

## **ESTRATIGRAFÍA Y EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DE LA SECUENCIA SEDIMENTARIA DEL CINTURÓN PLEGADO DE SAN JACINTO**

**Hermann Darío Bermúdez<sup>1</sup>, Mauricio Alvarán<sup>1</sup>, Jenny Alejandra Grajales<sup>1</sup>, Lina Clemencia Restrepo<sup>1</sup>, Juan Sebastián Rosero<sup>1</sup>, Carlos Guzmán<sup>1</sup>, Elvira Cristina Ruiz<sup>1</sup>, Rosa Esther Navarrete<sup>2</sup>, Carlos Jaramillo<sup>3</sup> y José Fernando Osorno<sup>4</sup>.**

<sup>1</sup>Universidad de Caldas, hbermudez@yahoo.com <sup>2</sup>Paleosedes E.U, rosether@hotmail.com, <sup>3</sup>Smithsonian Tropical Research Institute, jaramillo@si.edu; <sup>4</sup>Agencia Nacional de Hidrocarburos, jose.osorno@anh.gov.co.

### **RESUMEN**

A partir del estudio y análisis de más de 6.000 metros de corazones, perforados para la ANH, se presenta un nuevo esquema estratigráfico y evolutivo para el Cinturón Plegado de San Jacinto (CPSJ).

Las rocas analizadas corresponden a secuencias de las formaciones Arroyo Seco (Paleoceno tardío – Eoceno tardío), Toluviejo – Chengue (Eoceno tardío – Oligoceno tardío), El Floral - Ciénaga de Oro (Oligoceno tardío – Mioceno medio) y Sincelejo (Plioceno?)

La interpretación estratigráfica de la secuencia estudiada, apoyada con la integración multidisciplinaria de análisis bioestratigráficos de polen y esporas, foraminíferos y nanoplancton calcáreo, petrografía y geoquímica, permite establecer que la sedimentación en el CPSJ, durante el Paleoceno – Mioceno, ocurrió principalmente en fondos de depósito marinos, relativamente someros, con desarrollo de complejos deltaicos y de plataformas de carbonatos, ricos en macrofósiles de zonas litorales, y durante el Plioceno en ambientes fluviales.

Los datos obtenidos permiten revisar las interpretaciones clásicas para el área, las cuales proponen que la acumulación de las rocas de las unidades de esta zona se acumularon en ambientes marinos profundos, mientras que los datos aquí obtenidos establecen que la mayor parte de la sucesión se acumuló cerca del nivel de acción de las olas, muy próximos a la línea de costa.

**Palabras clave:** Estratigrafía, Bioestratigrafía, Cinturón Plegado de San Jacinto, Paleógeno – Neógeno, Depósitos litorales.

## **STRATIGRAPHY AND GEOLOGIC EVOLUTION OF CENOZOIC SEDIMENTARY RECORD OF SAN JACINTO FOLD BELT**

### **ABSTRACT**

Based on the study and analysis of more than 6.000 meters of cores carried out for ANH, a new stratigraphic and evolutive scheme is presented for the San Jacinto Fold Belt (SJFB).

Analyzed rocks correspond to sequences of the formations Arroyo Seco (late Paleocene - late Eocene), Toluviejo - Chengue (late Eocene - late Oligocene), El Floral – Ciénaga de Oro (late Oligocene - middle Miocene) and Sincelejo (Pliocene?)

The stratigraphic interpretation of the studied sequence was supported on the multidisciplinary integration of biostratigraphic analysis of pollen and spores, foraminiferous and calcareous nanoplancton, petrography and geochemical studies, allows to establish that the sedimentation in the SJFB, during the Paleocene - Miocene, happened mainly in relatively shallow marine environment, with development of deltaic complexes and carbonates platforms, rich in macrofossils of coastal zones, and during the Pliocene in fluvial environments.

The obtained information allows to prove the mistake in classic interpretations for the area, which propose that the accumulation of the rocks of these units in the zone were carried out in marine deep environments, whereas the information presented in this paper establishes that most of the succession was accumulated near the level of waves action, very close the coast line.

**Key words:** Stratigraphy, Biostratigraphy, San Jacinto fold belt, Paleogene – Neogene, Littoral deposits



## INTRODUCCIÓN

La Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) y el Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de Caldas, han suscrito desde el año 2007 una serie de convenios que pretenden fortalecer el conocimiento geológico de diversas cuencas, en torno a la evaluación del potencial de hidrocarburos del país. En el marco de estos convenios se ha desarrollado un estudio multidisciplinario sobre cerca de 6000 m de núcleos, obtenidos de 14 pozos someros, tipo *slim hole*, perforados en el CPSJ (Figura 1). Sobre estos corazones se han realizado análisis bioestratigráficos (polen y esporas, foraminíferos y nanoplancton calcáreo), petrográficos, petrofísicos y geoquímicos, además de un detallado análisis litoestratigráfico y facial, que permiten avanzar en el conocimiento de la estratigrafía esta región del país y ayudan a precisar, y en ocasiones a modificar, los modelos de evolución geológica del área, brindando un marco de referencia para futuros proyectos geológicos y exploratorios. Se presenta a continuación un resumen de los resultados en el aspecto estratigráfico.

## ANTECEDENTES

En el área del CPSJ se han desarrollado gran cantidad de estudios geológicos, desde que en 1906 se descubriera el primer pozo de petróleo del país (Perdices – 1, en el departamento de Bolívar). En particular son importantes los trabajos en las áreas de El Carmen de Bolívar y Chalán – Toluviejo, en el departamento de Sucre (*Beck, 1921; Werenfels, 1926; Anderson, 1929; Chenevart, 1963; Zimmerle, 1968; Duque, 1968 y 1972; Cáceres y Porta, 1972, en Porta, 1974*). Los datos bioestratigráficos son parciales y muchas veces sesgados, no hay secciones de referencia de muchas de las unidades descritas, etc.,



