* Clark 1946. I) *Crommium palmerae* Clark 1946. J) *Cantharus (Eocantharus) colombiana* Clark 1946. K) *Glycymeris woodsi* Clark 1946. L) *Solarium nelsoni* M) *Phacoides andersoni* Olsson 1930. N) *Pitaria yasila* Olsson 1930. O) *Conus sauridens chiraensis* Olsson 1930. P) *Turritella galvesia* Olsson 1931. A-D parte baja, L-P parte media - alta de la Formación Arroyo Seco en Chalán, Sucre. E-K, parte media - alta de la Formación Arroyo Seco en Pijguay, Bolívar.

Paleontología y edad. De acuerdo a los datos micropaleontológicos de foraminíferos, nanoplancton calcáreo y palinología de polen y esporas, recientemente adquiridos (ATG Ltda – ANH, 2008; Universidad de Caldas – ANH, 2008, 2009; Bermúdez *et al.* 2009, entre otros), se establece una edad Paleoceno medio – Eoceno tardío (Selandiense - Priaboniense), que incluye las zonas de foraminíferos P3-P16, zonas T02-T07 de Palinología y zonas NP5-NP20 de nanoplancton calcáreo. El abundante material de macroinvertebrados fósiles de la parte media – alta de la secuencia también registra la presencia del Bartonense – Priaboniense (Clark and Durham, 1946; ATG Ltda – ANH, 2008; Bermúdez *et al.* 2013; Vega y Bermúdez, 2015; Bermúdez, 2015).

Paleoambientes de depósito. La escuela “clásica”, que siguen la mayoría de las compañías petroleras y el Servicio

Geológico Colombiano (Duque-Caro, 1980; Guzmán *et al.* 2004, Guzmán, 2007, entre otros) plantea la presencia de turbiditas de aguas profundas para explicar las facies silicilásticas gruesas que representan el Paleógeno temprano en el CPSJ, mientras que los trabajos más recientes se inclinan por los depósitos deltaicos como la fuente de los conglomerados y areniscas que representan el Paleoceno tardío y la mayor parte del Eoceno. En general las relaciones entre las rocas descritas y la paleontología de macro-invertebrados sugieren que este periodo dio lugar, en todo el CPSJ, al desarrollo de cintas de facies de paleoambientes marinos someros, sometidos a las tormentas y de zona litoral, que incluyen deltas, *fan-deltas* y depósitos de playa. La presencia de capas de carbón y moluscos de agua dulce, son claves para demostrar que existían zonas pantanosas que no es posible explicar dentro de modelos de turbiditas, al igual que ocurre con los horizontes lumaquéllicos con moluscos y con los restos de crustáceos, equinodermos y corales, que ciertamente no pudieron depositarse a profundidades de miles de metros ni haber soportado su arrastre por toda la plataforma continental.

Estratigrafía de secuencias. El TST de esta secuencia está muy bien representado por las sucesiones grano-decrecientes de conglomerados fluviales, suprayacidos por lodolitas carbonosas y carbones de ámbitos pantanosos y deltaicos con niveles fosilíferos con gasterópodos de agua dulce, del sector del anticlinal de Chalán, que a su vez dan paso a lutitas con horizontes coquinoides (tormentitas) con restos de moluscos, equinodermos, crustáceos y poliquetos de afinidad marina, comunes entre Toluviejo, Sucre y San Jacinto, Bolívar. El RST muestra depósitos de offshore a prodelta e incluso frente deltaico, bien expuestos en el área de Chalán y en el Cerro Cansona (Figura 2).

Secuencia Eoceno tardío - Oligoceno tardío.

Litoestratigrafía. Esta secuencia agrupa las formaciones Toluviejo, Chalán, Arroyo de Piedra, Pendales, San Jacinto y equivalentes, las cuales se acumulan sobre una discordancia regional, asociada a un fuerte descenso relativo del nivel del mar, que se desarrolló durante el Eoceno tardío y el Oligoceno, acumulando un conjunto de carbonatos bioclásticos, arenas fosilíferas y gravas en todo el CPSJ, (Bermúdez *et al.* 2009, Universidad de Caldas – ANH, 2009).

La mayor parte de los afloramientos de rocas de esta edad corresponden a areniscas y conglomerados, con algunas interposiciones de lodolitas. La Formación San Jacinto, en el Anticlinorio del mismo nombre y la Formación Pendales, al norte, en el Anticlinorio de Luruaco, son ejemplos de estas facies.

La Formación San Jacinto contiene un alto contenido de carbonatos; las areniscas muchas veces están cementadas por calcita y contiene numerosos horizontes fosilíferos en margas, arenitas y calizas tipo wackestone y packstone, especialmente

hacia la parte media y alta de la unidad (Figura 6, D-F) y restos de plantas y facies de conglomerados hacia la base; mientras que la Formación Pendales es un cuerpo potente de conglomerados polimícticos masivos (de grano más grueso en la base) con intercalaciones de areniscas y algunas lutitas (Figura 6, A-C), en las que no se han encontrado fósiles.

La Formación San Jacinto cambia lateralmente de facies (al W y S) a las calizas de la Formación Toluviejo, mientras que la Formación Pendales se interdigita con las calizas de la Formación Arroyo de Piedra, unidad que localmente la suprayace (tal como se aprecia en el sector de Luruaco – Arroyo de Piedra, Atlántico), pues en otros sectores está completamente erodada.

En estas unidades carbonatadas se observan cuerpos de calizas tipo rudstone, grainstone o packstone, en las que abundan los oncolitos y restos de equinodermos y moluscos (Figura 6, G-H), aunque la Formación Arroyo de Piedra presenta en su base conglomerados, areniscas fosilíferas y margas (Figura 6, D), que en el sur se denominan Formación Toluviejo o Chalán, muy bien expuestas en los municipios del mismo nombre y un poco al norte de allí y en el Anticlinorio de Luruaco se denominan Formación Arroyo de Piedra. Estas unidades constan esencialmente de calizas tipo rudstone

Paleontología y edad. De acuerdo a los datos micropaleontológicos de foraminíferos, nanoplancton calcáreo y palinología de polen y esporas, recientemente adquiridos (ATG Ltda – ANH, 2008; Universidad de Caldas – ANH, 2008, 2009; Bermúdez *et al.* 2009, entre otros), se establece una edad Eoceno tardío – Oligoceno (Priabonense - Chattienense), que incluye las zonas de foraminíferos P17-P21, zonas T08-T11 de Palinología y zonas NP21-NP25 de nanoplancton calcáreo.

