

**RECONSTRUCCIÓN PALEOGEOGRÁFICA Y ANÁLISIS DE FACIES CON  
POTENCIAL PARA ACUMULAR HIDROCARBUROS EN LA FORMACIÓN  
GUADALUPE, FLANCO ORIENTAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL ENTRE  
VILLAVICENCIO Y GUAMAL(META).**

**ANDRÉS MARTÍNEZ HERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
MAESTRÍA EN GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2016**

**RECONSTRUCCIÓN PALEOGEOGRÁFICA Y ANÁLISIS DE FACIES CON  
POTENCIAL PARA ACUMULAR HIDROCARBUROS EN LA FORMACIÓN  
GUADALUPE, FLANCO ORIENTAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL ENTRE  
VILLAVICENCIO Y GUAMAL(META).**

**ANDRÉS MARTÍNEZ HERNÁNDEZ**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Magister en Geología**

**Director**

**ANDRÉS ROBERTO MORA BOHORQUEZ**

**Ph.D en Geología.**

**Co-Director**

**GIOVANY JIMENEZ DÍAZ**

**Ph.D en Geología.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FÍSICO QUIMÍCAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
MAESTRÍA EN GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2016**

# AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a mi familia que siempre esta apoyando mi camino, al Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) y a la empresa estatal del petróleo ECO-PETROL S.A. por financiar esta investigación y el tiempo de estudios del posgrado.

A los estudiantes de pregrado que me ayudaron con el trabajo de campo y que elaboraron sus trabajos de grado en el marco de esta investigación (Daniela, Luki, Adriana, Lucho, Mafe y Juan david).

A los profesor invitados de la maestría y a los de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander por su guía en el proceso de investigación.

A Paola Andrea por su constante compañía y apoyo, a mis amigos y compañeros de cohorte.

# Índice general

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>16</b>
<b>1. OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
1.1. Objetivo general . . . . .	17
1.2. Objetivos Específicos . . . . .	17
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>18</b>
2.1. Localización del área de estudio. . . . .	18
2.2. Marco de referencia. . . . .	19
2.2.1. Marco teórico. . . . .	19
2.2.2. Marco Geológico. . . . .	27
<b>3. METODOLOGÍA.</b>	<b>40</b>
3.1. Recopilación de información. . . . .	41
3.2. Fase de campo. . . . .	41
3.2.1. Levantamiento de columnas estratigráficas. . . . .	42
3.2.2. Toma de <i>Gamma Ray</i> de afloramiento. . . . .	45
3.3. Fase de oficina. . . . .	46
3.3.1. Organización de la información adquirida en el campo. . . . .	46
3.3.2. Estratigrafía y sedimentología de las columnas. . . . .	48
3.3.3. Correlaciones estratigráficas. (afloramientos-registros eléctricos)	51
3.3.4. Mapas de facies, espesores. . . . .	53
3.3.5. Reconstrucción Paleogeográfica. . . . .	53
<b>4. RESULTADOS</b>	<b>54</b>
4.1. Identificación de facies . . . . .	54
4.2. Definición de electrofacies. . . . .	65
4.3. Sistemas de depósito. . . . .	66
4.3.1. Interpretación del sistema de depósito. . . . .	66
4.4. Correlaciones estratigráficas . . . . .	68
4.5. Facies con potencial para acumular hidrocarburos. . . . .	83

4.6. Mapas Paleogeográficos . . . . .	87
4.6.1. Nivel 1 (Base de la secuencia). . . . .	87
4.6.2. Nivel 2. . . . .	87
4.6.3. Nivel 3. . . . .	90
4.6.4. Nivel 4(Tope de la secuencia). . . . .	90
<b>5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.</b>	<b>93</b>
5.1. Facies y ambiente de depósito. . . . .	93
5.2. Facies con potencial para acumular hidrocarburos. . . . .	94
5.3. Paleogeografía. . . . .	95
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	<b>96</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>98</b>

# Índice de figuras

1.	Mapa Geológico con la localización del área de estudio. . . . .	19
2.	En esta imagen se ilustran y explican los principios básicos en el estudio de las rocas estratificadas: principio de identidad paleontológica, principio de continuidad lateral, principio de superposición, principio de intersección, principio de inclusión. . . . .	21
3.	Ejemplo del concepto de facies. En esta imagen se muestra una sucesión de facies dentro de una sección estratigráfica. . . . .	22
4.	Modelo de facies para sistemas estuarinos. En esta imagen se ilustra como son las condiciones energéticas dentro de este sistema, los subambientes y los tipos de facies asociados a cada uno de estos. . . .	23
5.	Registro <i>Gamma Ray</i> , la imagen muestra la respuesta de un registro <i>Gamma Ray</i> (curva de la izquierda), los valores menores (sombreados con amarillo) son lecturas asociadas a litologías predominantemente arenosas, las lecturas más altas (sombreadas con café), son asociadas a litologías más arcillosas. . . . .	26
6.	Modelo evolutivo regional desde el Devónico hasta el Mioceno. De abajo hacia arriba se muestra las fases de deformación y sedimentación con las direcciones preferentes de aporte de sedimentos. . . . .	28
7.	Miembros Arenitas de San Antonio y Lodolitas de Aguacaliente, en la Quebrada San Antonio-San Luis de Gaceno. . . . .	33
8.	Mapa Geológico con la localización de la sección tipo del Grupo Guadalupe. . . . .	34
9.	Mapa Geológico con la localización de las secciones medidas en el Piedemonte Llanero y pozo con núcleo de roca que se midieron y describieron. . . . .	43
10.	Muestra de núcleo descrito, encerrados en círculos rojos se observan intraclastos inmersos en los <i>foresets</i> de la laminación inclinada planar. . . . .	44
11.	Apariencia gráfica de la aplicación <i>Sedlog</i> , la gráfica muestra las diferentes columnas que pueden ser incluidas en el dibujo de la sección. . . . .	45

12.	Dispositivo portátil para medición de rayos Gamma. Con este es posible tomar lecturas individuales de concentración de Torio en ppm, Uranio en ppm y Potasio en porcentaje, además de la lectura total de los Rayos Gama en cuentas por hora (nGy/h). . . . .	46
13.	Toma del Registro de rayos Gamma en afloramiento (GR), la fotografía ilustra la forma en como se coloca el dispositivo sobre el afloramiento para realizar la medición, toda el área del cilindro detector debe estar en contacto con la superficie sobre el afloramiento a medir. . . . .	47
14.	Columna del pozo Akacias Estratigráfico 1, en esta se muestran las tres secciones definidas con base en lo descrito para este grupo en otra localidades y también se señala la zona palinológica definida (línea azul). Este último esta por debajo de lo que se denominó Guadalupe Superior debido a que esta zona puede ir más arriba, solo que con palinomorfos no es posible mostrar ya que la recuperación de muestras en arenitas es casi nula. . . . .	56
15.	Facies identificadas en el núcleo de roca. A) Arenitas con laminación inclinada (S x), B) Arenitas con bioturbación (S biot), C) Arenitas con intraclastos (S intr), D) Lodolita bioturbada (M biot). . . . .	57
16.	Columna de la Quebrada Las Blancas, en esta se indican las tres subdivisiones realizadas para esta sección: Guadalupe Inferior, Guadalupe Medio y Guadalupe Superior. También se indica con la línea azul la zonificación bioestratigráfica, la cual delimita el Cretácico y el Paleoceno. . . . .	58
17.	Sección Quebrada Sagú, en la imagen se muestra la columna medida, las subdivisiones realizadas en este trabajo y los límites datados mediante palinología. El segmento denominada Guadalupe Superior aparece interrogado debido a que la edad de esta zona es indeterminada. . . . .	60
18.	Columna del Caño Blanco. En la imagen se muestran los segmentos definidos en este trabajo (líneas negras) y las zonas definidas mediante palinología (líneas azules). En esta sección se observa una variación lateral de facies. . . . .	62
19.	A) Arenita con laminación inclinada (S x), B) Arenita con laminación Herringbone (S h), C) Arenita bioturbada (S biot) con <i>Thalassinoides</i> , D) Arenita con intraclastos (S intr), E) Arenita con ondulaciones (S r), F) Arenita bioturbada (S biot) con <i>Ophiomorfas</i> , G) Lodolita laminada (M lam), H) Arenita con laminación ondulosa (S w), I) Lodolita bioturbada (M biot). . . . .	64

20.	Electrofacies obtenidas a partir de registros de rayos Gamma y calibración con roca en afloramiento. En la imagen se nota que los valores más bajos en el registro (a la izquierda) corresponde a arenitas, los más altos (a la derecha) a lodolitas y donde se intercalan valores altos y bajos a heterolíticos. . . . .	65
21.	Comparación del modelo de estuarios de Boyd et al., 2006 con la estratigrafía descrita en este trabajo. En esta imagen se muestra la comparación de la asociación de facies descritas en este trabajo con la asociación de facies del modelo citado. Se nota que las zonas asociadas a la cuenca central y a la boca del estuario se pueden identificar en las columnas de este trabajo. . . . .	67
22.	Mapa de ubicación de las correlaciones y los pozos: las correlaciones (azul), pozos (puntos negros). . . . .	68
23.	Correlación Uno (1). Los limites marcados como base Dinogymnium-Droserites y techo Cerodinium-Dinogymnium son biozonas, los demás son horizontes guías determinados en este trabajo para correlacionar. Se observa como el espesor en general aumenta en dirección Noreste (aproximadamente de 200m a 580m), los espesores por electrofacies no muestran una tendencia marcada, por el contrario se notan aumentos y disminuciones a lo largo de la sección. . . . .	70
24.	Correlación Dos (2). Los limites marcados como base Dinogymnium-Droserites y techo Cerodinium-Dinogymnium son biozonas, los demás son horizontes guías determinados en este trabajo para correlacionar. Se observa como el espesor en general disminuye en dirección Sureste (aproximadamente de 190m a 55m), los espesores por electrofacies muestran tendencias diferente, donde lo más relevante es que aparecen paquetes delgados aislados de arenitas y un aumento significativo en el espesor de las lodolitas y las electrofacies heterolíticas en el centro de la sección. . . . .	72
25.	Correlación Tres (3). Los limites marcados como base Dinogymnium-Droserites y techo Cerodinium-Dinogymnium son biozonas, los demás son horizontes guías determinados en este trabajo para correlacionar. Se observa como el espesor en general disminuye en dirección Sureste (aproximadamente de 210m a 55m), los espesores por electrofacies muestran tendencias diferente, lo más notorio es que las arenitas están restringidas a la zona Noroeste y se adelgaza al Oriente. . . . .	74