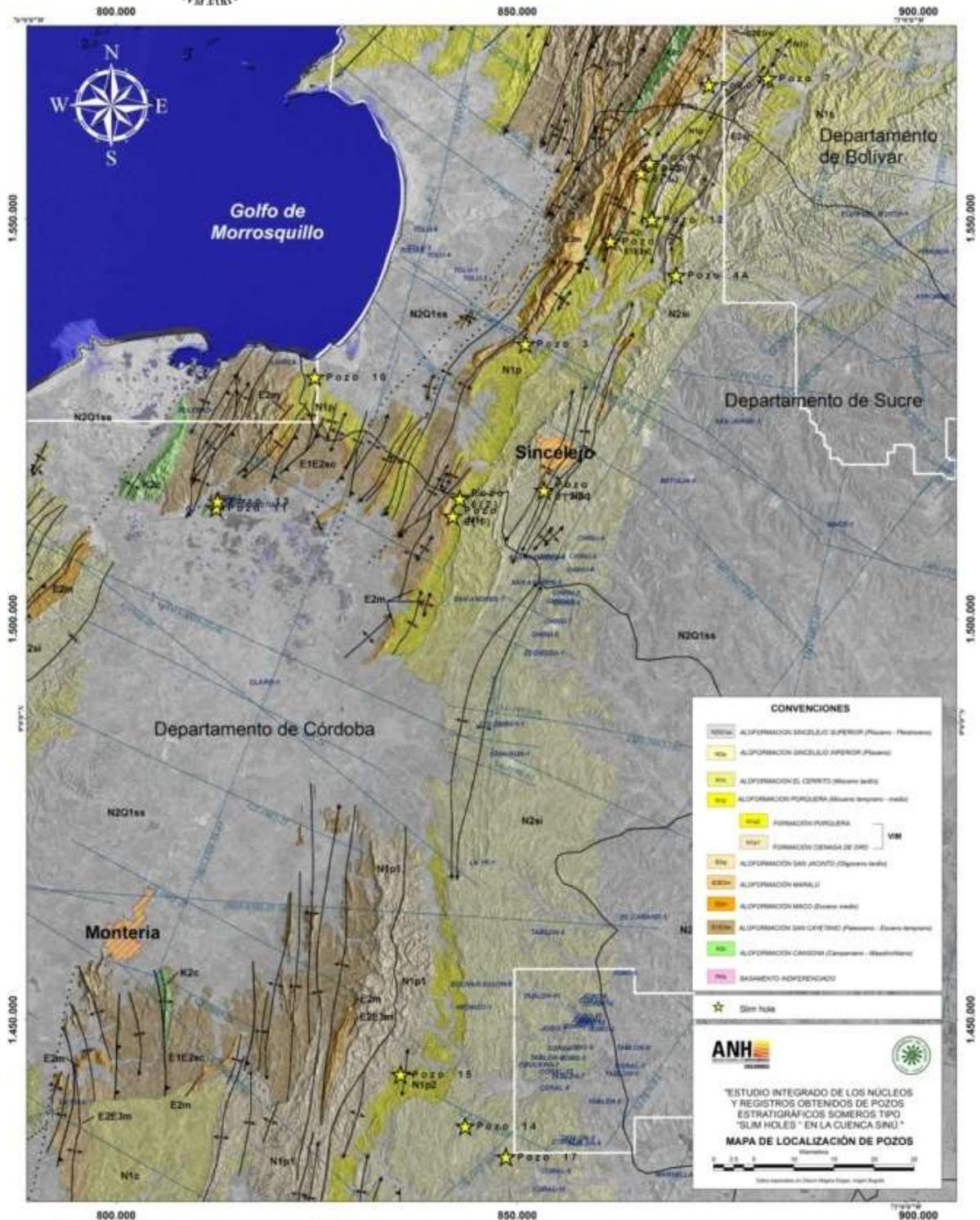


FIGURA 1. Localización de los pozos perforados para este estudio.

datos de pozo análisis locales y cartografías de diversas fuentes, solo han contribuido a una mayor confusión.

Desde el 2007, la ANH ha venido realizando una serie de trabajos en la región Caribe, que incluyen inventario, evaluación e interpretación de datos de pozo, sísmica, cartografía regional (*Universidad de Caldas 2008 - 2009*) y detallada, así como levantamientos estratigráficos en campo (*ATG Ltda, 2009*), que han brindado las bases para el presente trabajo.

### **MARCO GEOLOGICO**

El CPSJ se caracteriza por presentar una tectónica transpresiva que genera una serie de fallas inversas de escama gruesa, con vergencia al oeste, y movimiento de rumbo dextral, sobre las que se desarrollan pliegues estrechos y alargados (localmente dispuestos en forma oblicua a las fallas) que involucran una secuencia sedimentaria depositada desde finales del Cretácico (*Universidad de Caldas 2008 – 2009*).

Las rocas sedimentarias más antiguas de la zona, lodolitas calizas y cherts de la Formación Cansona (Campaniano - Maastrichtiano), se depositaron en forma discordante sobre un basamento de naturaleza continental a transicional; esta unidad es suprayacida discordantemente por conglomerados, arenitas y lodolitas de la Formación Arroto Seco (y equivalentes) de edad Paleoceno temprano - Eoceno medio, las que a su vez son suprayacidas por calizas, arenitas y lodolitas de las formaciones Toluviejo, Chengue, San Jacinto y equivalentes (Eoceno tardío - Oligoceno). A continuación se acumulan los depósitos transgresivos de arenitas y lodolitas de las formaciones El Floral (y equivalentes fms. Carmen y Porquera) y Ciénaga de Oro (Oligoceno tardío - Mioceno medio), los cuales

se extienden por el CPSJ y como secuencia basal del VIM. A finales del Mioceno se depositan arenitas con abundantes moluscos de la Formación El Cerrito y equivalentes y en el Plioceno arenitas, calizas y conglomerados de la Formación Sincelejo.

Una carta crono-estratigráfica esquemática, que resume la estratigrafía del área de estudio, realizada a partir de las conclusiones de los trabajos de los estudios de *ATG Ltda, 2009* y *Universidad de Caldas 2008 – 2009*, incluyendo los datos de este trabajo se presenta en la Figura 2.

## METODOLOGIA

La Universidad de Caldas, como ejecutante de este proyecto, creó un grupo de trabajo interdisciplinario, que contó con la participación del siguiente personal (Tabla 1).

**TABLA 1. Equipo de trabajo**

<b>DIRECTOR</b>			
Ms C. Mauricio Alvarán E. Universidad de Caldas			
<b>COORDINADORA ADMINISTRATIVA</b>			
Geóloga, Elvira Cristina Ruiz. Universidad de Caldas			
<b>COORDINACIÓN TÉCNICA E INTEGRACIÓN</b>			
Geólogo, Hermann Darío Bermúdez Aguirre			
<b>ÁREA ESTRATIGRAFÍA</b>	<b>ÁREA PALINOLOGÍA</b>	<b>AREA MICRO-PALEONTOLOGÍA</b>	<b>ÁREA PETROGRAFÍA</b>
<b>Coordinación:</b> Geólogo, Hermann Darío Bermúdez Aguirre	<b>Coordinación:</b> Ph D. Carlos Jaramillo, Smithsonian Tropical Research Institute	<b>Coordinación:</b> Ph D. Rosa Esther Navarrete, Paleosedes E.U.	<b>Coordinación:</b> Ph D. Carlos Alberto Guzmán López, Universidad de Caldas
Jenny Alejandra Grajales Lina Clemencia Restrepo Juan Sebastián Rosero	Millarlendy Romero Diana Ochoa Silane da Silva Giovanny Bedoya Manuel Páez	<b>FORAMINÍFEROS:</b> Ph D Rosa Esther Navarrete Francisco Javier Parra <b>NANOPLANTON</b> <b>CALCÁREO:</b> Andrea Concheyro Gladys Nohemí Angelози	Carolina Ramírez Ana María García Walter Guzmán