El abundante material de macro-invertebrados fósiles (Figura 7) incluye restos de bivalvos, ostras, gasterópodos, equinodermos, escafópodos, crustáceos, restos de peces y oncolitos, así como numerosos niveles con macroforaminíferos (*Nummulites* y *Lepidocyclinas*).

Estos fósiles han sido estudiados por diversos autores (Anderson, 1928; Butler, 1942; Clark and Durham, 1946; Adegoke, 1967; Bermúdez *et al.* 2009; Bermúdez *et al.* 2013) y revelan la presencia de fondos de depósito de alta energía, muy someros, bien oxigenados y de aguas cálidas.

Paleoambientes de depósito. La relación observada entre las facies y los macro-invertebrados sugieren que los fondos de depósito variaban entre sistemas deltaicos, cintas de playas y de plataforma de carbonatos, donde se desarrollaban montículos arrecifales (Bermúdez *et al.* 2009; Universidad de Caldas – ANH, 2009; Bermúdez *et al.* 2013; Bermúdez, 2015), aunque algunos autores de la escuela clásica han propuesto batimetrías mucho más profundas; por ejemplo para lo que Guzman *et al.* (2004) llaman Formación El Morro

(equivalente a la Formación Pendales), donde se plantea que corresponde a abanicos submarinos.

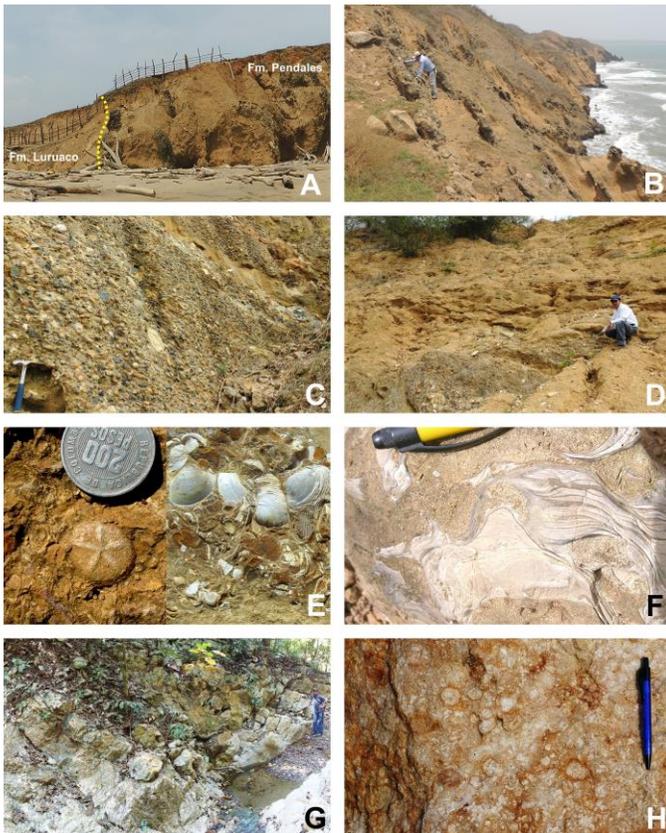


Figura 6. Principales facies del Paleógeno superior en el CPSJ. A) Contacto discordante de la Formación Pendales con el Paleógeno inferior en Bocatocino, Atlántico. B) Facies de conglomerados y areniscas en Bocatocino. C) Detalle de los conglomerados polimícticos de la Formación Pendales cerca de la población del mismo nombre. D) Facies de areniscas fosilíferas y margas de la parte inferior de la Formación Arroyo de Piedra, en la población del mismo nombre, departamento del Atlántico. E) Detalle de niveles fosilíferos en las areniscas de la Formación San Jacinto, cerca de Pijiguay, Bolívar. F) Areniscas fosilíferas con ostreidos de la Formación San Jacinto cerca de Ovejas, Sucre. G) Capas muy gruesas de rudstones con oncoides, equinodermos y moluscos de la Formación Tolviejo, en el sector de Chalán, Sucre. H) Detalle de rudstones de oncoides de la Formación Arroyo de Piedra, al W del municipio del mismo nombre, Atlántico.

Estratigrafía de secuencias. Las facies transgresivas, de TST, están muy bien expuestas en Arroyo de Piedra, Atlántico, y Tolviejo, con el desarrollo de conglomerados, areniscas y arenitas fosilíferas de paleoambientes deltaicos, progresivamente más profundos.

El RST incluye acumulaciones de calizas bioclásticas (con restos de macroforaminíferos, oncoides, moluscos y equinodermos) de plataforma de carbonatos, bien desarrollados en los Montes de María del departamento de Sucre.

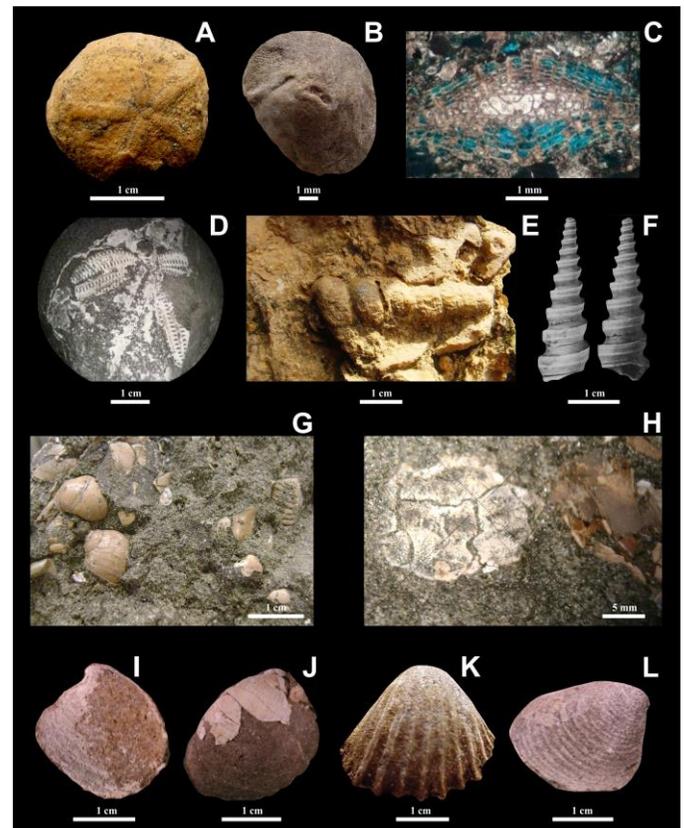


Figura 7. Algunos restos fósiles del Paleógeno tardío en el CPSJ. A) Equinodermo, Formación San Jacinto, cerca de Pijiguay, Bolívar. B-C) Macroforaminíferos de la Formación Tolviejo en Chalán, Sucre. D) Restos de equinodermo en la Formación San Jacinto, al W de San Jacinto, Bolívar. Pozo ANH-P-7. E) Molde interno de una *Turritella* sp., de la Formación San Jacinto al E de de Pijiguay, Bolívar. F) *Wyattella Allisoni* Adegoke 1967. Formación San Jacinto, cerca de Pijuguay, Bolívar. G-H) Restos de moluscos (*Natica* sp., y *Lirophora* sp.) y crustáceos decápodos en rocas de la Formación Tolviejo, cerca de La Ceiba, Sucre. Pozo ANH-P-8.2(a). I-L) Moluscos de la Formación Tolviejo en la sección de Arroyo Seco, Sucre. I-J) *Nucula* sp., K) *Venericardia* sp. L) *Callista* sp. Fósiles de pozo, tomados de Bermúdez et al. 2009.