26. Correlación Cuatro (4). Los limites marcados como base Dinogymnium-Droserites y techo Cerodinium-Dinogymnium son biozonas, los demás son horizontes guías determinados en este trabajo para correlacionar. Se observa como el espesor en general disminuye en dirección Sureste (aproximadamente de 135 m a 100 m), los espesores por electrofacies muestran tendencias diferente, lo más notorio es que las arenitas muestran dos tendencias una a la base y otra al techo. Al techo, la arenitas disminuye en sentido Sureste y a la base aumenta en esta misma dirección. . . . . 76
27. Correlación Cinco (5). Los limites marcados como base Dinogymnium-Droserites y techo Cerodinium-Dinogymnium son biozonas, los demás son horizontes guías determinados en este trabajo para correlacionar. Se observa como el espesor en general es mas o menos homogéneo, con un pequeño adelgazamiento al Noreste(aproximadamente de 127 m a 92 m), los espesores por electrofacies muestran tendencias diferente, lo más notorio es que la arenitas aparece en dos niveles un al techo y otra a la base. Al techo la arenita disminuye en sentido Noreste ligeramente, con un aumento aislado en el pozo Chichimene Sw-1 y a la base disminuye en la misma dirección. . . . . 78
28. Correlación Seis (6). Los limites marcados como base Dinogymnium-Droserites y techo Cerodinium-Dinogymnium son biozonas, los demás son horizontes guías determinados en este trabajo para correlacionar. Se observa como el espesor en general aumenta en dirección Noreste (aproximadamente de 27 m a 100 m), los espesores por electrofacies muestran tendencias diferente, lo más notorio es que las arenitas muestran tres niveles principalmente al Norte. Donde los mayores espesores aparecen en el pozo Meta-1. . . . . 80
29. Correlación Siete (7). Los limites marcados como base Dinogymnium-Droserites y techo Cerodinium-Dinogymnium son biozonas, los demás son horizontes guías determinados en este trabajo para correlacionar. Se observa como el espesor en general disminuye en dirección Sureste (aproximadamente de 35 m a 13 m), los espesores por electrofacies muestran tendencias muy similares a la general, lo más notorio es que las arenitas estan restringidas a la base del pozo mas al Norte (Luna Roja-1). . . . . 82

30.	Mapa de espesor de facies de arenitas. El color purpura representa los valores más altos y el rojo los valores menores. En este mapa se observa que los mejores espesores de las facies arenosas se encuentran ubicadas en la parte Norte de la zona. De igual manera se nota que en la parte media en los extremos Oriental y Occidental hay espesores con menor potencia, pero no despreciables. . . . .	84
31.	Mapas de arenitas por cada uno de los niveles usados para correlacionar. En esta imagen se muestran los mapas asociados a los intervalos mapeados. 1) Entre la base Dinogymnium-Droserites y base lodolitas, se observa que los mejores espesores para este nivel se encuentran al Oriente y Occidente predominantemente en la zona media. 2) Entre la base lodolitas y el techo lodolitas, en este la arena prácticamente esta ausente. 3) Entre techo lodolitas y techo heterolíticos aparecen espesores considerables en varios puntos de la zona, los cuales están predominantemente desde la parte media hacia el Norte sin llegar hasta el limite del área en ese sentido. También se observan algunos espesores interesantes en la esquina Suroccidental. 4) Entre techo heterolíticos y techo Cerodinium-Dinogymnium), en este nivel se encuentran los mejores espesores los cuales se agrupan al Norte y al Noroccidente. . . . .	86
32.	Mapa paleogeográfico para el nivel más basal. En este nivel se observa la distribución arenosa formando un cinturón que asemeja un valle aluvial, el cual se encuentra rodeado de las facies más finas (lodolitas) y las facies de Llanura mareal que están representadas por las facies heterolíticas. . . . .	88
33.	Mapa paleogeográfico para el nivel 2. En esta se observa el predominio de las facies más finas (lodolitas), las facies arenosas se ven como un relicto en la parte media del área y las facies heterolíticas al frente de estas en la parte Noroccidental. . . . .	89
34.	Mapa paleogeográfico al nivel 3. En este nivel se muestra claramente la predominancia de las facies heterolíticas, las cuales se encuentran alrededor del cinturón de facies arenosas. Las facies más finas (lodolitas) aparecen en las curvas interiores de cinturón de arenas. . . . .	91
35.	Mapa paleogeográfico al nivel del tope de la secuencia. En este mapas no se observa una buena distribución de las facies, esta es debido posiblemente a que el techo de este nivel es erosivo lo que genera un caos debido a este proceso de cambio en el paisaje. . . . .	92

# LISTA DE TABLAS

1.	Tabla de espesores en trabajos publicados para la Formación Guadalupe.	35
2.	Tabla de datación para la Formación Guadalupe. . . . .	37
3.	Tabla de datación para el Grupo Guadalupe. . . . .	38
4.	Tabla de ambientes de depósito para la Formación Guadalupe. . . . .	38
5.	Tabla de ambientes de depósito para el Grupo Guadalupe. . . . .	39
6.	Tabla de espesores medidos en las localidades trabajadas. . . . .	44
7.	Tabla para la estandarización de la nomenclatura de facies, en la tabla se relacionan la textura, los atributos (estructuras sedimentarias, bioturbación, trazas fósiles, <i>pellets</i> , etc.), también se muestran algunos ejemplos para la implementación de los códigos establecidos en las dos columnas finales. . . . .	49
8.	Tabla para la estandarización de la nomenclatura de facies, en la tabla se relacionan la textura, los atributos (estructuras sedimentarias, bioturbación, trazas fósiles, <i>pellets</i> , etc.), también se muestran algunos ejemplos para la implementación de los códigos establecidos en las dos columnas finales. . . . .	50
9.	En esta tabla se relacionan los cutoffs usados para la discriminación de cada una de las electrofacies identificadas. . . . .	53

## RESUMEN

**Título:** Reconstrucción paleogeográfica y análisis de facies con potencial para acumular hidrocarburos en la Formación Guadalupe, flanco oriental de la Cordillera Oriental entre Villavicencio y Guamal (Meta).<sup>1</sup>

**Autor:** Andrés Martínez Hernández<sup>2</sup>

**Palabras claves:**

Cordillera Oriental, Formación Guadalupe, facies, paleogeografía, registro de rayos Gama.

**Descripción:**

Las actuales regiones del Valle Medio del Magdalena (VMM), la Cordillera Oriental (CO) y la Cuenca de los Llanos constituyen una gran región sedimentaria desde el Triásico hasta el Mioceno Medio. La cual cuenta con buenas posibilidades de prospección para la exploración de hidrocarburos. Para lo cual en este trabajo se elaboró la reconstrucción paleogeográfica de una zona comprendida entre Villavicencio y Guamal (Meta).

Para realizar dicha reconstrucción se describió y midió 3 columnas estratigráficas en las Quebradas Sagú, Las Blancas y en el Caño Blanco, las cuales se encuentran en el municipio de Acacias-Meta. También se describió un núcleo de roca de un pozo en la cuenca y se usaron los registros de rayos Gama de 22 pozos de una zona de la cuenca comprendida entre las localidades anteriormente mencionadas. Con esto se elaboró un modelo de facies el cual fue interpretado como un depósito de un sistema estuarino controlado por mareas.

Como base en el modelo y mapas de facies se elaboraron los mapas paleogeográficos, los cuales corresponden a diferentes intervalos de tiempo. Además de esto se elaboraron mapas de espesores de arena y se identificaron las mejores zonas con mayor posibilidad de presencia de rocas con facies potencialmente acumuladores de hidrocarburos.

---

<sup>1</sup>Trabajo de grado

<sup>2</sup>Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Andrés Roberto Mora Bohorquez.

## ABSTRACT

**Title:** Reconstruction paleogeographic and analisis of facies with potencial for accumulate hydrocarbons in the Guadalupe Formation, side eastern of the Cordillera Oriental between Villavicencio and Guamal (Meta).<sup>3</sup>

**Author:** Andrés Martínez Hernández<sup>4</sup>

**Keywords:**

Cordillera Oriental, Guadalupe Formation, facies, paleogeographic, logs Gamma Ray.

**Description:**

Current regions of Medium Valley of Magdalena (VMM), the Cordillera Eastern (EC) and the basin of the Llanos make up a great region sedimentary since Triassic to Medium Miocene. Which have good possibilities of prospection for hydrocarbons exploration. For which in this job it elaborated the reconstruction paleogeographic of a zone between Villavicencio and Guamal (Meta).