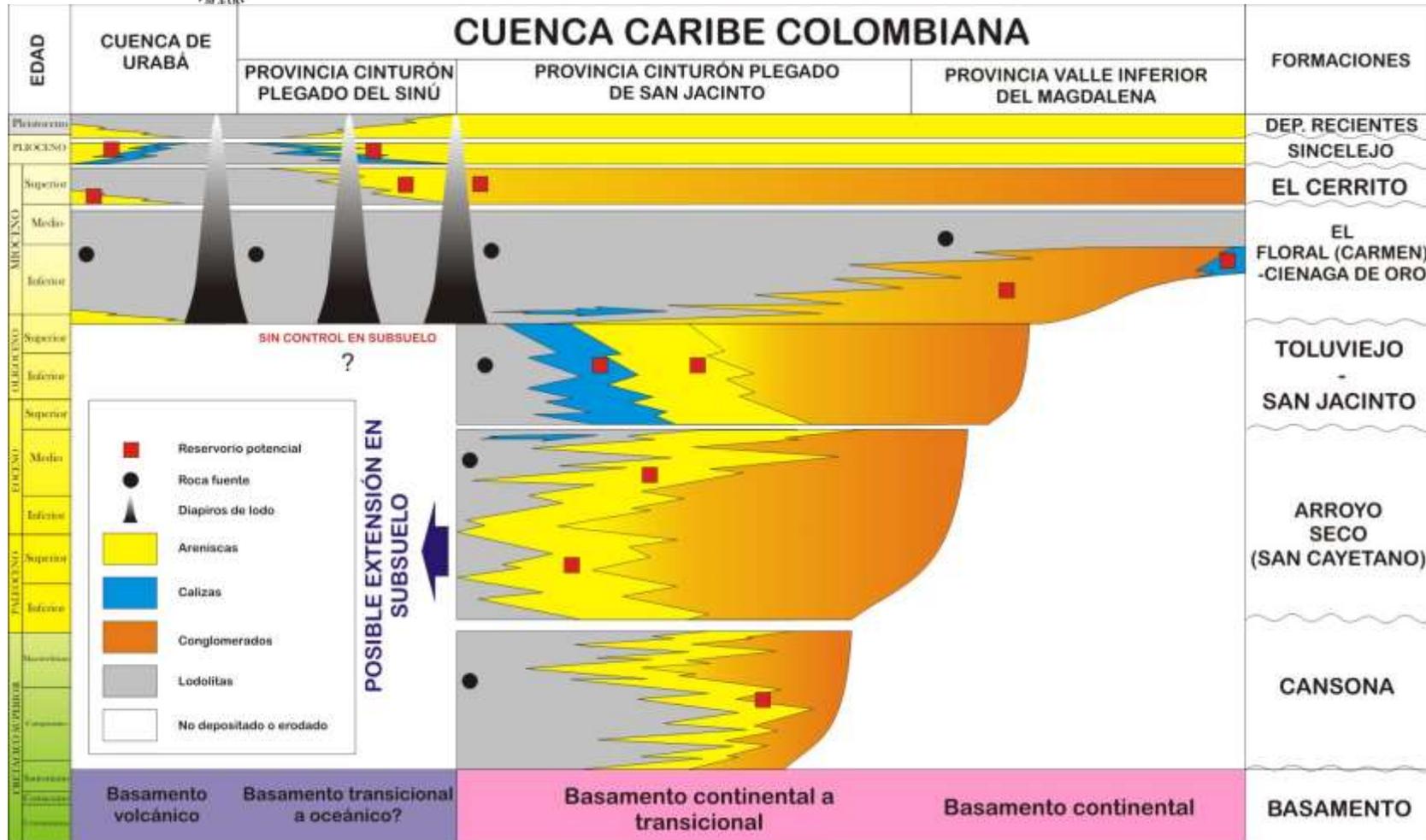


FIGURA 2. Esquema estratigráfico del área de estudio.

La descripción y muestreo de los cerca de 6000 m de núcleos fue realizada en la Litoteca Nacional en Piedecuesta, Santander, durante los meses de Agosto de 2008 a Febrero de 2009, siguiendo las clasificaciones estándar de descripción de rocas y describiendo en detalle (al centímetro) la secuencia de rocas perforada, sobre la que se realizó un muestreo sistemático con fines petrográficos, petrofísicos, geoquímicos, y bioestratigráficos.

Se realizó el análisis palinológico de 555 muestras, preparadas según la metodología estándar para procesamiento palinológico descrita en *Traverse, 2007*. Para identificación de los granos se comparó con una base de datos morfológica derivada de las publicaciones palinológicas de la región (*Jaramillo and Rueda, 2008*). Se realizó un análisis multivariado del tipo NMDS (nonparametric multidimensional scaling), utilizando la función metaMDS del paquete para R Vegan (*Oksanen et al., 2005*). En este análisis no se incluyeron muestras que tuvieran un conteo inferior a 50 granos y especies que tuvieran conteos inferiores a 10 granos, para evitar el sesgo ocasionado por tamaños de muestra muy pequeños.

De igual manera, se realizó el análisis de 300 muestras para estudio mediante foraminíferos y otras 300 para nanoplancton calcáreo. El análisis bioestratigráfico se realizó teniendo como base esquemas zonales de aplicación Caribe y Pacífico; aunque muchas biozonas no se reconocen como fueron propuestas por los respectivos autores, los límites cronoestratigráficos establecidos para muchas de las especies aquí reportadas, permiten reconocer la presencia de las zonas de *Martini, 1971, Blow, 1969, Berggren et al, 1986 y Berggren et al. 2005*, las cuales son de aplicación transcontinental (Ver *Navarrete y Cerón, este Volumen*).



Por último, se efectuó un análisis petrográfico y diagenético de 148 secciones delgadas, para cada una de las cuales se realizó un conteo de 400 puntos (ver *Guzmán et al*, este Volumen).

## **ESTRATIGRAFÍA**

### **BASAMENTO**

Las perforaciones realizadas en este estudio no alcanzaron el basamento; sin embargo y de acuerdo a los estudios clásicos para el área, se considera que en el CPSJ es de naturaleza oceánica (ofiolitas). Los datos más recientes, por el contrario, proponen que es de naturaleza continental a transicional (*Cerón et al., 2007; ATG Ltda, 2009*). En este trabajo y juzgar por la naturaleza de los clastos y composición de las arenitas de la Formación Arroyo Seco, se revela la erosión, de rocas de afinidad continental, específicamente de cratón interior y orógeno reciclado, esencialmente cuarzoso y transicional.

### **FORMACIÓN CANSONA**

Las rocas de la Formación Cansona, tampoco fueron perforadas por ninguno de los pozos estudiados en este trabajo. Sin embargo los datos de campo recientemente adquiridos por la ANH (*ATG Ltda, 2009*), en el área del Anticlinal de Chalán, reportan que esta unidad se compone esencialmente por una alternancia de capas delgadas de lodolitas silíceas y calcáreas de color gris oscuro, mudstones, shales y en escasa proporción cherts, porcelanitas y calcarenitas, depositadas, entre el Campaniano y el Maastrichtiano, en fondos de acumulación relativamente someros (paleo-batimetrías entre 100 a 20 m), ubicados entre la plataforma interna a media y la zona de transición, que contrastan con la interpretación clásica de depósitos marinos, batiales profundos, de hasta 1000 - 2000 m de



columna de agua (ESRI-ILEX, 1995; ICP-GOX, 2001; Luna et al, 2001; Guzman et al, 2004).

## **FORMACIÓN ARROYO SECO**

En este trabajo, la Formación Arroyo Seco fue controlada en siete pozos; en los cuales se observó como una unidad predominantemente arenosa (en particular en la parte inferior y media), con intercalación de facies lodosas (importantes hacia la parte superior) y de conglomerados.

Los segmentos arenosos están compuestas por arenitas líticas, generalmente calcáreas, con facies masivas, laminadas (laminación plano paralela, ondulada o inclinada planar, y raramente *hummocky*, fláser y convoluta), bioturbadas por estructuras de la *ichnofacies cruziana*, en secuencias grano-decrecientes y niveles de arenitas conglomeráticas. En general es común la presencia de muscovita y restos de materia orgánica, aunque específicamente en el pozo P12 se hallaron secuencias grano-decrecientes muy ricas en materia orgánica, intercaladas con lodolitas carbonosas y capas de carbón.

Los segmentos lodosos están compuestos por lodolitas generalmente calcáreas y de color gris oscuro a negro, con facies masivas, bioturbadas (*ichnofacies cruziana*), laminadas (laminación plano paralela a levemente ondulada y fláser), y con gradación inversa, con ocasional intercalación de arenitas y calizas. En general es común encontrar restos carbonosos y láminas ricas en materia orgánica. En el pozo P12 se encontraron lodolitas carbonosas masivas, bioturbadas o con laminación plano paralela, intercaladas con arenitas líticas y capas de carbón.