Secuencia Oligoceno tardío - Mioceno medio.

Litoestratigrafía. Consecuencia de un rápido ascenso relativo del nivel del mar, que se extiende a todas las cuencas colombianas, se acumularon en el CPSJ una serie de unidades compuestas predominantemente por lodolitas y margas, ricas en foraminíferos, con algunos niveles de arenitas y micritas, en ocasiones con abundantes restos fósiles, que incluyen las formaciones El Floral, Carmen, Las Perdices, Hibacharo, Floresanto y equivalentes (Bermúdez et al. 2009), que hacia el E cambian de facies a areniscas y localmente calizas, que están representadas en las formaciones Ciénaga de Oro y las Calizas de Cicuco, entre otras, reconocibles en el subsuelo del VIM y en el límite con el CPSJ.

Buenos afloramientos de la base de la Formación El Floral se encuentran en el sector de Chalán y claramente muestran el desarrollo de facies transgresivas, que incluyen arenitas glauconíticas, pero principalmente lodolitas fosilíferas y margas, suprayaciendo en forma neta las calizas de la Formación Toluviejo (Figura 8, A-D). Por su parte la parte media y alta de la unidad se aprecia muy bien en el Anticlinorio de Luruaco, donde la Formación Las Perdices aflora cerca de Hibacharo, Atlántico. En esta área se aprecian lodolitas y margas, con algunos restos fósiles (Lámina 8, E-F), que hacia el techo muestran un progresivo aumento de facies de arenitas y la interposición frecuente de lentes y capas de siderita (Figura 8, G-H).



Figura 7. Principales facies del Neógeno inferior en el CPSJ. A-D) Parte inferior de la Formación El Floral, Chalán, Sucre. A) Contacto inferior neto ondulado (superficie transgresiva) de arenitas y lodolitas fosilíferas sobre rudstones de la Formación Toluviejo. B) Arenitas fosilíferas y margas con abundantes restos de moluscos y crustáceos. C) Nivel conglomerático con abundantes restos de moluscos. D) Detalle de la foto C. E-H) Formación Las Perdices, Hibacharo, Atlántico. E) Margas de color gris oscuro de la parte media de la unidad. F) Margas con restos de equinodermos de la parte media de la unidad. G) Litoarenitas con intraclastos y ondulitas de corriente de la parte alta de la unidad. H) Lodolitas con interposición de capas y lentes de siderita al techo de la unidad, cerca al contacto con las areniscas de la Formación Piojó.

Paleontología y edad. De acuerdo a los datos micropaleontológicos de foraminíferos, nanoplancton calcáreo y palinología de polen y esporas, recientemente adquiridos

(ATG Ltda – ANH, 2008; Universidad de Caldas – ANH, 2008, 2009; Bermúdez *et al.* 2009, entre otros), se establece una edad Oligoceno terminal – Mioceno medio (Chattienese–Langhiense), que incluye las zonas de foraminíferos P22-N10, zonas T11-Ca11 de Palinología y zonas NP25-NN1 de nanoplancton calcáreo. En general estas secuencias finogranulares presentan abundantes restos de macroinvertebrados, que incluyen escafópodos, bivalvos, equinodermos, gasterópodos, isópodos, crustáceos, foraminíferos, pellets fecales glauconitizados y peces (Figura 8), que se han estudiado parcialmente en los trabajos de Anderson (1929), Weisbord (1929), Barrios (1960) y recientemente por Bermúdez *et al.* (2009); Pineda-Salgado *et al.* (2013) y Vega y Bermúdez (2015), quienes también determinan el Mioceno temprano a medio con esta macrofauna de moluscos y crustáceos.

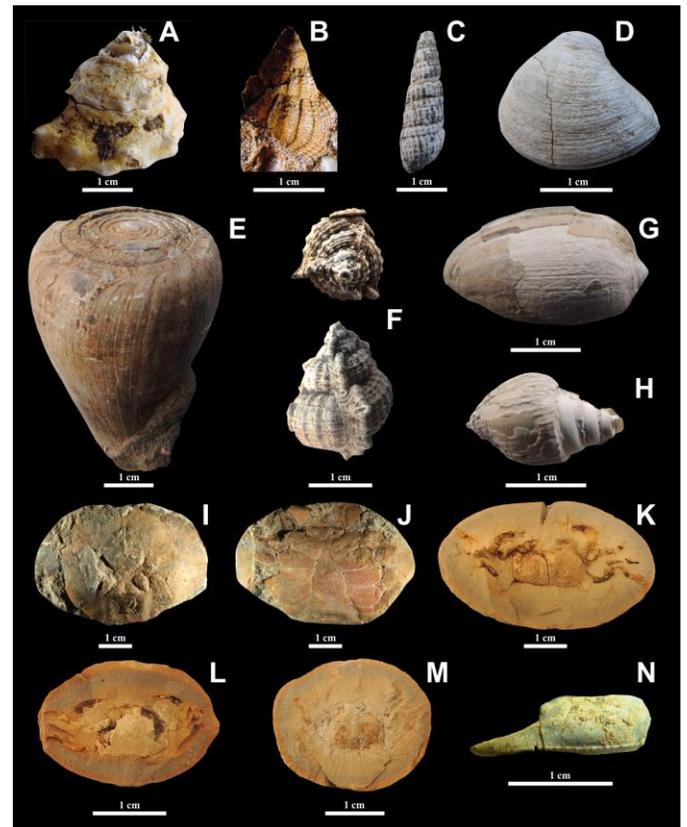


Figura 8. Algunos restos fósiles del Neógeno temprano en el CPSJ. A-B, base de la Formación El Floral, en Chalán, Sucre. A) *Astraea* sp. B) *Cymatophos* sp. C-M, Parte media – alta de la Formación Las Perdices, Hibacharo, Atlántico. C) *Strioterebrum gatunensis* Toulou 1908. D) *Eucrassatella* sp. E) *Conus* sp. F) *Murex* sp., G) *Oliva* sp. H) *Strombina* sp. I-J) Vista dorsal y ventral de un cangrejo *Portunus aff haitiensis* Ratbun 1923. K-M) Concreciones con restos de cangrejos de la familia Hexapodidae. N) Quelípodo de un camarón callianásido del género *Callichirus* sp., base de la Formación El Floral, en Chalán, Sucre.