For do this reconstruction it described and measured three stratigraphic columns in the Brooks Sagú, Las Blancas and Canyon Blanco, those Brooks are in the town Acacias-Meta. As well it described a core of a well in the basin and it used the Gamma ray logs of 22 wells of a zone basin. With this it elaborated a facies model, which it interpreted like a deposit of estuary controlled for tides.

With the model and maps of facies it elaborated the paleogeographic maps, which correspond to diferent time intervals. Also of this it elaborated thickness maps of sand and it recognize the better zones with higher posibilidad of presence the rocks with facies potencially acumulated of hydrocarbons.

---

<sup>3</sup>Degree work

<sup>4</sup>Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Advisor: Andrés Roberto Mora Bohorquez.

## INTRODUCCIÓN

Las actuales regiones del Valle Medio del Magdalena (VMM), la Cordillera Oriental (CO) y la Cuenca de los Llanos constituyen una gran región sedimentaria desde el Triásico hasta el Mioceno Medio. El desarrollo de la cuenca inició en el Triásico hasta el Cretácico temprano con una megasecuencia depositada durante la etapa de *synrift* durante la separación de Sur y Norte América y continua en el Cretácico en una configuración de *Backarc* (Cooper et al., 1995). Desde Cretácico Tardío el margen Noroeste de Sur América ha estado sometido a múltiples fases de deformación compresional la cual se estima culminando en el Plioceno-Pleistoceno. En la última fase (Mioceno-Pleistoceno) de esta deformación se crea la Cordillera Oriental de Colombia. Dicha deformación forma trampas en la CO con potencial prospectivo para generar exploración (Dengo and Covey, 1993). Este modelo evolutivo ha sido documentado y estudiado usando diferentes enfoques y métodos, aportando en cada estudio datos que fortalecen este modelo de evolución (Branquet et al., 2002; Cortés et al., 2005; Sarmiento-Rojas et al., 2006; Horton et al., 2010; Bayona et al., 2013).

Actualmente no se conoce muy bien cómo era la paleo-geografía de esta zona para el Cretácico Superior (Campaniano-Maastrichtiano), representado en el Grupo Guadalupe que es el objeto de esta investigación. Esta unidad estratigráfica ha sido estudiada por varios autores. (Julivert, 1962a; Pérez et al., 1978; Guerrero et al., 1996) han realizado descripciones sedimentológicas y estratigráficas en algunos sectores de la CO, sin llegar a hacer una reconstrucción paleo-geográfica. Conocer la paleo-geografía donde se depositó el Grupo Guadalupe, ayudará a entender la distribución espacial de las facies con mejores características para acumular hidrocarburos y con base en esta reconstrucción poder predecir futuras zonas de exploración.

## 1 OBJETIVOS

### 1.1. Objetivo general

Reconstruir la paleogeografía y realizar un análisis de facies con potencial para acumular hidrocarburos en las Formación Guadalupe, que sirva como una herramienta predictiva para la búsqueda de nuevos recursos.

### 1.2. Objetivos Específicos

- Realizar el análisis estratigráfico para las Formación Guadalupe mediante el levantamiento de columnas estratigráficas y electrofacies en registros eléctricos.
- Reconocer relaciones genéticas en las Formación Guadalupe, mediante la elaboración de mapas de facies.
- Reconocer e identificar la distribución de las facies con mejores propiedades para acumular hidrocarburos, mediante la correlación de facies arenosas del Piedemonte Llanero y Llanos Sur.

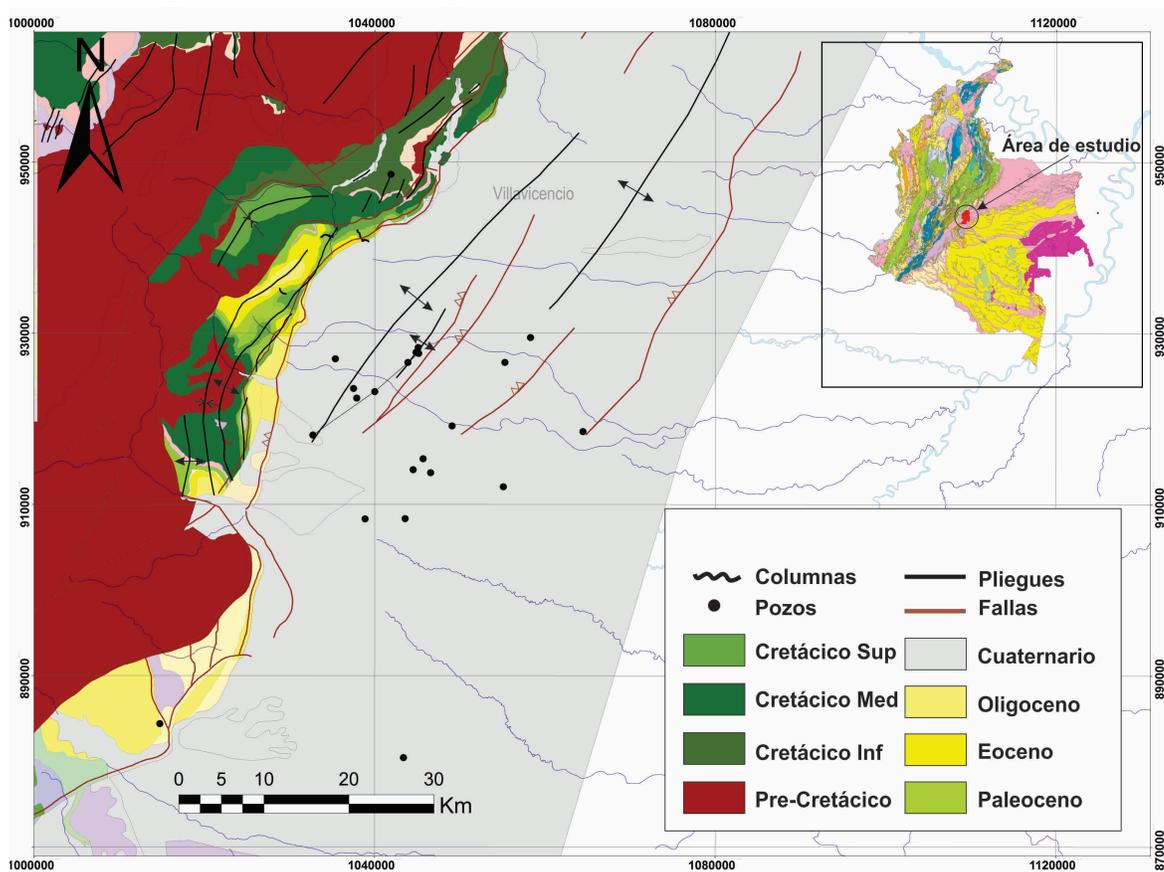
## 2 ANTECEDENTES

### 2.1. Localización del área de estudio.

El área de trabajo en esta investigación comprende básicamente 4 bloques petroleros que son administrados por la compañía estatal ECOPETROL S.A., estos son: LLA 36, LLA 37 al Norte, el bloque Cubarral y CPO 9. Estos bloques incluyen terreno en el Piedemonte Llanero y la Cuenca de los Llanos Orientales. El área de la zona de estudio esta compuesta por rocas del Cretácico Superior, Paleoceno y Eoceno, que afloran en el Piedemonte Llanero. En la zona de la Cuenca de los Llanos Orientales, además se completa la secuencia hasta el Cuaternario (Ver figura 1).

Las zonas donde se levantaron las secciones estratigráficas pertenecen al municipio de Acacias en el Departamento del Meta.

**Figura 1:** Mapa Geológico con la localización del área de estudio.



Fuente: Base geológica tomada de (Mora, 2007)

## 2.2. Marco de referencia.

### 2.2.1. Marco teórico.

Los conceptos necesarios para la elaboración de esta investigación son de uso habitual dentro de la comunidad geológica. A continuación se enumeran y definen brevemente conceptos como:

- Estratigrafía.
- Facies.
- Modelamiento de facies.
- Registros eléctricos.
- *Gamma Ray (GR)*.