En el pozo P3, se encontraron secuencias grano-decrecientes de conglomerados polimícticos masivos, generalmente clasto-soportados, con cemento calcáreo y matriz de arena gruesa, compuestos por fragmentos de cuarzo lechoso, chert, sedimentitas (lodolitas, calizas y arenitas), rocas metamórficas e ígneas de composición ácida, similares a los descritos por *ATG Ltda, 2009*, en la sección tipo de la Formación Arroyo Seco.

### **PALEONTOLOGÍA Y EDAD**

En las rocas de la Formación Arroyo Seco, se encontraron abundantes restos de peces, pellets fecales, foraminíferos y, especialmente hacia el tope de la unidad, bivalvos, gasterópodos, escafópodos, equinodermos, crustáceos y anélidos poliquetos. Los análisis palinológicos, reportan la presencia de formas indicativas del Paleoceno al Eoceno – Oligoceno. Por su parte los análisis bioestratigráficos de foraminíferos y nanoplancton calcáreo, permiten establecer que la Formación Arroyo Seco se acumuló entre el Paleoceno tardío y el Eoceno tardío, edad más probable para el depósito de esta unidad.

### **PALEOAMBIENTES DE DEPÓSITO**

De acuerdo al análisis facial y paleoambiental, microfósiles de zona litoral, datos palinológicos, en los que predomina el pobre recobro, sumado a la presencia constante de dinoflagelados, material amorfo, *foram linings*, gran cantidad de material vegetal degradado, elementos de manglar (*Spinizonocolpites*, *Zonocostites*, *L. crassa*), junto con black debris y datos micropaleontológicos de foraminíferos y nanoplancton calcáreo, que indican sedimentación en paleoambientes inestables, con condiciones variables, que oscilan entre la plataforma externa a la zona litoral; se evidencia que el depósito de las rocas de la

Formación Arroyo Seco tuvo lugar en fondos de acumulación transicionales a marinos someros (con aportes del continente), en ambientes de planicies deltaicas, frente deltaico, talud deltaico, prodelta y plataforma (Figura 3).

### **FORMACIONES TOLUVIEJO – SAN JACINTO**

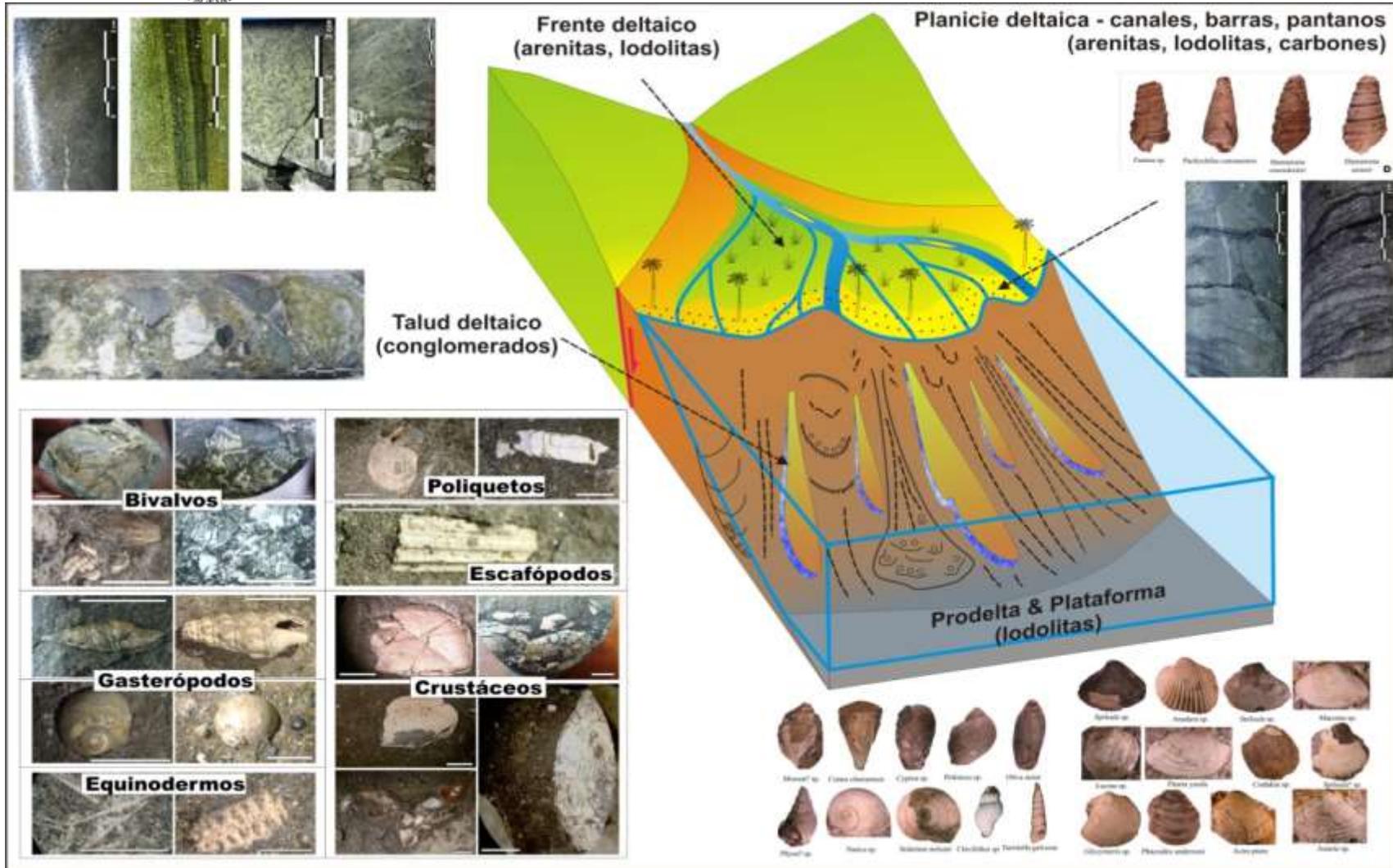
Las características litológicas, paleoambientales y paleontológicas de las formaciones Toluviejo y San Jacinto, permiten integrarlas como parte de un solo evento de sedimentación, en el cual estas unidades corresponden a variaciones faciales (facies heterópicas isócronas) entre secuencias calcáreas y siliciclásticas.

Se utilizó aquí el nombre Formación San Jacinto, para designar a la unidad sedimentaria que suprayace las rocas de la Formación Arroyo Seco, pero no desarrollan cuerpos importantes de facies de calizas bioclásticas (típicas de la Formación Toluviejo). En el presente estudio la Formación Toluviejo fue controlada en tres pozos; mientras que la Formación San Jacinto se controló en dos pozos.

Los segmentos calcáreos corresponden a calizas bioclásticas, principalmente wackestones y packstones masivos, localmente arenosos, de color gris, con bioclastos de moluscos, equinodermos, macro-foraminíferos (*nummulites* y *lepidocyclinas*) y oncolitos. Son comunes, especialmente a la base de la Formación Toluviejo, litoclastos de rocas sedimentarias, volcánicas y cuarzo.

Los segmentos lodosos se componen de lodolitas calcáreas masivas (raramente con laminación plano paralela, lenticular, ondulada y fláser), con restos de moluscos, crustáceos, equinodermos, macro-foraminíferos, pellets fecales, peces y oncolitos.





**FIGURA 3.** Paleontología, facies y modelo paleoambiental para la Formación Arroyo Seco. Complementado con datos de *ATG Ltda*, 2009.

Es común la presencia de láminas de materia orgánica e intervalos suavemente bioturbados (madrigueras horizontales).