Paleoambientes de depósito. Los datos paleontológicos, en conjunto con las facies, ilustran un escenario transgresivo – regresivo, que permitió acumular, a finales del Oligoceno e

inicios del Mioceno, lodos y arenas con restos de organismos de zona litoral, en fondos de depósito marinos someros, sometidos a la acción de las tormentas, que progresivamente se profundizan hasta alcanzar niveles costa afuera, donde solo se acumulan lodos de *offshore* ricos en foraminíferos y microfósiles, para posteriormente, ya a mediados del Mioceno, somerizarse nuevamente y permitir la progradación de ambientes litorales y de lagunas costeras en el norte del CPSJ. Estas batimetrías relativamente someras contrastan con interpretaciones que sugieren profundidades batiales (Duque-Caro, 1981; Guzmán *et al.* 2004, entre otros).

Estratigrafía de secuencias. El TST está muy bien representado en el subsuelo del Valle Inferior del Magdalena (VIM), donde conglomerados y areniscas fluviales (localmente calizas) reposan directamente sobre el basamento y luego dan paso a lodolitas marinas. En el CPSJ la transgresión es clara en el sector de Chalán y Carmen de Bolívar, donde las lutitas fosilíferas de *offshore*, ricas en restos de moluscos, crustáceos y peces, suprayacen calizas y areniscas del ciclo anterior. El RST se aprecia bien en el Anticlinorio de Luruaco, departamento del Atlántico, en donde shales marinos progresivamente dan lugar a intercalaciones de lutitas con arenitas y lentes de siderita, con moluscos y crustáceos de lagunas costeras.

Secuencia Mioceno medio - Mioceno tardío.

Litoestratigrafía. Debido a un nuevo descenso relativo del nivel del mar, se acumularon durante este periodo, en el CPSJ, arenas con restos de moluscos, gravas e intercalaciones menores de lodos, carbones y siderita, agrupadas en las formaciones El Cerrito, Rancho, Piojó, Pajuil y equivalentes, extensamente estudiadas por Guzmán (2007), en los límites con el Valle Inferior del Magdalena, que hacia el oeste cambian a facies de lodolitas y arenitas fosilíferas (Bermúdez *et al.* 2009, Universidad de Caldas – ANH, 2009).

En el propio Anticlinorio de San Jacinto, los afloramientos de las rocas de esta unidad son aislados y poco estudiados, pero son similares a los del VIM en su borde occidental, es decir principalmente arenoso-conglomeráticos (Figura 9, H). Mejores exposiciones se observan en el Anticlinorio de Luruaco (departamento de Atlántico), en rocas de la Formación Piojó, aflorante en el flanco oeste del Sinclinal de Tubará. Allí se aprecia una secuencia basal de areniscas y conglomerados (Figura 9, A), suprayacida por intercalaciones de areniscas fosilíferas y margas, las cuales predominan la mayor parte de la unidad (Figura 9, B-C), y solo hacia el techo, cerca al contacto con la Formación Tubará, dan paso nuevamente al desarrollo de intercalaciones de areniscas, algunas bioturbadas y fosilíferas (Figura 9, D-G).

Paleontología y edad. De acuerdo a los datos micropaleontológicos de foraminíferos y nanoplancton calcáreo, recientemente adquiridos (ATG Ltda – ANH, 2008; Universidad de Caldas – ANH, 2008, 2009; Bermúdez *et al.*

2009, entre otros), se establece una edad Mioceno medio – tardío (Langhiense – Tortoniense), que incluye las zonas de foraminíferos N11-N17 y la zonas NN6-NN11 de nanoplancton calcáreo. El contenido paleontológico de estas rocas es abundante e incluye principalmente moluscos, poliquetos y crustáceos (Anderson, 1927, 1929; Weisbord, 1929; Barrios, 1960; Pineda-Salgado *et al.* 2013) típicos de zonas costeras (Figura 10).

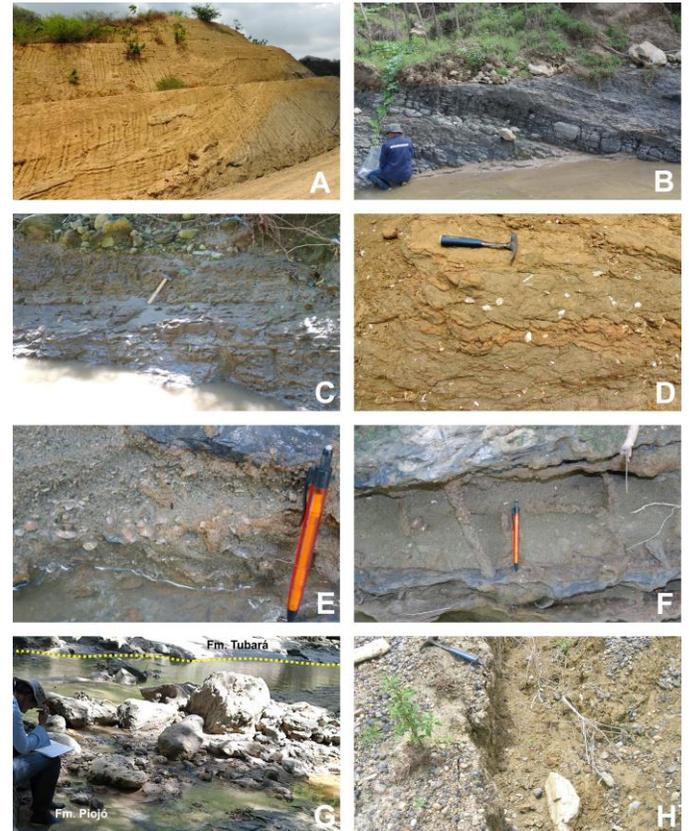


Figura 9. Principales facies del Mioceno medio – superior en el CPSJ. A-G, Formación Piojó. A) Margas con lentes de litoarenita de la parte inferior – media de la unidad, sobre la vía Piojó – Juan de Acosta, Atlántico. B-C) Margas con interposición de arenitas fosilíferas con moluscos. Arroyo Morrotillo, Juan de Acosta, Atlántico. D) Arenitas fosilíferas con abundantes restos de moluscos de la base de la unidad en Piojó, Atlántico. E) Litoarenitas bioturbadas con madrigueras de *Ophiomorpha nodosa*, de la parte alta de la unidad. Arroyo Morrotillo. F) Contacto con la Formación Tubará: margas fosilíferas intercaladas con arenitas, suprayacidas por conglomerados y areniscas. Arroyo Morrotillo. G) Conglomerados y litoarenitas con xilópalos de la Formación El Cerrito, en cercanías de Ovejas, Sucre. H) Conglomerados y litoarenitas con xilópalos de la Formación El Cerrito, en cercanías de Ovejas, Sucre.