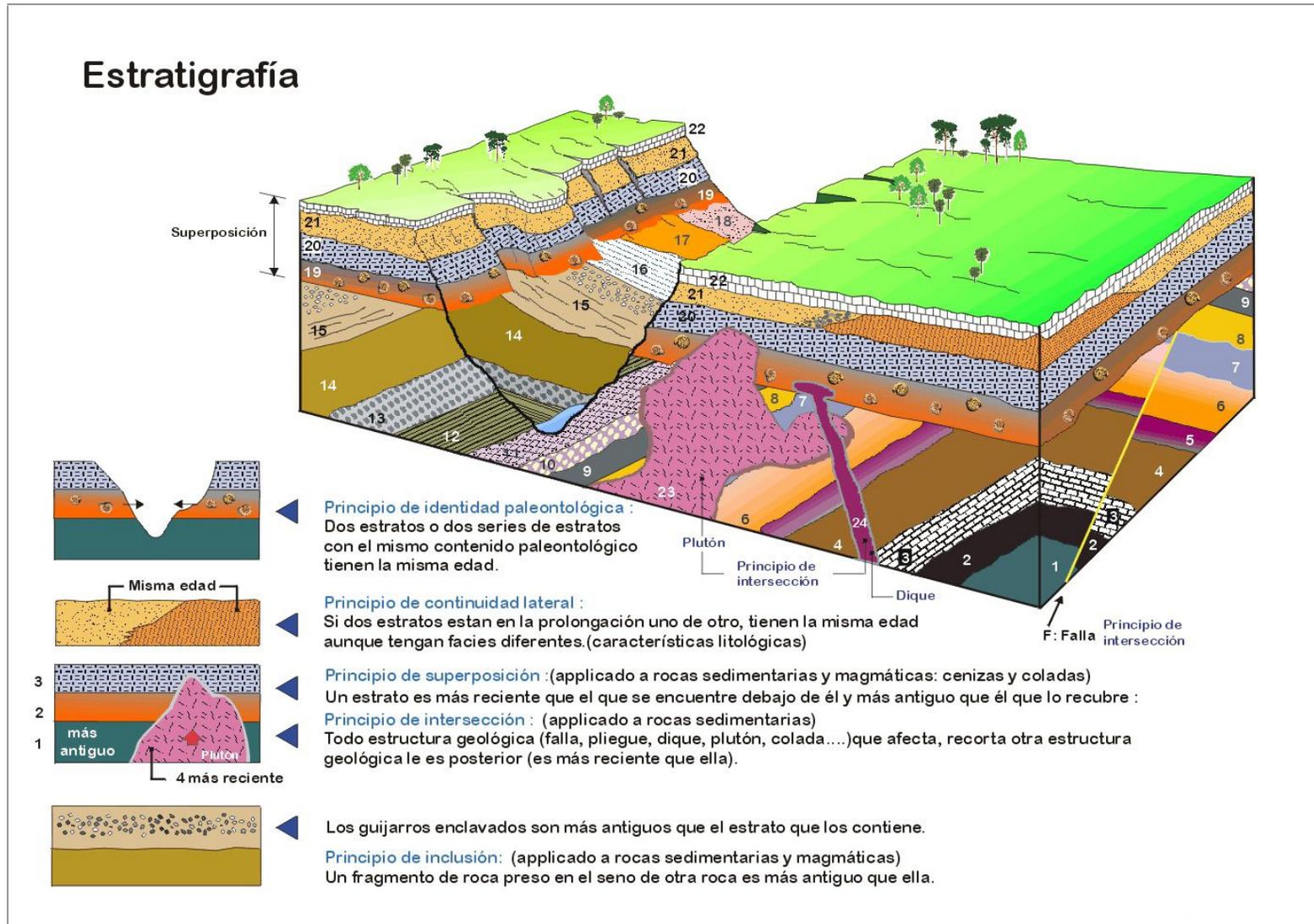
## **Estratigrafía.**

La estratigrafía es el estudio de las rocas como estratos, es decir las rocas cuando están sucesivamente formadas, esta rama de la geología pretende conocer el orden y las condiciones de formación de los estratos y su correlación entre diferentes unidades en distintas áreas de una cuenca. Esta rama de la geología a su vez está dividida en diferentes disciplinas, como lo son: Litoestratigrafía, Bioestratigrafía, Cronoestratigrafía, Magnetoestratigrafía, Quimioestratigrafía, Estratigrafía secuencial. Esta investigación está basada principalmente en la Litoestratigrafía, la cual es la encargada de estudiar la geometría de los cuerpos y su génesis con el apoyo de la Estratigrafía Secuencial, ya que ella brinda el apoyo necesario para reconocer los grandes eventos registrados en el registro de roca (Vera, 1994).

Para el estudio de las rocas estratificadas se deben tener en cuenta varios principios básicos que ordenan su entendimiento y dan tanto sentido, como soporte a las observaciones en los conjuntos de capas. Dichos principios se enumeran a continuación y son explicados en la imagen (Ver figura2).

- Principio de identidad paleontológica.
- Principio de continuidad lateral.
- Principio de superposición.
- Principio de intersección.
- Principio de inclusión.

**Figura 2:** En esta imagen se ilustran y explican los principios básicos en el estudio de las rocas estratificadas: principio de identidad paleontológica, principio de continuidad lateral, principio de superposición, principio de intersección, principio de inclusión.

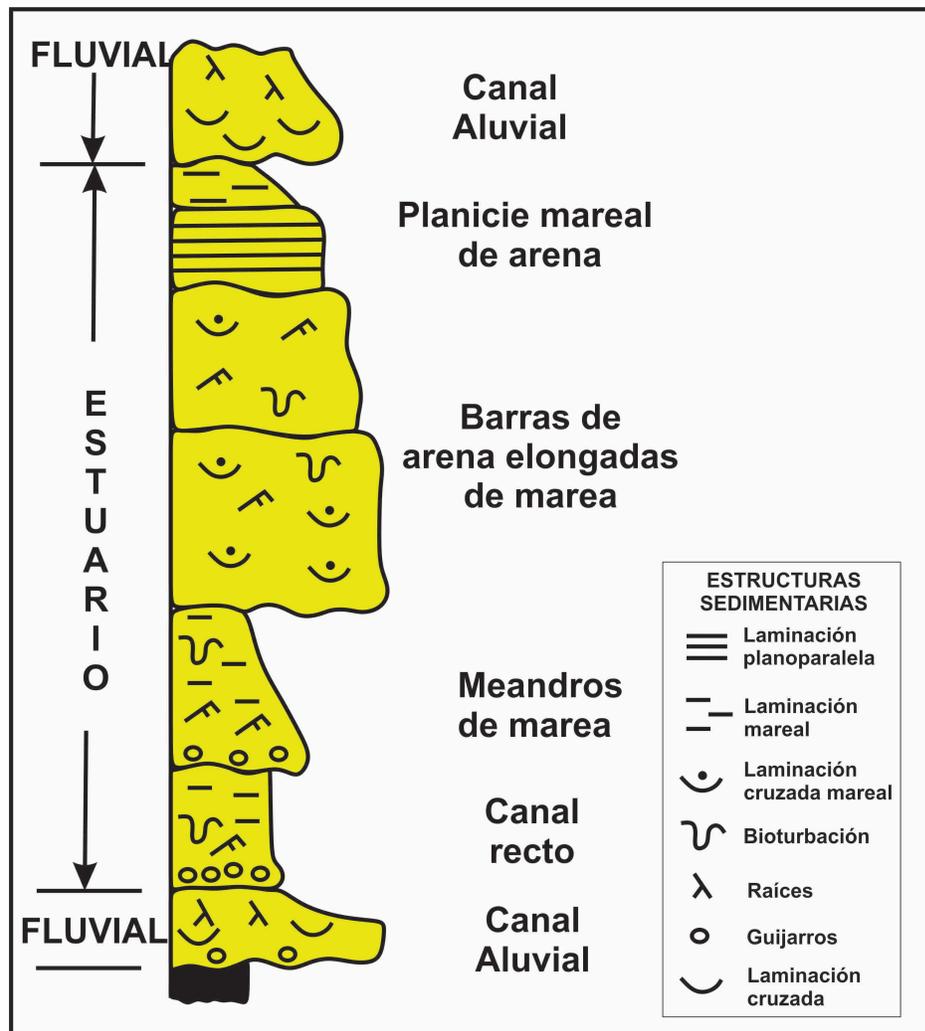


Fuente: Tomado de blog Echino.

## Facies.

El concepto de Facies hace referencia a todos los aspectos de una parte de la superficie de la tierra en un intervalo de tiempo geológico (Teichert, 1958). (Gressly, 1841), introduce una nueva visión y dice que una facies es la suma total de todos los aspectos litológicos y paleontológicos de una unidad estratigráfica (Ver figura 3). Para llegar al entendimiento de las condiciones en que se formaron los diferentes estratos se deben realizar analogías con los procesos geológicos modernos como lo propuso (Posamentier, 2006).

**Figura 3:** Ejemplo del concepto de facies. En esta imagen se muestra una sucesión de facies dentro de una sección estratigráfica.

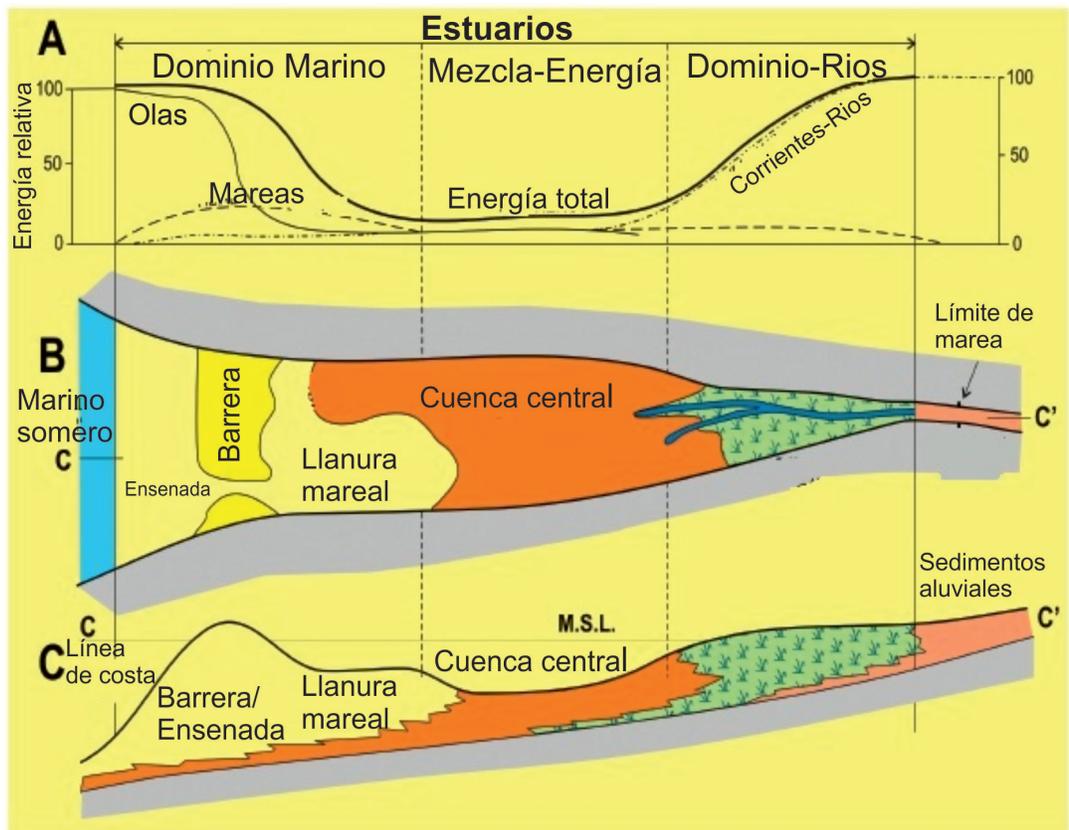


Fuente: Tomado y modificado de (Boyd et al., 2006).