### **PALEONTOLOGÍA Y EDAD**

Las rocas de las formaciones Toluviejo y San Jacinto incluyen abundantes fragmentos de bivalvos, gasterópodos, equinodermos, escafópodos, crustáceos, restos de peces y macroforaminíferos. Los análisis palinológicos reportan la presencia de formas indicativas del Eoceno – Oligoceno. Por su parte los análisis bioestratigráficos de foraminíferos y nanoplancton calcáreo, permiten mayor precisión y establecen que las formaciones Toluviejo y Chengue se acumularon entre el Eoceno tardío y el Oligoceno.

### **PALEOAMBIENTES DE DEPÓSITO**

De acuerdo al análisis de facies y paleoambientes, así como la abundancia de microfósiles de zona litoral, presencia de dinoflagelados, material vegetal degradado, materia amorfa, *foram lining*, elementos de manglar (*L. crassa*, *Zonocostites*) y los datos de foraminíferos y nanoplancton calcáreo, se evidencia que la acumulación tuvo lugar en paleoambientes marinos muy someros, caracterizados por salinidad normal y aguas templado/cálidas, cuya profundidad no excede los 30 metros, en ambientes someros mixtos terrígenos y carbonatados (Figura 4); que representan la interacción entre un sistema deltaico y una plataforma somera de carbonatos. Los paleoambientes de rampa interna a media de una plataforma de carbonatos, son característicos de la Formación Toluviejo, mientras que facies netamente siliciclásticas (facies heterópicas isócronas, asociadas a depósitos deltáicos - posiblemente tipo delta trenzado, *braid-delta*), están mejor relacionadas a la Formación San Jacinto.

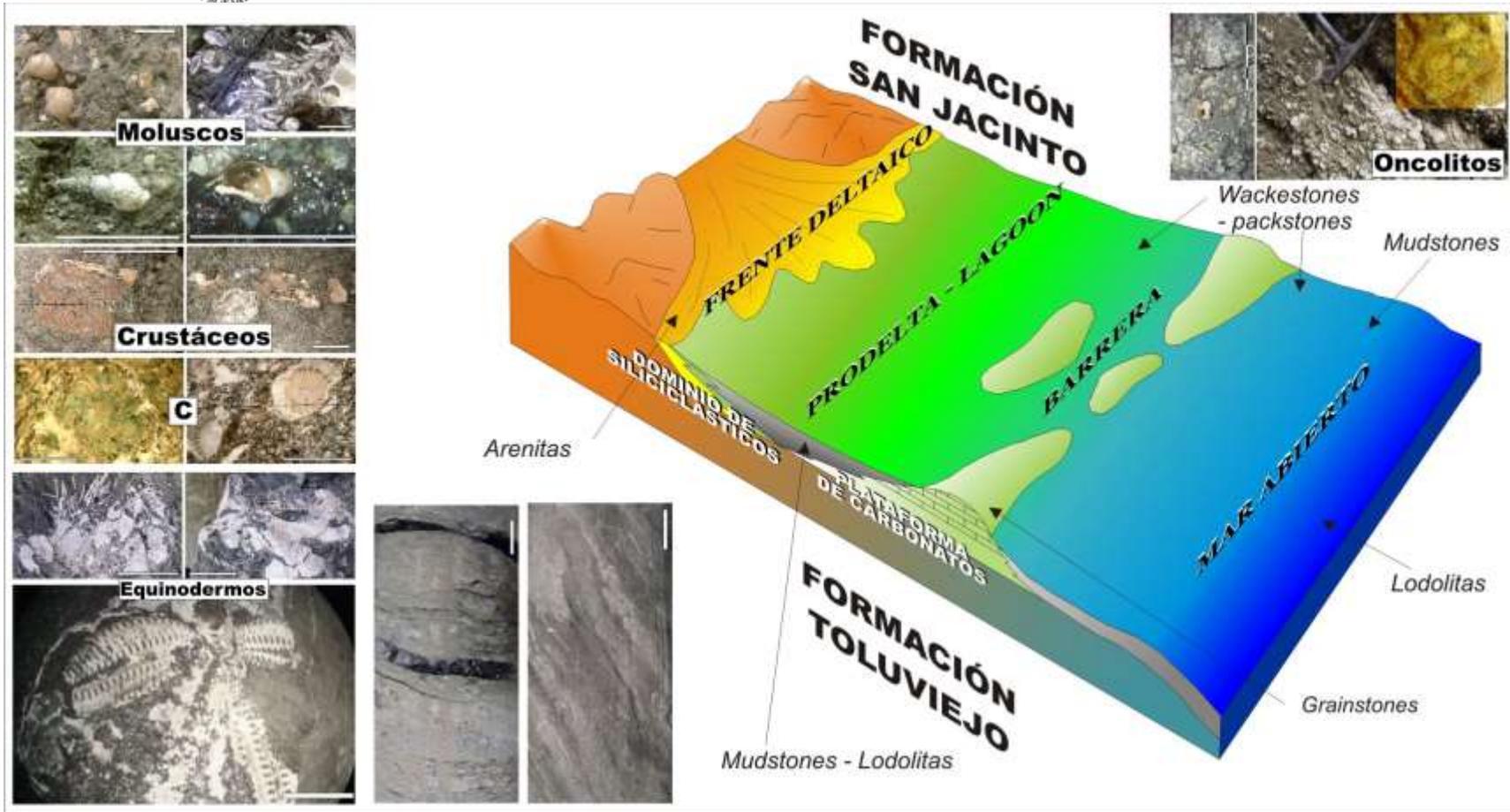
## **FORMACIONES EL FLORAL – CIÉNAGA DE ORO**

Las características litológicas, paleoambientales y paleontológicas de las formaciones El Floral y Ciénaga de Oro, permiten integrarlas como parte de un solo evento de sedimentación, en el cual estas unidades corresponden a variaciones faciales (facies heterópicas isócronas) entre secuencias arenosas y lutíticas.

En general la Formación El Floral está compuesta esencialmente por capas muy gruesas de lodolitas calcáreas masivas, fosilíferas, de color negro, ocasionalmente bioturbadas, con relictos de laminación plano paralela y abundantes pellets fecales glauconitizados (hasta un 5%). Ocasionalmente se encuentra muscovita, yeso secundario, fragmentos carbonosos, fosfatos, fracturas rellenas de calcita y estructuras deformativas de chocolate (*Boudinage*), así como intercalaciones menores de capas delgadas a muy gruesas (en ocasiones como secuencias grano-crecientes), de arenitas calcáreas masivas, con fósiles, pellets fecales glauconitizados, fosfatos, ocasionales restos carbonosos, así como esporádicas capas, muy delgadas, de wackestones y packstones masivos con pellets fecales glauconitizados. Los intervalos más gruesos, pueden constituir espesas secuencias amalgamadas de arenitas masivas, bioturbadas (madrigueras horizontales) o con laminación plano paralela, ondulada, lenticular y fláser.

La Formación Ciénaga de Oro, se compone principalmente de arenitas líticas laminadas (laminación plano paralela, ondulosa, fláser, wavy y lenticular), arenitas líticas y cuarzo arenitas masivas a bioturbadas de grano muy fino a fino y secuencias grano-decrecientes de arenitas líticas, de grano muy grueso a medio, localmente conglomeráticas.





**FIGURA 4.** Paleontología, facies y modelo paleoambiental para las formaciones Toluviejo - San Jacinto. Complementado con datos de ATG Ltda, 2009.

Presentan abundantes restos fósiles, pellets fecales glauconitizados, muscovita y láminas y fragmentos carbonosos. Los segmentos lodosos se componen de capas muy gruesas de lodolitas laminadas (laminación plano paralela, ondulada, lenticular y fláser), y masivas, localmente bioturbadas (madrigueras horizontales). Contienen fragmentos y láminas carbonosas, muscovita, concreciones y nódulos lodosos, arenosos y calcáreos, así como restos de moluscos, equinodermos, crustáceos, foraminíferos, pellets fecales glauconitizados y peces.