Paleoambientes de depósito. Esta fauna y su asociación con las facies descritas ilustran una progresiva profundización de los fondos de depósito, que permite acumular lodos de *offshore* sobre facies deltáicas y de *shoreface*, en la base de la unidad y hacia el techo evidenciar una somerización de la cuenca, con la aparición de arenas acumuladas por la acción de las tormentas, en la denominada zona de transición.

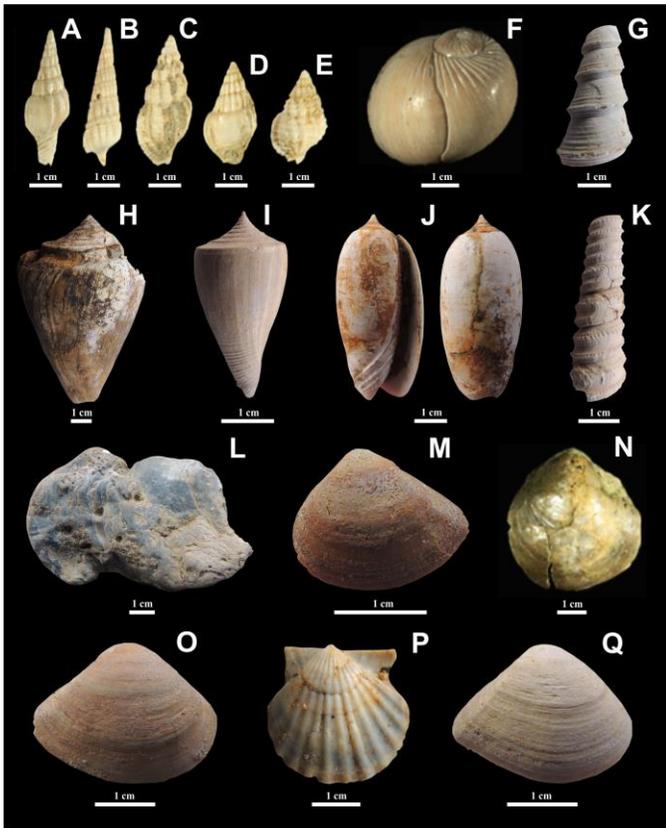


Figura 10. Algunos restos fósiles del Mioceno medio - tardío en el CPSJ (Formación Piojó). A) *Clathrodrillia nuevagranada* Weisbord 1929. B) *Strioterebrum gatunensis* Toulou 1908. C) *Clathrodrillia puertocolombiana* Weisbord 1929. D) *Euclia* sp. E) *Bursa crassa colombiana* Weisbord 1929. F) *Naticarius canrena* Linnaeus 1758. G) *Turritella* sp. H-I) *Conus* sp. J) *Oliva* sp. K) *Turritella* (*Bactrospira*) *atilira* Conrad 1857. L) *Ostrea* sp. M) *Eucrassatella* (*Eucrassatella*) *reevei* Gabb 1873. N) *Anomia mamillaris* Anderson 1929. O) *Eucrassatella* (*Eucrassatella*) *aviaguensis* Hodson 1927. P) *Nodipeecten atlanticola* Anderson 1929. Q) *Glyptoactis* (*Glyptoactis*) *dominica* Weisbord 1929.

Estratigrafía de secuencias. Un buen ejemplo del TST se observa en el sector de Hibacharo, Atlántico, donde se acumulan sucesiones de areniscas y lutitas deltaicas y de *shoreface* que dan lugar a shales marinos con abundante fauna de moluscos. El RST se aprecia muy bien desarrollado en el área del sinclinal de Tubará, Atlántico, donde las lodolitas de *offshore* progresivamente dan paso a intercalaciones de areniscas y lutitas de zona de transición.

Secuencia Mioceno tardío – Plioceno.

Litoestratigrafía. Para el final del Mioceno y durante el Plioceno se acumularon en todo el CPSJ secuencias de arenas, gravas y lodos que corresponden a las formaciones Tubará, Sincelajo y equivalentes (Bermúdez *et al.* 2009). Estas unidades afloran extensamente en toda el área, pero es quizás en la región de Tubará (Departamento del Atlántico) donde existen las mejores exposiciones y se han desarrollado los trabajos más completos.

Las facies mejor expuestas muestran, en la región del Anticlinorio de Luruaco, unos estratos basales de conglomerados y areniscas (Figura 11, A-C), sucedidos por intercalaciones de lodolitas y areniscas fosilíferas, con numerosos niveles coquinoideos (Figura 11, D-H).