## Modelamiento de facies.

El término “*Facies model*” fue introducido por Paul Potter en 1959. (Potter, 1959), plantea que la existencia de diferentes asociaciones sedimentarias da la posibilidad de asignar un modelo a cada asociación realizando principalmente énfasis en las características litológicas y en su distribución espacial, para con esto poder encontrar relaciones secuenciales entre las asociaciones. (Potter, 1959) también puntualiza que es muy importante en las primeras etapas de la exploración geológica implementar un modelo que permita la predicción de litologías de interés. El modelo de facies también es de gran utilidad en la determinación del ambiente en el cual fueron depositadas dichas rocas en una escala y tiempo determinado (Posamentier, 2006) (Ver figura 4).

**Figura 4:** Modelo de facies para sistemas estuarinos. En esta imagen se ilustra como son las condiciones energéticas dentro de este sistema, los subambientes y los tipos de facies asociados a cada uno de estos.



Fuente: Tomado y modificado de (Boyd et al., 2006).

## **Registros eléctricos.**

Los registros eléctricos son usados en la industria petrolera desde mediados del siglo pasado, y desde entonces se han ido introduciendo diferentes avances en las técnicas y en los dispositivos (Schlumberger, 1989).

Para evaluar la productibilidad de un reservorio, es necesario conocer como es el flujo de los fluidos a través de un sistema poroso. Esta propiedad de las rocas sedimentarias la cual depende de cómo es la interconexión de los poros se llama permeabilidad.

Los principales parámetros para evaluar un reservorio son la porosidad, saturación de hidrocarburos, espesor, área, permeabilidad, la geometría del reservorio, la temperatura y la presión a la cual se encuentra la formación de interés y por supuesto la litología son de gran importancia para realizar dicha evaluación (Schlumberger, 1989).

En el espectro de registros eléctricos hay diferentes principios físicos empleados para el funcionamiento de la herramienta, de igual manera tiene diferentes aplicaciones y usos. En esta investigación se pretende identificar tipos de roca en registros eléctricos, para lo cual se usara el más común en esta tarea, el registro *Gamma Ray*.

### **Gamma Ray (GR).**

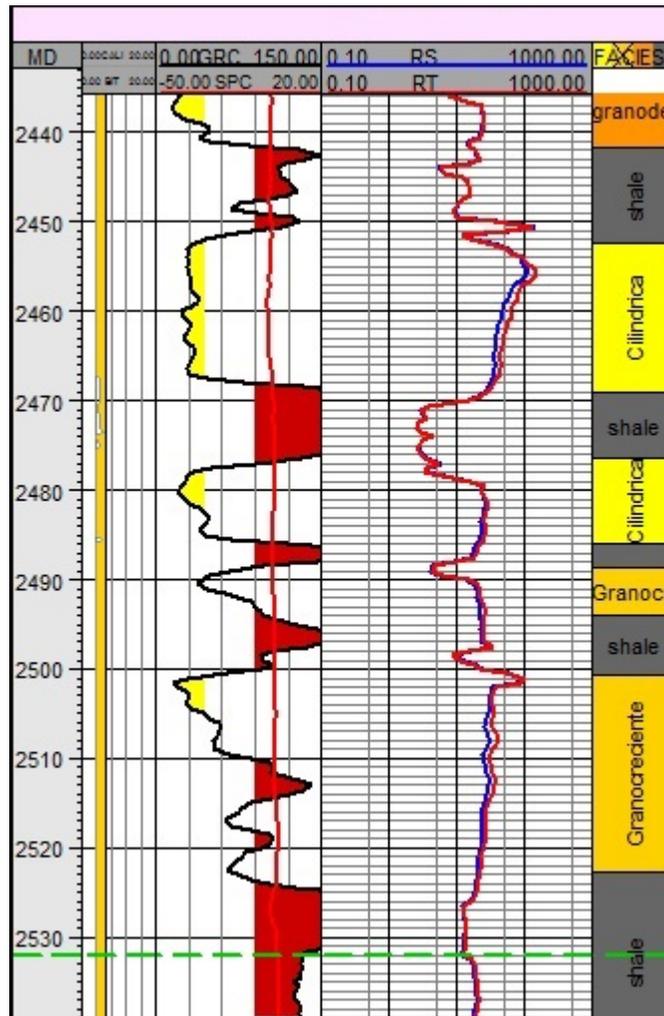
La curva de *Gamma Ray* es un registro que mide la emisión natural de rayos gamma o la radioactividad natural de las rocas en el subsuelo. Todas las rocas emiten cierta cantidad de radioactividad natural la cual depende de la concentración de potasio, torio y uranio. Hay dos tipos de registros *Gamma Ray*, uno que es conocido como *Standard GR Log* el cual mide la radioactividad total. El otro es conocido como *Spectral Gamma Ray*, este mide la radioactividad total y las concentraciones del potasio, torio y el uranio que producen dicha radioactividad.

En rocas sedimentarias este registro normalmente refleja el contenido de *shale* de la formación. Esto es porque los elementos radioactivos tienden a acumularse en arcillas y *shales*. Las formaciones limpias usualmente tienen bajos niveles de radioactividad, a menos que la formación tenga sales radioactivas disueltas en el agua alojada en los poros.

Los rayos *gamma* son explosiones de ondas electromagnéticas de alta energía que son emitidas espontáneamente por algunos elementos radioactivos. Casi toda la radiación encontrada en la tierra es emitida por el isotopo con peso atómico de 40 (K40) y por los elementos radioactivos de las series de torio y uranio. Cada uno de estos elementos emiten rayos *gamma*, pero la cantidad de energía es distinta en cada elemento, el potasio es el único que emite un valor constante de energía, mientras que el torio y el uranio emiten cantidades variables de esta. A medida que los rayos se propagan estos van perdiendo energía debido a la colisión con otros átomos de la formación. Cuando los rayos han perdido suficiente estos son absorbidos por otro átomo presente en la formación debido al efecto fotoeléctrico. La cantidad de energía absorbida depende de la densidad de la formación, las menos densas pueden ser ligeramente más radioactivas (Schlumberger, 1989).

Este registro será utilizado en esta investigación, para reconocer electrofacies en las formaciones objetivo que se encuentran en el subsuelo y que estén perforadas y registradas en los pozos existentes en la zona de estudio (Ver figura 5).

**Figura 5:** Registro *Gamma Ray*, la imagen muestra la respuesta de un registro *Gamma Ray* (curva de la izquierda), los valores menores (sombreados con amarillo) son lecturas asociadas a litologías predominantemente arenosas, las lecturas más altas (sombreadadas con café), son asociadas a litologías más arcillosas.



Fuente: Tomado y modificado de (Martinez, 2012).

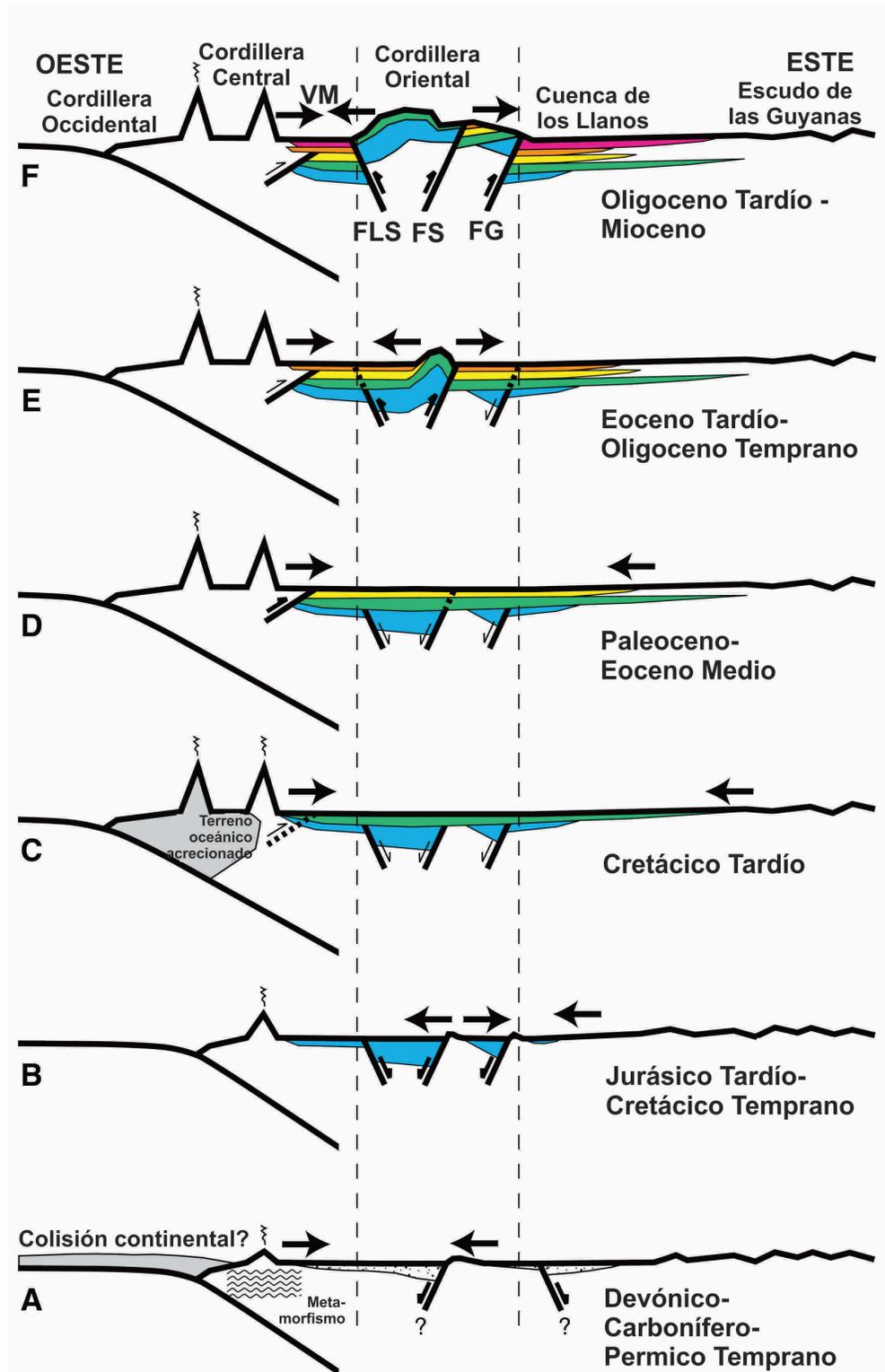
## 2.2.2. Marco Geológico.