En forma subordinada se encuentran capas medias a muy gruesas, en ocasiones en secuencias grano-decrecientes, de wackestones y packstones bioclásticos masivos, y de conglomerados matriz-soportados masivos, polimícticos, con clastos de subredondeados a subangulosos, principalmente de cuarzo (hasta 90%), chert, y fragmentos de rocas sedimentarias.

### **PALEONTOLOGÍA Y EDAD**

En las rocas de las formaciones El Floral y Ciénaga de Oro, se encontró numeroso material fosilífero que incluye escafópodos, bivalvos, equinodermos, gasterópodos, isópodos, crustáceos y restos de peces, así como abundantes restos carbonosos y fragmentos vegetales. Los análisis palinológicos reportan la presencia de formas indicativas del Oligoceno tardío a la parte baja del Mioceno tardío. Por su parte los análisis bioestratigráficos de foraminíferos y nanoplancton calcáreo, permiten establecer que las formaciones El Floral y Ciénaga de Oro se acumularon entre el Oligoceno tardío y el Mioceno medio, edad más probable de depósito de estas unidades.



## **PALEOAMBIENTES DE DEPÓSITO**

De acuerdo al análisis facial y paleoambiental realizado, así como la abundancia de microfósiles de zona litoral, sumado a la presencia de dinoflagelados, material vegetal degradado, *foram linings*, elementos de manglar (*Spinizonocolpites*, *L. crassa*, *Zonocostites*) y los datos de foraminíferos y nanoplancton calcáreo, que indican sedimentación en paleoambientes marinos relativamente someros (en promedio con batimetrías menores a 50 m), sujetos a variaciones en la columna de agua, con alta productividad orgánica primaria y con dominio de sedimentación en zona litoral con influencia continental; se interpreta que la acumulación de estas rocas tuvo lugar entre la plataforma y el frente de playa inferior (para la Formación El Floral) y en ambientes deltaicos a marinos someros, para la Formación Ciénaga de Oro (Figura 5).

## **FORMACIÓN EL CERRITO**

Las rocas de la Formación El Cerrito, no fueron perforadas por ninguno de los pozos estudiados en este trabajo. En los pozos P4A y P14, los depósitos de la Formación Sincelejo, reposan en forma discordante sobre las formaciones Ciénaga de Oro y El Floral, respectivamente, evidenciando la erosión completa de las rocas de esta unidad en el área.

De acuerdo a *ATG Ltda, 2009, Cáceres y Porta, 1972; en Porta, 1974*, la describen como una alternancia de lutitas y areniscas grisáceas, en capas medias, compactas, con cemento calcáreo. La Formación El Cerrito, también es referida por la *Universidad de Caldas 2008 – 2009*, como Aloformación El Cerrito, asignándole una edad Mioceno tardío

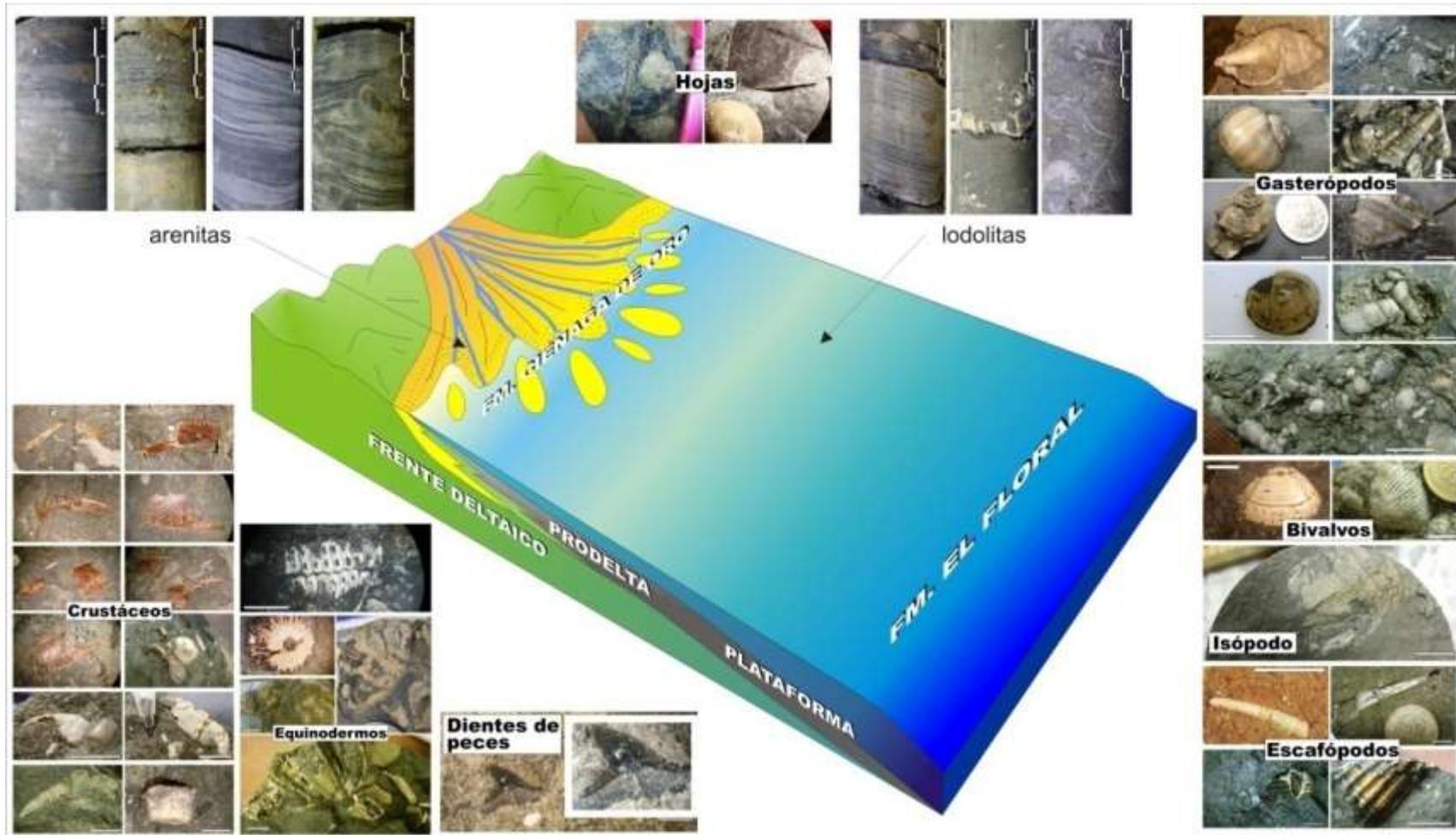


FIGURA 5. Paleontología, facies y modelo paleoambiental para las formaciones El Floral – Ciénaga de Oro.

y estableciendo un contacto localmente discordante con la infrayacente Aloformación Porquera (equivalente en el área con la Formación El Floral). La litología de esta unidad se describe como arenitas fosilíferas con bivalvos, foraminíferos bentónicos, carbón y siderita, incluyendo intercalaciones menores de shale.

### **FORMACIÓN SINCELEJO**

La Formación Sincelejo, específicamente su parte inferior y media, fue controlada en tres pozos, observándose que reposa en forma discordante sobre rocas de las formaciones Ciénaga de Oro y El Floral.