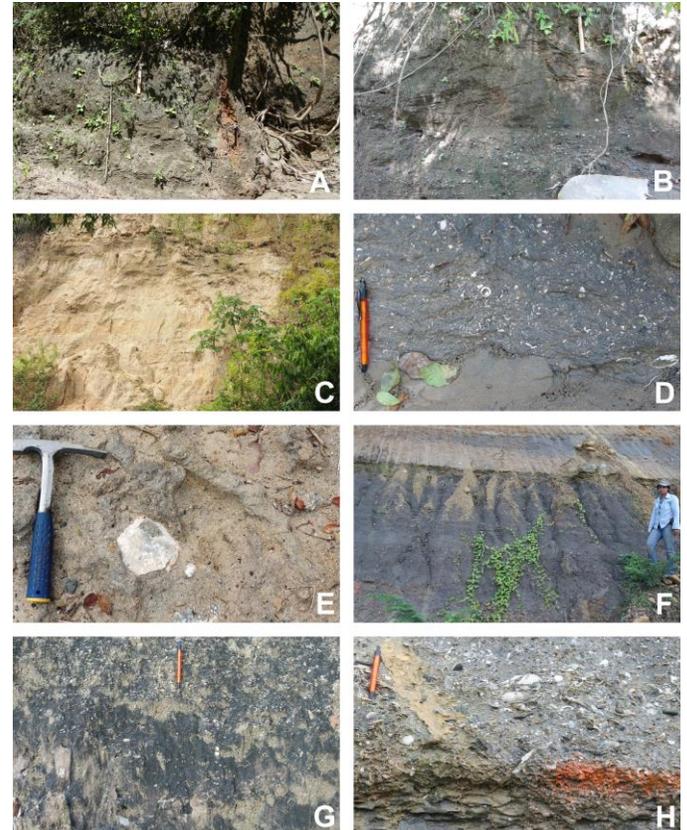


Figura 11. Principales facies del Neógeno superior en el Anticlinorio de Luruaco (Formación Tubará). A) Conglomerados masivos de la base de la unidad en Juan de Acosta, Atlántico. B) Secuencias grano-decrecientes de conglomerados polimícticos y litoarenitas con estratificación cruzada en artesa. Juan de Acosta. C) Capas onduladas muy gruesas de litoarenitas bioturbadas en el Arroyo Morrotillo, en Juan de Acosta. D) Lodolitas fosilíferas con abundantes moluscos en Juan de Acosta. E) Areniscas fosilíferas con madrigueras de *Sinusichnus sinuosus* isp y grandes pectínidos en el Arroyo Morrotillo, Juan de Acosta. F) Lodolitas fosilíferas con laminación plano paralela en Tubará, Atlántico. G) Areniscas fosilíferas bioturbadas en Tubará. H) Secuencia grano-decreciente de litoarenitas conglomeráticas fosilíferas con restos de moluscos y crustáceos en Tubará.

Paleontología y edad. De acuerdo a los estudios micropaleontológicos de foraminíferos y nanoplancton calcáreo, adquiridos recientemente (ATG Ltda – ANH, 2008; Universidad de Caldas – ANH, 2008, 2009; Bermúdez *et al.* 2009, entre otros), se establece una edad Mioceno tardío – Plioceno (Messiniense - Zancliense), que incluye las zonas de foraminíferos N17-N19 y la zonas NN11-NN15 de nanoplancton calcáreo. En esta área el contenido paleontológico de los niveles fosilíferos es rico y variado y consta esencialmente de moluscos y crustáceos (Figura 12), de

los cuales existe un muy completo registro en trabajos que se remontan a principios del siglo pasado; donde destacan las publicaciones de Pilsbry and Brown (1917); Anderson (1927; 1929) y Weisbord (1929), complementadas en años posteriores por Barrios (1960) y muy recientemente por Pineda-Salgado *et al.* (2013), Vega y Bermúdez (2015) y prospecciones paleontológicas que aún se están desarrollando; en las que se observa la presencia de cientos de especies de moluscos y varias de crustáceos, que se acompañan de algunos restos de tortugas y peces, así como de abundantes foraminíferos (Molinares *et al.* 2007), que nos permiten visualizar los ricos ecosistemas marinos de aguas someras que se desarrollaban en el área a finales del Neógeno.

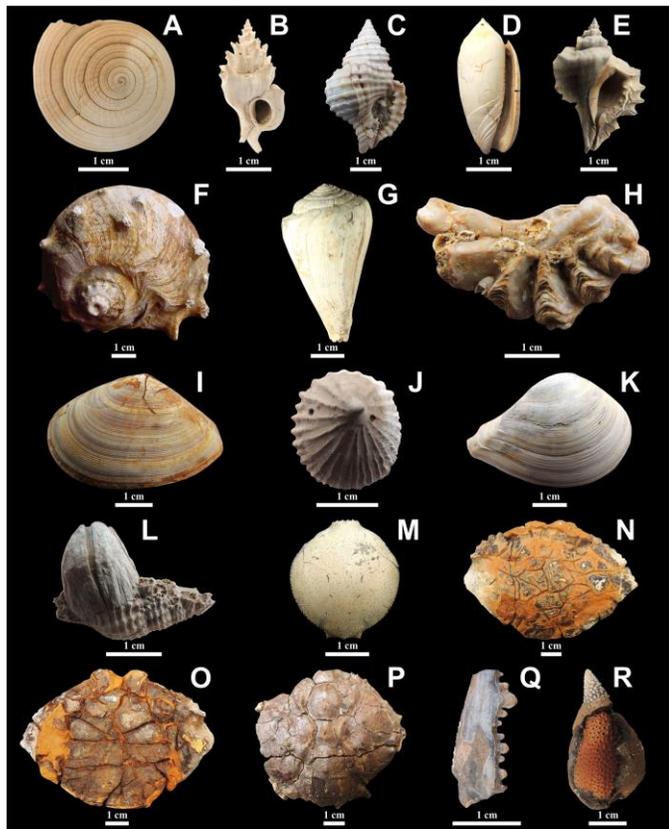


Figura 12. Algunos moluscos y crustáceos de la Formación Tubará (Neógeno tardío) en el Anticlinorio de Luruaco. A) *Architectonica nobilis* Röding 1798. B) *Siphonochelus (Pilsbrytyphis) siphonifera* Dall 1915. C) *Distorsio clathrata* Lamarck 1816. D) *Oliva tuberaensis* Anderson 1929. E) *Potamides avus* Plisbry and Brown 1917. F) *Melongena consors* Sowerby 1850. G) *Conus colombiensis* Weisbord 1929. H) *Ostrea messor colombiensis* Weisbord 1929. I) *Eucrassatella (Eucrassatella) aviaguensis* Hodson 1927. J) *Capulus gatunensis* Toulou 1909. K) *Eucrassatella (Eucrassatella) reevei* Gabb 1873. L) *Percepses* del género *Balanus* sp., colonizando una concha de gasterópodo. M) Vista dorsal de un cangrejo leucóido, *Persephona* sp. N-O) Vista ventral y dorsal de un cangrejo portúnido, *Necronectes* sp. P) Vista dorsal del caparazón de un cangrejo de la familia Inachidae. Q) Parte del quelípodo de un crustáceo (camarón) de la superfamilia Callianassoidea? R) Restos de un cangrejo pagúrido (cangrejo ermitaño), *Petrochirus* sp?

Paleoambientes de depósito. El conjunto de facies y asociaciones de facies del Neógeno tardío sugieren el desarrollo inicial de sistemas influenciados por los ríos y lagunas costeras, que posteriormente dieron paso al establecimiento de ambientes marinos de zona litoral, donde se acumulaban mecánicamente restos fósiles durante las tormentas.