### Evolución geológica regional.

Las actuales regiones del Valle Medio del Magdalena (VMM), la Cordillera Oriental (CO) y la Cuenca de los Llanos constituyen una gran región sedimentaria desde el Triásico hasta el Mioceno Medio, el desarrollo de la cuenca inició en el Triásico y hasta el Cretácico temprano con una megasecuencia depositada durante la etapa de *synrift* y continua en el Cretácico en una configuración de *Backarc* (Cooper et al., 1995) (Ver figura 3.6b a 3.6f). Esta Cuenca durante el Mesozoico estuvo marcada por cinco pulsos de extensión de la Litosfera (Sarmiento-Rojas et al., 2006). Desde el Cretácico Tardío el margen Noroeste de Sur América ha estado sometido a múltiples fases de deformación compresional, las cuales presentan dos tendencias de esfuerzos regionales; una es N-S en el Sinclinal de Guaduas y otra NE-SW en la Sabana de Bogotá (Cortés et al., 2005) (Ver figura 3.6c a 3.6f). En la última fase (Mioceno-Pleistoceno) de esta deformación se crea la Cordillera Oriental de Colombia (Ver figura 3.6f). Dicha deformación forma trampas en la CO con potencial prospectivo para generar exploración (Dengo and Covey, 1993). Como resultado de la deformación Andina, las fallas extensionales del Cretácico temprano fueron reactivadas como fallas inversas (Branquet et al., 2002). La inversión de la estructura extensional del Mesozoico en el Norte de los Andes controló la localización de la sucesión *syn-orogenic* y dispersión de detritos desde el Maastrichtiano más tardío (Bayona et al., 2013).

Los regímenes de sedimentación y proveniencia de sedimentos ha estado cambiando a través del tiempo. Para la fase tardía del *rift* y *post-rift* de edad Cretácica se observa un cambio que pasa de fuentes locales del basamento Andino a orígenes en el Cratón (Horton et al., 2010) (Ver figura 6).

**Figura 6:** Modelo evolutivo regional desde el Devónico hasta el Mioceno. De abajo hacia arriba se muestra las fases de deformación y sedimentación con las direcciones preferentes de aporte de sedimentos.



Fuente: Tomado y modificado de (Horton et al., 2010).

## Estratigrafía.

### Grupo Guadalupe.

El Grupo Guadalupe de edad Cretácica ha sido descrita por varios autores en diferentes localidades sobre la Cordillera Oriental. El Grupo Guadalupe ha sido descrita principalmente en la parte central de la Cordillera Oriental, donde se encuentra su sección tipo. De igual manera se ha descrito en el Piedemonte Llanero.

(Hubach, 1952), habla para este grupo en la región de la Sabana de Bogotá de dos conjuntos típicos, los cuales denomina como conjunto superior y conjunto inferior. El conjunto superior está compuesto de areniscas y Plaeners y el conjunto inferior es arcilloso con intercalaciones de horizontes y bancos de arenisca cuarzosa. Se describen tres horizontes en el conjunto superior, el más superior es La Arenisca Tierna. El horizonte inferior es la Arenisca Dura, esta es una sucesión de areniscas de grano fino que se vuelve especialmente dura hacia la base.

(Julivert, 1962b), describe la sucesión en El Boquerón. El miembro el Raizal (Arenisca Dura), compuesto por areniscas de grano muy fino a fino intercaladas con niveles de lutitas a veces silíceas (porcelanitas). Por encima del miembro el Raizal se encuentra el Nivel de Plaeners con unos 100 m de espesor, la parte inferior es exclusivamente de lutitas y porcelanitas, la parte más superior son más ricos en areniscas y afloran menos. Por encima en sucesión estratigráfica continua una serie de areniscas que corresponde a la Arenisca de Labor, entre los grandes bancos de arenisca que forman este nivel se encuentran intercalados niveles de lutitas y porcelanitas. El último paquete de estas lutitas y porcelanitas separa la Arenisca de Labor de las Arenisca Tierna. La Arenisca Tierna es de tamaño de grano grueso hasta muy grueso con estratificación cruzada y *ripple-marks*.

De igual manera (Julivert, 1962a), mediante un estudio petrográfico de los miembros Arenisca de Labor y Tierna concluye que la Arenisca de Labor se ha depositado bajo condiciones constantes de relativa poca agitación, mientras que la Arenisca Tierna se depositó en un medio más agitado y bajo el efecto de corrientes de intensidad variable y llegada de material grueso al área. Este cambio en las condiciones es posiblemente debido a la pérdida de profundidad, que conduce progresivamente a la pérdida de las condiciones marinas dando lugar a la aparición de carbones en la Formación Guaduas y más arriba a condiciones de depósitos continentales. Julivert concluye que la estratigrafía en esta región es en todo semejante a las demás localidades en la Sabana de Bogotá, tanto por los niveles presentes como por los espesores.

(Ujueta, 1961), realiza un estudio de la geología del Noreste de Bogotá, en este describe los cuatro miembros tradicionales del Grupo Guadalupe: Arenisca Dura, Nivel de Plaeners, Arenisca de Labor, Arenisca Tierna. La Arenisca Dura en esta localidad tiene un espesor aproximado de 380 m. El nivel de Plaeners lo describe como arcillas azulosas con abundantes foraminíferos, bancos de chert, arcillas grises, marrones grises y azulosas, blancas y grises verdosas. La Arenisca de Labor está compuesta por arcillas y arcillas silíceas con pequeñas laminas del mismo material pero más endurecido y silíceas, con apariencia de chert. Este autor mide 90 m de la Arenisca Tierna, este miembro consta de areniscas blancas con intercalaciones arcillosas y arcillo-arenosas. En algunos puntos las areniscas se muestran algo limolíticas, producto de la alteración de la glauconita.

(Etayo, 1964), reporta una edad imprecisa para el miembro Raizal o Arenisca Dura como Campaniano y Santoniano, de igual manera para el nivel de Plaeners reporta una edad Maastrichtiano inferior.

(Pérez et al., 1978), realizan al oriente de Bogotá un estudio detallado de facies basado principalmente en las estructuras sedimentarias de este grupo con el cuál proponen el ambiente de depositación de este grupo. (Pérez et al., 1978) realizan una descripción detallada de las facies de los diferentes miembros de la Formación Guadalupe.

En el miembro Arenisca dura reconocen bancos muy gruesos de areniscas con intercalaciones de limolitas, Lodolitas, liditas y arcillolitas las cuales reposan concordantemente con la sucesión de la Formación Chipaque. Las areniscas son predominantemente de grano muy fino. A este miembro se asigna un ambiente de depósito marino somero o sublitoral.

El nivel de Plaeners lo describen como sucesión de arcillolitas silíceas, liditas en menor proporción limolitas y areniscas. Para este nivel interpretan un ambiente de depósito de llanuras de lodo formadas por corrientes de marea que transportan sedimentos finos sobre la costa y los depositan en las partes más someras.

La Arenisca de Labor está compuesta por areniscas arcillosas grisáceas a blancas, de grano muy fino con intercalaciones de arcillolitas y Lodolitas. El ambiente de sedimentación asignado a este miembro son llanuras mezcladas, en general la profundidad de sedimentación corresponde a la zona litoral a infralitoral con una tasa de depositación más rápida que en la Arenisca Dura con períodos cortos y recurrentes de sedimentación lenta, corrientes fuertes y turbulentas.

La Arenisca Tierna está constituida por intercalaciones de areniscas, Lodolitas y arcillolitas finamente interestratificadas. (Pérez et al., 1978) concluyen finalmente que el ambiente de depósito de la Formación Guadalupe se enmarca fisiográficamente en una llanura de marea.