Los segmentos lodosos constituyen la facies más representativa de la unidad. Se componen de lodolitas masivas, localmente laminadas y bioturbadas, de color gris verdoso a verde, con moteados rojizos y cafés. Presentan muscovita, ocasionales fragmentos carbonosos, restos de plantas, fantasmas de raíces, numerosas capas de calcretas masivas y laminadas y estrías de fricción aisladas.

Los segmentos de arenitas constan de capas muy gruesas, en muchos casos dispuestas en secuencias grano-decrecientes, de arenitas líticas, friables (algunos núcleos están totalmente deshechos), poco consolidadas, masivas, con niveles bioturbados y ocasionalmente – particularmente en facies finas - con laminación plano paralela, ondulada y festoneada.

Niveles subordinados de conglomerados (aunque importantes en el pozo P4A), que además se desarrollan en la base de secuencias grano-decrecientes de arenitas, se componen de conglomerados masivos, matriz-soportados y poco consolidados, generalmente tamaño guijo, de color gris verdoso a gris oscuro, con clastos subredondeados de rocas

sedimentarias (limolitas y arenitas), rocas volcánicas y plutónicas, cuarzo lechoso y chert; presentan matriz arenosa, pobre selección y moderada a buena porosidad.

### **PALEONTOLOGÍA Y EDAD**

En las rocas de la Formación Sincelejo no se encontró ningún tipo de fragmento fósil; predominando los niveles con evidencias de pedogénesis que incluyen fantasmas de raíces y calcretas, que cuales sugieren afinidad con ambientes continentales. Los análisis palinológicos reportan la presencia de formas que sugieren una edad tentativa de Mioceno superior a Plioceno, aunque no hay elementos característicos del Plioceno. Por su parte los análisis bioestratigráficos, mucho más sensibles al retrabajo, reportan la presencia de elementos reelaborados desde el Eoceno hasta el Mioceno medio, por lo cual la edad de esta unidad ha de considerarse posterior a aquella de los elementos retrabajados. Este último dato, así como los de la bibliografía, sugieren que la Formación Sincelejo debió acumularse en el Plioceno.

### **PALEOAMBIENTES DE DEPÓSITO**

Los datos palinológicos reportan la presencia constante de materia amorfa, que indican una ambiente marino, con alto aporte de material vegetal; sin embargo, y como se mencionó anteriormente, los datos litoestratigráficos y micropaleontológicos indican un intenso retrabajamiento, de unidades del Eoceno al Mioceno medio. Los análisis de foraminíferos y nanoplacton calcáreo, resultaron estériles para las muestras de esta unidad; sin embargo muestran ausencia de cualquier indicador de salinidad y presencia de materia orgánica sapropélica continental, restos vegetales pobremente carbonizados, macroesporas

descompuestas, caliches, siderita y pátina carbonosa, que sugieren exposición aérea y procesos de domino continental, con condiciones de depósito en ambientes de baja energía.

De acuerdo a las facies observadas, se interpreta que las rocas de la Formación Sincelejo, controladas en los núcleos descritos en este estudio, se acumularon en ambientes fluviales que incluyen canales y barras, así como llanuras de inundación sometidas a procesos pedogénicos.

### **DISCUSION DE RESULTADOS**

El presente trabajo tiene un alcance local y regional, que implica importantes cambios en el conocimiento geológico de la región Caribe colombiana. A modo de historia evolutiva de la cuenca, se realiza una descripción de los procesos tecto-sedimentológicos y las unidades sedimentarias que registran la evolución geológica del área durante el Paleógeno y Neogeno.

Aunque en este trabajo no se estudiaron depósitos de la unidad sedimentaria más antigua de esta parte del Caribe colombiano (la Formación Cansona), sabemos por estudios recientes, que comprende una serie de depósitos marinos y deltaicos, relativamente someros (*ATG Ltda, 2009*), que se acumularon en forma discordante sobre el basamento durante el Campaniano – Maastrichtiano), interpretación contraria a la aceptada para el área, que plantea que las rocas de esta edad se acumularon en ambientes profundos, de hasta 2000 m de columna de agua. La Formación Cansona se adelgaza hacia el Este, en lo que parece ser una combinación del traslape de las facies transgresivas, sobre el basamento, y erosión durante la acumulación de la Secuencia del Paleógeno temprano.

A principios del Paleógeno (Paleoceno – Eoceno tardío), se produce una caída relativa del nivel del mar, que lleva al establecimiento en el área de sistemas deltaicos dominados por ríos, registrados en las rocas de la Formación Arroyo Seco y equivalentes. Depósitos agradacionales de abanico – delta (*fan-delta*), sugieren además tectónica activa, con desarrollo de fallas, que generan espacio de acomodación (aunque su extensión puede ser reducida y de importancia local). Esta interpretación contrasta con la de los modelos conocidos para el área, que plantean que la sedimentación de estas unidades ocurrió en ambientes mucho más profundos, y corresponden a turbiditas profundas. Sobre el límite oriental del CPSJ, procesos erosivos denudan el basamento, e incluso parte de las rocas de la previamente acumulada Formación Cansona, que de acuerdo a la composición de los clastos, presenta afinidad continental y no oceánica, como se pensaba anteriormente. Sobre estos sistemas deltaicos se establecieron ambientes de acumulación someros, incluso transicionales, y posiblemente hacia el Este, continentales; mientras que hacia el Oeste (borde occidental del CPSJ y el Cinturón Plegado del Sinú – CPS -) se profundizaban sobre la plataforma. A finales del Eoceno el nivel del mar asciende y, en la zona, los ambientes litorales se retraen hacia el Este, desarrollándose ahora una plataforma somera.

A finales del Eoceno un nuevo descenso relativo del nivel del mar, permite el establecimiento de ambientes de plataforma de carbonatos y sistemas deltaicos, que progradan sobre una plataforma somera (formaciones Toluviejo - San Jacinto y equivalentes); registrando un cambio en las condiciones tectónicas, que permiten la progradación de los lóbulos deltaicos y la formación de rampas de carbonatos, en ambientes más estables; situación que se extiende hasta bien entrado el Oligoceno. De nuevo, esta



interpretación contradice los modelos aceptados para el área, que postulan que la sedimentación tuvo lugar en ambientes marinos profundos (talud – batial) e incluso turbiditas.

Un rápido ascenso relativo del nivel del mar, ocurre a finales del Oligoceno, permitiendo la acumulación de lodolitas, en el área de ambientes marinos de plataforma relativamente somera (Formación El Floral y equivalentes), sobre el CPSJ, que hacia el Este varían facialmente a arenitas de ambientes litorales y deltaicos - fluviales que inician la sedimentación en el VIM, sobre el basamento continental. Dicho cambio facial ocurre cerca al borde oriental del CPSJ, hasta donde se extiende la Formación Ciénaga de Oro, y sobre la cual no se observa ninguna barrera tectónica de sedimentación, pudiendo incluso estar acumulada en forma discordante sobre unidades paleógenas propias del CPSJ, situación que plantea dudas sobre los límites de ambas cuencas y sobre la real posición del Sistema de Fallas de Romeral. Cabe recordar que el Sistema de fallas de Romeral se ha propuesto como límite tectónico y de sedimentación entre las cuencas del VIM y el CPSJ (y entre las placas Caribe y Suramericana), para separar provincias con basamento oceánico y continental, lo cual también queda en duda por la composición de los clastos de basamento erodado por la Formación Arroyo Seco.

Durante la mayor parte del Mioceno el nivel relativo del mar se mantiene elevado, permitiendo la acumulación de facies predominantemente lodosas de la Formación El Floral y, en el VIM, de la Formación Porquera.