En este sentido, el escenario que ilustra la Formación Tubará, es consistente con el que se aprecia en los afloramientos dispersos de las rocas del Neógeno tardío en el resto del CPSJ; que sugieren un periodo general de plegamiento y levantamiento, previo al depósito de estas secuencias, que permitió una fase de erosión y descenso relativo del nivel del mar, sobre la que se depositó, en forma discordante una secuencia transgresiva con desarrollo de deltas y cintas de playa suprayacida por depósitos marinos poco profundos, sometidos a la acción de las tormentas.

Estratigrafía de secuencias. El TST está muy bien expuesto en el sector de Juan de Acosta, Atlántico, donde se desarrollan conglomerados y areniscas fluviales a deltaicas y de zona litoral, sucedidas por lutitas con moluscos de afinidad marina. El RST se expone claramente cerca de Tubará, mostrando sucesiones progresivamente más someras, de *shoreface* y frente deltaico, que acumulan mecánicamente, por acción de las tormentas, horizontes fosilíferos muy ricos y variados, con moluscos, crustáceos, anélidos, corales, restos de peces y de tortugas.

Implicaciones exploratorias

Tal como predicen los modelos estratigrafía de secuencias, los depósitos de borde de cuenca presentes en el CPSJ, se organizan en ciclos T-R.

Las facies marinas transgresivas (TST) del Cretácico superior (Formación Cansona) y Paleógeno inferior (formaciones San Cayetano, Arroyo Seco, Luruaco y equivalentes) representan sellos regionales y potencial roca fuente para hidrocarburos líquidos, debido a su alto contenido de materia orgánica de origen marino; mientras que, en sectores proximales, lodolitas de paleoambientes deltaicos son favorables para la generación de gas, como es el caso de las lodolitas neógenas de las formaciones El Floral, Carmen, Las Perdices, Porquera, debido a su abundante contenido de materia orgánica de origen continental

Los reservorios potenciales se desarrollan durante etapas regresivas (RST), que permiten la progradación de la línea de costa y los sistemas deltaicos, e incluyen arenitas y conglomerados de paleoambientes deltaicos (frente de delta) y costeros (*shoreface*) del Paleoceno - Eoceno tardío (formaciones San Cayetano, Arroyo Seco, Luruaco y equivalentes), arenitas fosilíferas y calizas tipo rudstone de Eoceno tardío-Oligoceno (formaciones San Jacinto, Toluviéjo, Arroyo de Piedra, Molinero y equivalentes) e incluso en

arenitas de zona litoral del Mioceno tardío y Plioceno (formaciones Tubará, Rancho, El Cerrito y equivalentes).

Conclusiones

Tal como predicen los modelos estratigrafía de secuencias, los depósitos de borde de cuenca presentes en el CPSJ, se organizan en ciclos T-R.

Las facies transgresivas, ilustran el ascenso relativo del nivel del mar y la retrogradación de la línea costera, permitiendo acumular importantes paquetes de lodos marinos, mientras que durante las fases regresivas, progradan los deltas y la línea costera desarrollándose potentes paquetes de arenitas y conglomerados.

Se reconocen seis ciclos transgresivo-regresivos en el registro sedimentario aflorante en el CPSJ: Coniaciano - Maastrichtiano; Paleoceno tardío - Eoceno tardío; Eoceno tardío - Oligoceno; Oligoceno tardío - Mioceno medio; Mioceno medio - tardío y Mioceno tardío - Plioceno, que ilustran depósitos relativamente someros, descartando interpretaciones de ambientes de aguas muy profundas (batiales - abisales) sugeridos por trabajos del siglo pasado.

Las conclusiones paleoambientales sugieren la importancia de incluir en el análisis de la génesis de las unidades del Caribe colombiano los datos paleoecológicos que suministran los fósiles, por demás abundantes en la mayor parte del registro sedimentario, los cuales fueron extensamente estudiados por investigadores de la primera mitad del siglo XX, posteriormente olvidados y/o pasados por alto a finales del siglo pasado e inicios de este, donde solo en fechas muy recientes se ha retomado su estudio y su legado.

En general se concluyó que los ambientes de depósito fueron mucho más someros que lo que plantea la mayor parte de las publicaciones recientes.

Un caso especial y muy ilustrativo se observó en las interpretaciones del Paleógeno temprano, donde los autores más conocidos plantearon la presencia de complejos turbidíticos de aguas profundas (de hasta 4000 m de columna de agua), que se contradicen con el descubrimiento de mantos de carbón y fósiles de agua dulce en las mismas secciones estratigráficas estudiadas por dichos investigadores.

Agradecimientos

El presente estudio fue financiado por el Grupo de Investigación Paleoexplorer, Colombia. Se agradece la colaboración de Liliana Bolívar y Luz Stella Bolívar (Paleoexplorer) en el desarrollo del trabajo de campo y la elaboración del material gráfico. El apoyo, en la parte paleontológica, de Francisco J. Vega (Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México) y Gabriela

Pineda Salgado (Museo Argentino de Ciencias Naturales, Buenos Aires) es altamente apreciada.