(Guerrero et al., 1996), dividen el Grupo Guadalupe en el Piedemonte Llanero en tres nuevas unidades litoestratigráficas que de base a tope se denominan: Formación Arenitas de San Antonio, Formación Lodolitas de Aguacaliente y Formación Arenitas de San Luis de Gaceno (Ver figura 7). Estos autores sugieren no dividir los miembros mencionados anteriormente como Arenisca de Labor y Arenisca Tierna como formaciones independientes ya que esto ha generado errores en correlación con otras formaciones que en realidad tienen otra posición estratigráfica. Describen dichas formaciones en el área de San Luis de Gaceno.

Las Arenitas de San Antonio en su localidad tipo (Quebrada San Antonio) están compuestas principalmente por cuarzoarenitas. En este nivel la bioturbación en general es intensa en donde se presentan intercalaciones lodosas.

El miembro denominado Lodolitas de Aguacaliente debe su nombre a su carácter predominantemente lodolítico, adicionalmente se observa bioturbación, lentes de calcita y pirita.

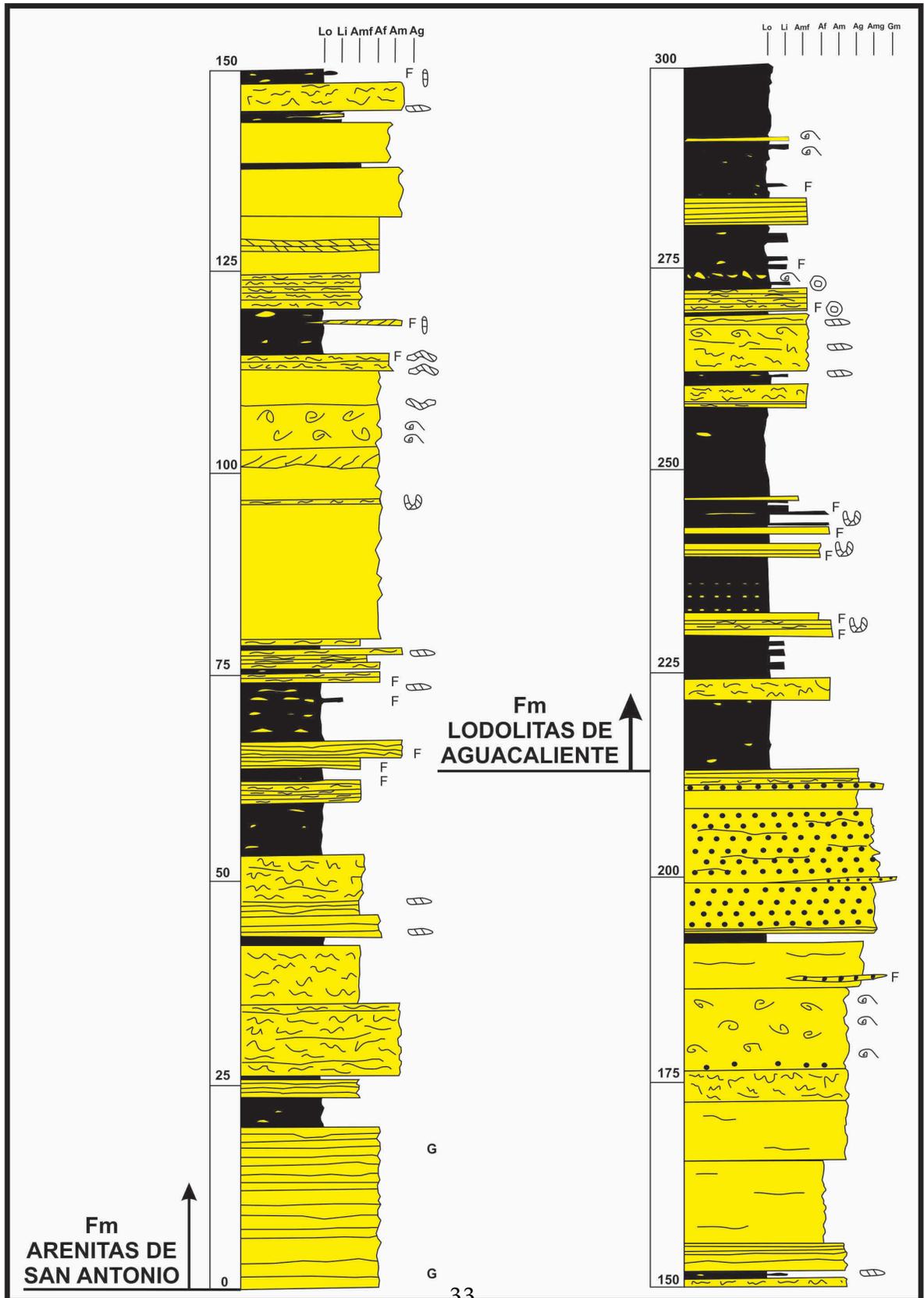
Las Arenitas de San Luis de Gaceno deben su nombre a su composición arenítica y a la población de San Luis de Gaceno y está compuesta principalmente por cuarzoarenitas de grano muy grueso. También se aprecia bioturbación, algunos ichnofosiles, estratificación cruzada, eventualmente se observan algunas capas de arenita fina con láminas discontinuas y lenticulares de Lodolitas con ondulitas.

Los autores finalmente concluyen que estas nuevas formaciones constituyen un equivalente lateral de granulometría notoriamente más gruesa y corresponden estratigráficamente con las Formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Labor-Tierna.

(Vergara et al., 1997), realizaron un estudio petrográfico para el Grupo Guadalupe encontrando para el miembro Arenisca Dura, que los procesos diagenéticos a los cuales estuvo sometida fueron principalmente físicos, dentro de estos la compactación. Los procesos químicos incluyen sobrecrecimientos sintaxiales de sílice y los físico-químicos se manifiestan en la solución-presión evidente en los contactos saturados de las muestras. Esto indica que estas rocas estuvieron sometidas a diferentes etapas diagenéticas. Los autores encontraron que la porosidad primaria para este nivel del Grupo Guadalupe es muy baja, pero

no lo descartan como reservorio ya que contemplan la posibilidad de acumulación debida al fracturamiento.

**Figura 7:** Miembros Arenitas de San Antonio y Lodolitas de Aguacaliente, en la Quebrada San Antonio-San Luis de Gaceno.



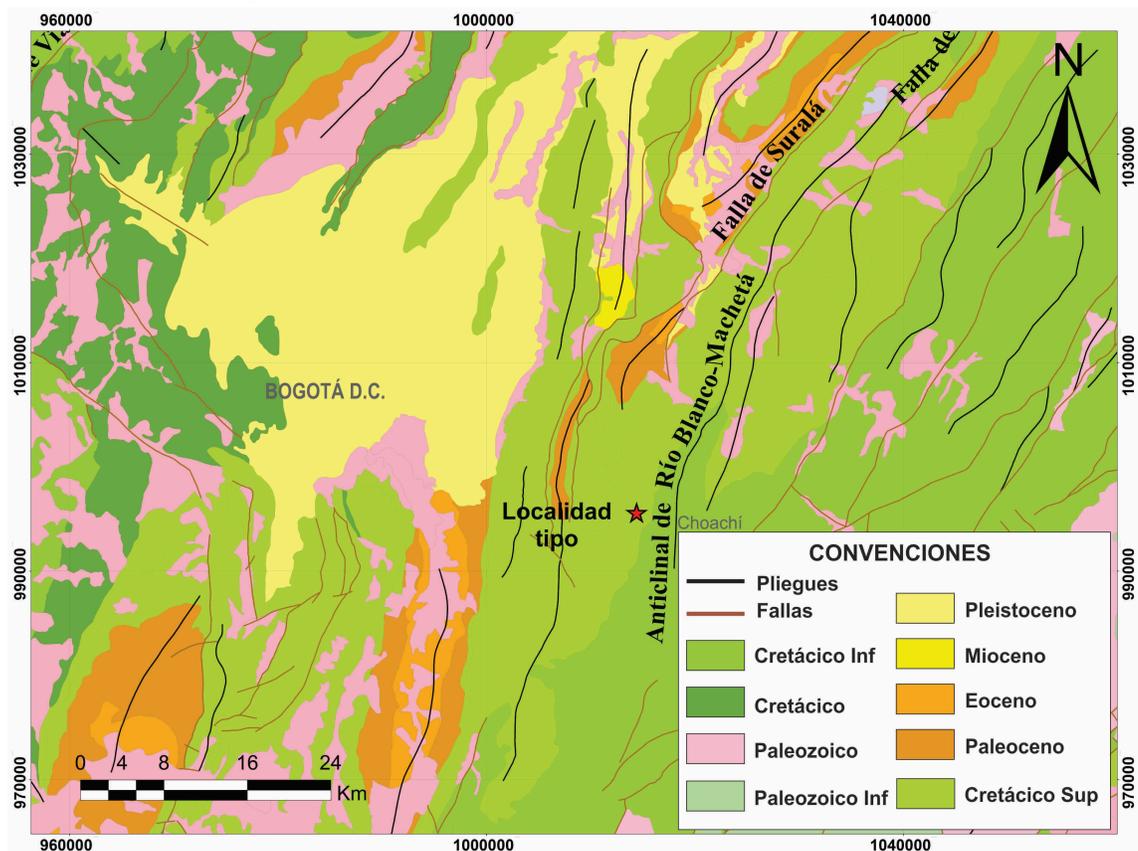
Fuente: Tomado y modificado de (Guerrero et al., 1996).

## Aspectos relevantes del Grupo Guadalupe.

### Localidad tipo.

La localidad tipo para los miembros superiores de este grupo se encuentra ubicada en Cundinamarca, en la vía que de La Calera conduce a Choachí entre los lugares conocidos como el Cerro Guadalupe y el Páramo del Rajadero (Ver figura8).