Un descenso relativo del nivel del mar se plantea para finales del Mioceno, permitiendo la progradación, en el CPJS, de facies arenosas de ambientes litorales, representadas por la

Formación El Cerrito y equivalentes. Sin embargo esta secuencia ha sido erodada completamente en gran parte del área (los pozos estudiados no la registraron) por los depósitos continentales de la Formación Sincelejo, que localmente reposan en forma discordante angular sobre el resto de las unidades del Cenozoico. El tiempo de acumulación de esta unidad no se ha establecido claramente, pero se cree inició durante el Plioceno.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El análisis integral de cerca de 6000 m de perforación, permitió una caracterización geológica de las unidades estudiadas, evidenciando grandes inconsistencias en los modelos previamente aceptados para el área. Se recomienda extender trabajos de este tipo al resto de la región Caribe colombiana, combinándolos con estudios de superficie y de caracterización de reservorios y del sistema petrolífero, a la luz de los nuevos conocimientos.
- La Formación Arroyo Seco registra el establecimiento de sistemas deltaicos, durante el Paleoceno tardío – Eoceno tardío, que, hacia el Este, erodan hasta el basamento, registrando la denudación de rocas ígneas y metamórficas de afinidad continental. No se encontraron evidencias de sedimentación en ambientes profundos, y por el contrario es clara la relación con ambientes someros con influencia continental; sobre los que se desarrolló intensa actividad biológica de organismos de zona litoral.
- Se estableció claramente la relación estratigráfica (facies heterópicas isócronas) de la Formación Toluviejo con la Formación San Jacinto (y equivalentes), registrando la interdigitación de ambientes calcáreos y siliciclásticos, durante el Eoceno tardío - Oligoceno. Estas formaciones se acumularon en fondos de depósito someros, sobre



rampas de carbonatos y sistemas deltaicos, con desarrollo de ambientes muy ricos en actividad biológica de organismos de zona litoral.

- Las formaciones El Floral y Ciénaga de Oro, registran la acumulación de lodolitas y arenitas, respectivamente, durante un evento transgresivo ocurrido a finales del Oligoceno, que permite la sedimentación en ambientes marinos someros y deltaicos, sobre el límite entre el VIM y el CPSJ. La bioestratigrafía es clara en asociar estas dos unidades a un mismo evento de sedimentación, que se extiende hasta el Mioceno medio.
- La Formación El Cerrito, fue erodada completamente en el área, durante el depósito de la Formación Sincelejo, la cual se acumulo probablemente durante el Plioceno, en ambientes continentales sujetos a procesos pedogenéticos.
- Al igual que en trabajos anteriores se plantean dudas sobre la naturaleza oceánica del basamento en el CPSJ y los límites de este con el VIM. Con los trabajos recientemente adquiridos por la ANH, parece tomar forma la idea de una cuenca única para la región Caribe colombiana, donde se hace necesario revisar la importancia y posición del Sistema de Fallas de Romeral. Se recomiendan nuevas perforaciones en la zona límite entre ambas cuencas.

### **AGRADECIMIENTOS**

A la ANH, por la financiación de este trabajo y a su equipo técnico en especial al Dr. Andrés Pardo y al geólogo Juan José Gómez, como supervisores del proyecto, por su valiosa colaboración durante el transcurso del trabajo. Al profesor Francisco Vega Vera de la Universidad Nacional Autónoma de México, por su colaboración en la identificación preliminar del material paleontológico encontrado.



## REFERENCIAS

- Anderson, F. 1929. Marine Miocene and related deposits of North Colombia. *Proceedings Academy Natural Sciences. (4th ser.)* 18 (4): 73-213.
- ATG Ltda. 2009. *Cartografía geológica, levantamiento de columnas estratigráficas, toma de muestras y análisis bioestratigráficos. Sector de Chalán (Cuenca Sinú-San Jacinto)*. Reporte interno a la ANH.
- Beck, E. 1921. Geology and Oil Resources of Colombia, South America. *Economic Geology, Lancaster*. 16 (7): 465.
- Berggren, W.A., Kent, D. V., Swisher C.C.III, and Aubry, M.P., 1995. *A revised Cenozoic geochronology and chronostratigraphy. Society for Sedimentary Geology (SEPM) Special Publication*, 54:129-212.
- Berggren, W.A., and Pearson, P.N., 2005. A revised tropical and subtropical Paleogene planktonic foraminiferal zonation. *Journal of Foraminiferal Research*. 35(4):279-298.
- Blow, W.H., 1969. Late Middle Eocene to recent planktonic foraminiferal biostratigraphy. In: Brönniman, P. and Renz, R. R., Eds., *Proceedings of the First International Conference on Planktonic Microfossils*, Geneva, 1967, 199-422.
- Cerón, J. F., Kellog, J., and Ojeda. G. 2007. Basement configuration of the northwestern South America – Caribbean margin from recent geophysical data. *C&F – Ciencia, Tecnología y Futuro*. 3: 25-49.
- Chenevart, Ch. 1963. Les dorsales transverses anciennes de Colombie et leurs homologues d'Amérique latine. *Ecolgae Geologicae Helvetiae*, 56(2): 907-927.
- Duque, H. 1968. Observaciones generales a la bioestratigrafía y geología regional en los Departamentos de Bolívar y Córdoba, *Boletín de Geología*, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. 24: 76-77.
- Duque, H. 1972. Ciclos tectónicos y sedimentarios en el Norte de Colombia y sus relaciones con la Paleogeología, *Boletín Geológico Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras*. Bogotá. 19 (3): 1-23.
- ESRI-ILEX. 1995. *Evaluación Geológica Regional de la Cuenca del Sinú-San Jacinto*. Tres tomos. 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, 134 p.
- Jaramillo, C., and Rueda, M., 2008. *A Morphological Electronic Database of Cretaceous-Tertiary Fossil Pollen and Spores from Northern South America*, Colombian Petroleum Institute & Smithsonian Tropical Research Institute.
- Luna, O., Manrique, M., Laverde, F., Buchelli, F. y Rueda, M. 2001. *Informe Geológico Regional de la Provincia Petrolífera del Noroccidente Colombiano*. Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol). Bogotá. 301p.
- Martini, E., 1971 Standard Tertiary and Quaternary Calcareous Nannoplankton Zonation. En: Farinaci A. (Ed): *Proceeding of the 2nd Planktonic Conference*, Roma (1970) Edizioni Tectonsciencias. Roma, 2, 739-785.
- Oksanen, J., Kindt, R., and O'Hara, B., 2005. *Community Ecology Package, Package VEGAN*, R for Statistical Computing.
- Porta, J. 1974. *Léxico estratigráfico de Colombia*, Volume V, Fascicule 4 b. Colombia, (deuxième partie), Tertiaire et Quaternaire. Centre National De La Recherche Scientifique. 15, quai Anatole-France, 75700 PARIS, 690 p.
- R-Development-Core-Team, 2005. *R: A language and environment for statistical computing*: Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing.
- Traverse, A., 2007, *Paleopalynology*, Second Edition: Dordrecht, Springer, 813 p.
- Universidad de Caldas. 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. 2009. *Inventario, interpretación y evaluación de la información geológica disponible, elaboración de los paquetes técnicos y promocionales y acompañamiento en la ronda de áreas abiertas 2009. Área reservada Sinú - Urabá.* Reporte interno a la ANH.

Werenfels, A. 1926. A stratigraphical section through the Tertiary of Toluviejo, Colombia. *Eclogae Geologicae Helvetiae*. 20 (1): 80-81.

Zimmerle, W. 1968. Serpentine graywackes from the North Coast basin, Colombia, and their geotectonic significance, *Neues Jahrbuch für Mineralogie*. 109 (1-2): 156-182.