Referencias

- Adegoke, O.S. (1967). Wyattella, a New Turrillid genus from the Eocene of Colombia, South America. *Journal of Paleontology*, 41(5), pp. 1095-1100.
- Alfaro, E., and Holz, M. (2014). Review of the chronostratigraphic charts in the Sinú-San Jacinto basin. *Journal of South American Earth Sciences*, 56, pp 139-169.
- Anderson, F.M. (1927). The marine Miocene deposits of North Colombia. *Proceedings of the California Academy of Sciences, Fourth Series*, 16 (3), pp. 87-95.
- Anderson, F.M. (1928). Notes on Lower Tertiary deposits of Columbia and their molluscan and foraminiferal fauna. *Proceedings of the California Academy of Sciences, Fourth Series*, 17(1), pp. 1-29.
- Anderson, F.M. (1929). Marine Miocene and related deposits of north Colombia. *Proceedings of the California Academy of Sciences, Fourth Series*, 18(4), pp. 73-213.
- ATG Ltda - ANH. (2008). *Cartografía geológica, levantamiento de columnas estratigráficas, toma de muestras y análisis bioestratigráficos. Sector de Chalán (Cuenca Sinú – San Jacinto)*. Reporte interno a la ANH.
- Barrios, M. 1960. Algunos moluscos del Terciario Medio de Colombia. *Boletín Geológico*, 6 (1-3), pp. 213-306.
- Bermúdez, H.D. (2015). Nuevos hallazgos de los moluscos *Nemrac carmenensis* Clark 1946 (Gastropoda, Turbinoidea, Turbinidae) y *Solena (Eosolen) bolivarensis* Clark 1946 (Bivalvia - Solenida - Solenidae): Precisiones estratigráficas y paleoambientales para las faunas del Eoceno tardío del Caribe colombiano. *Paleontología Mexicana*, 4(2), pp. 31-38.
- Bermúdez, H.D., Alvarán, M., Grajales, J.A., Restrepo, L.C., Rosero, J.S., Guzmán, C., Ruiz, E.C., Navarrete, R.E., Jaramillo, C., Osorno, J.F. (2009). Estratigrafía y evolución geológica de la secuencia sedimentaria del CPSJ. *Memorias XII Congreso Colombiano de Geología*. Paipa.
- Bermúdez, H.D., Vega, F.J., Corredor, V.E., Numpaque, A. (2013). Los moluscos del Paleógeno del CPSJ y su relevancia en las interpretaciones paleoambientales del Caribe colombiano. *Memorias XIV Congreso Colombiano de Geología*. Bogotá.
- Butler, J.W. (1942). *Geology of municipio de San Jacinto and parts of the municipios de San Juan Nepomuceno and El Carmen, Department of Bolívar*. Texas petroleum Company, Internal Report.
- Caro, M. (2003). *Structural Evolution of the San Jacinto Fold Belt, NW Colombia*. Magister Thesis University of Calgary.
- Clavijo, J., Barrera, R., Guzman, G., Kassem, T., Cáceres, C., Cucalón I. (1998). *Geología de la Plancha 44 – Sincelejo. Escala 1:100.000*. Ingeominas, Bogotá.
- Clark, B.L., Durham, J.W. (1946). Eocene Faunas from the Department of Bolívar, Colombia. *GSA Memoir*, 16.
- Clavijo, J. y Barrera, R. (2001). *Geología de las planchas 44 Sincelejo y 52 Sahagún, Escala 1:100.000*. Memoria Explicativa Ingeominas, Bogotá.
- Dueñas, H., y Gómez, C. (2013). Bioestratigrafía de la Formación Cansona en la quebrada Peñitas, Cinturón de San Jacinto. Implicaciones paleogeográficas. *Revista Academia Colombiana de Ciencias*. XXXVII (145), pp. 527-539.
- Duque-Caro, H. (1969). *Facies sedimentarias del norte de Colombia relacionadas a la paleoecología y a la tectónica*. Servicio Geológico de Colombia. Informe No. 1550.

Duque-Caro, H. (1972). Relaciones entre la bioestratigrafía y la cronoestratigrafía en el llamado Geosinclinal de Bolívar. *Boletín Geológico Ingeominas*, XIX (3), pp. 25-98.

Duque-Caro H. (1973). Foraminíferos planctónicos y el terciario de Colombia. Informe 1651. Ingeominas. Bogotá.

Duque-Caro H. (1978). Geotectónica y Evolución de la Región Noroccidental Colombiana. *Boletín geológico Ingeominas*, 23 (3). Bogotá.

Duque-Caro H. (1979). Major structural elements and evolution of northwestern Colombia, in Watkins, J.S. *et al* (eds.) *Geological and geophysical investigations of continental margins*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 29, pp. 329-351.

Duque-Caro, H. (1980). Geotectónica y evolución de la región noroccidental Colombiana. *Boletín Geológico Ingeominas*, 23(3), pp.4-37.

Duque-Caro H. (1984). Structural style, diapirism and accretionary episodes of the Sinú-San Jacinto terrane, southwestern Caribbean borderland. In Bonini, W.E., Hargraves, R.B. and Shagam R, (eds.). *The South American-Caribbean Plate Boundary and Regional Tectonics*. Mem. Geol. Soc. Amer. 162, pp. 303-316.

Duque-Caro, H. (2001). *Biostratigraphic Report of Colombian Caribbean wells*. Internal Report from Ecopetrol.

Embry. A.F. (2009). *Practical Sequence Stratigraphy*. Canadian Society of Petroleum Geologists.

ESRI-ILEX. (1995). *Evaluación Geológica Regional de la Cuenca del Sinú-San Jacinto*. Tres tomos. Reporte interno Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol). Bogotá.

Guzmán, G., Gómez, E. y Serrano, B. (2004). *Geología de los Cinturones del Sinú, San Jacinto y borde occidental del Valle Inferior del Magdalena, Caribe Colombiano. Escala 1:300.000*. Memoria técnica INGEOMINAS. Bogotá.

Guzman, G. (2007). *Stratigraphy and Sedimentary Environment and Implications in the Plato Basin and the San Jacinto Belt Northwestern Colombia*. PhD thesis. University of Liege.

ICP-GOX. (2001a). *Evaluación de la Prospectividad del Sector Atlántico*. Reporte interno Instituto Colombiano del Petróleo. Piedecuesta.

ICP-GOX. (2001b). *Evaluación Post-Perforación Pozos VIM-Sinú, Informe Final*. Reporte interno Instituto Colombiano del Petróleo. Piedecuesta.

Luna, O., Manrique, M., Laverde, F., Buchelli, F. y Rueda, M. (2001). *Informe Geológico Regional de la Provincia Petrolífera del Noroccidente Colombiano*. Reporte interno Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol). Bogotá.

Molinares, C.E., Martínez, J.I., Fiorini, F. y Jaramillo, C. (2007). Ambientes de acumulación y foraminíferos bentónicos de la Formación Tubará (Plioceno del Valle Inferior del Magdalena). *Boletín de Geología*. 29 (2), pp. 29-38.

Pilsbry, H.A. and Brown, A.P. (1917). Oligocene fossils from the neighborhood of Cartagena, Colombia, with notes on some Haitian species. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 69 (1), pp. 32-41.

Pineda-Salgado. G, Bermúdez. H.D, Vega. F.J, Mora. A. (2013). Nuevos aportes al conocimiento del registro paleontológico del Neógeno de la parte norte del CPSJ. *Memorias XIV Congreso Colombiano de Geología*. Bogotá.

Universidad de Caldas - ANH. (2008). *Inventario, interpretación y Evaluación integral de la información geológica, geofísica y geoquímica en la cuenca Sinú - San Jacinto y el área especial Sinú de la Agencia Nacional de Hidrocarburos*. Reporte interno a la ANH.

Universidad de Caldas – ANH. (2009). *Estudio integrado de los núcleos y registros obtenidos de los pozos someros tipo “slim holes” en la Cuenca Sinú*. Reporte interno a la ANH. 2 tomos y 6 anexos.

Weisbord. N.E. (1929). Miocene Mollusca of Northern Colombia. *Bulletin of American Paleontology* 14(54), pp. 1-310.