**Figura 8:** Mapa Geológico con la localización de la sección tipo del Grupo Guadalupe.



Fuente: Tomado del Servicio Geológico Colombiano, 2015.

### Litologías descritas.

Las litologías descritas para este Grupo por los diversos trabajos sobre ella han sido principalmente, areniscas, liditas arcillosas, *cherts*, lutitas (*shales*), arcillolitas, lodolitas. Cabe resaltar que se observan tres grandes grupos de litologías, por un lado están las areniscas que son de diferentes granulometrías, las de tipo químicas como son las formadas principalmente por sílice y las de granulometrías más finas (arcillas y limos).

### **Facies descritas.**

Ninguno de los autores citados anteriormente habla o describe explícitamente facies sedimentarias en sus estudios. (Pérez et al., 1978) en su artículo hablan de facies, pero no se presenta una relación de ellas con su debida nomenclatura, se limitan a nombrar las litologías encontradas y las estructuras físicas descritas para la determinación del posible ambiente de sedimentación únicamente.

### **Espesores reportados.**

A continuación se muestra una relación de los espesores reportados en la literatura (Ver tabla 1):

**Tabla 1:** Tabla de espesores en trabajos publicados para la Formación Guadalupe.

<b>Autor(es)</b>	<b>Año</b>	<b>Formación</b>	<b>Localidad</b>	<b>Espesor(m)</b>
<b>Hubach</b>	1957	Guadalupe	Sabana de Bogotá	<b>520</b>
<b>Ujueta</b>	1961	Guadalupe	Noreste de Bogotá	<b>775</b>
<b>Julivert</b>	1962	Guadalupe	Serranía de Chía	<b>420</b>
<b>Peréz-Salazar</b>	1976	Guadalupe	Oriente de Bogotá	<b>750</b>
<b>Guerrero y Sarmiento</b>	1996	Guadalupe	San Luis de Gaceno	<b>522</b>

Fuente: Varios autores.

### **Definición de unidades.**

A través del tiempo los diferentes autores han descrito y definido de diferente manera las unidades del Grupo Guadalupe.

(Hubach, 1952), habla de dos conjuntos:

- Superior.
- Inferior.

El conjunto superior está compuesto de areniscas y Plaeners y el conjunto inferior es “esquisto-arcilloso” con intercalaciones de horizontes y bancos de arenisca cuarcítica.

(Ujueta, 1961), describe cuatro miembros. Que son los tradicionalmente conocidos:

- Arenisca Dura.
- Nivel de Plaeners.
- Arenisca de Labor
- Arenisca Tierna.

(Julivert, 1962b), de igual manera habla de cuatro Miembros, listados a continuación:

- El Raizal.
- Nivel de Plaeners.
- Arenisca de Labor.
- Arenisca Tierna.

(Pérez et al., 1978), utiliza los Miembros que tradicionalmente han sido definidos:

- Arenisca Dura.
- Nivel de Plaeners.
- Arenisca de Labor.
- Arenisca Tierna.

(Guerrero et al., 1996), definen y dividen el Grupo Guadalupe en tres nuevas formaciones en el Piedemonte Llanero, considerando que estas son variaciones laterales de las tradicionalmente descritas en la Cordillera Oriental. A continuación se menciona dicha división:

- Formación Arenitas de San Antonio.
- Formación Lodolitas de Aguacaliente.
- Formación Arenitas de San Luis de Gaceno.

Estos autores sugieren no dividir los miembros Arenisca de Labor y Arenisca Tierna como formaciones independientes ya que esto ha generado errores en correlación con otras formaciones que en realidad tienen otra posición estratigráfica.

### Edad asignada para este grupo.

Algunos autores han dado diferentes edades para este grupo y sus formaciones y miembros, básicamente con base en estudios paleontológicos, con especies microscópicas y macroscópicas.

(Hubach, 1952), asigna al conjunto superior Campaniano mediante foraminíferos, para el horizonte medio asigna Santoniano, mediante amonitas, foraminíferos y lamelibranquios.

(Etayo, 1964), reporta una edad imprecisa para el miembro Raizal o Arenisca Dura como Campaniano y Santoniano, de igual manera para el nivel de Plaeners reporta una edad Maastrichtiano inferior.

(Pérez et al., 1978), reporta para los miembros de esta formación edades basada en paleontología, esta con base al trabajo de (Etayo, 1964) y con base en un estudio palinológico de Diana Gutierrez en 1973 (comunicación verbal)(Ver tabla 2).

**Tabla 2:** Tabla de datación para la Formación Guadalupe.

<b>Miembro</b>	<b>Edad</b>	<b>Método</b>
Arenisca Dura	Campaniano	Paleontología
Plaeners	Maastrichtiano Inferior	Palinología
Arenisca de Labor	Maastrichtiano Inferior	Palinología
Arenisca Tierna	Maastrichtiano Inferior	Palinología

Fuente: Tomado de (Pérez et al., 1978).

(Guerrero et al., 1996), reportan edades con base a estudios palinológicos, para dicho Grupo, a continuación una relación (Ver tabla 3):

**Tabla 3:** Tabla de datación para el Grupo Guadalupe.

<b>Formación</b>	<b>Edad</b>	<b>Método</b>
Arenitas de San Antonio	Campaniano Temprano	Palinología
Lodolitas de Aguacaliente	Campaniano Tardío	Palinología
Arenitas de San Luis de Gaceno	Maastrichtiano Temprano	Palinología

Fuente: Tomado de (Guerrero et al., 1996).

#### **Ambientes de depósito.**

(Hubach, 1952), propone un ambiente marino para esta Grupo.

(Pérez et al., 1978), estos autores concluyen finalmente que el ambiente de depósito de la Formación Guadalupe se enmarca fisiográficamente en una llanura de marea. A continuación se relacionan los ambientes que dichos autores determinaron para cada Miembro (Ver tabla 4).

**Tabla 4:** Tabla de ambientes de depósito para la Formación Guadalupe.

<b>Miembro</b>	<b>Ambiente de depósito</b>
Arenisca Dura	Marino somero
Plaeners	Llanura mareal (Lodosa)
Arenisca de Labor	Litoral-Infralitoral
Arenisca Tierna	Canales meandriformes (Influencia mareal)

Fuente: Tomado de (Pérez et al., 1978).

(Guerrero et al., 1996), interpretan el ambiente de depositación para este Grupo. A continuación se relacionan los ambientes que dichos autores determinaron para cada Formación (Ver figura 5.

**Tabla 5:** Tabla de ambientes de depósito para el Grupo Guadalupe.

<b>Formación</b>	<b>Ambiente de depósito</b>
Arenitas de San Antonio	Marino somero
Lodolitas de Aguacaliente	Marino somero (debajo del acción oleaje-tormentas)
Arenitas de San Luis de Gaceno	Frente de playa-Llanura costera

Fuente: Tomado de (Guerrero et al., 1996).

### 3 METODOLOGÍA.

La metodología seguida en este trabajo incluye trabajo de campo, el cual se realizó en una zona del Piedemonte Llanero, donde fueron levantadas 3 columnas estratigráficas con registro de rayos Gama de afloramiento. El resto del área fue cubierta con información de registros eléctricos.

La metodología que se llevó a cabo en este trabajo de investigación está dividida en varias fases: en primer lugar se llevó a cabo la búsqueda de información publicada acerca de la zona y del tema, luego se realizó la adquisición de la información en el campo y finalmente la organización de la información colectada en campo, al análisis de ella y posteriormente la organización para ser presentada como producto final del trabajo. A continuación se enumeran las fases:

- Recopilación de información.
- Fase de campo
  - Levantamiento de columnas estratigráficas (3).
  - Toma de *Gamma Ray* de afloramiento.
- Fase de oficina.
  - Organización de la información adquirida en el campo.
  - Estratigrafía y sedimentología de las columnas.
    - Descripción de facies.
    - Identificación de secuencias estratigráficas.
    - Modelamiento de facies.
  - Correlaciones estratigráficas con afloramientos y registros eléctricos.
  - Mapas de facies, espesores.
  - Reconstrucción Paleogeográfica.

### 3.1. Recopilación de información.

La recopilación de la información previa, consta de artículos, informes y libros con datos relevantes principalmente de las zonas escogidas para realizar el levantamiento de la información de campo, y datos sobre la Formación Guadalupe en la zona de la Cordillera Oriental y en el Piedemonte Llanero. La información que se revisó se encuentra en diversos formatos, digital, papel, etc. Estas se obtuvieron en diferentes instituciones o en sus portales de *internet*.

### 3.2. Fase de campo.

En esta fase se levantarán columnas detalladas de la Grupo Guadalupe y en columna se llevaron a cabo lecturas de rayos Gama, usando un equipo portátil propiedad del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) a lo largo de la zona de estudio, la cual está comprendida entre las localidades de Villavicencio y Guamal (Meta) sobre el borde Oriental de la Cordillera Oriental.

Las columnas se levantaron en quebradas sobre el Piedemonte Llanero en las siguientes localidades:

- Quebrada Sagú.
- Quebrada Las Blancas.
- Caño Blanco.

A la Quebrada Sagú se accede desde el cruce que hay entre la vía que de Acacias conduce a Villavicencio con el Rio Guayuriba. Sobre el margen izquierdo del Rio (aguas arriba), adelante del campamento del INPEC se encuentra un camino de herradura que conduce hasta dicha quebrada, que es jurisdicción de las Veredas Guayuriba y El Pañuelo, en esta localidad el levantamiento de la columna se realizó aguas arriba desde el lugar donde el camino intersecta el cauce de agua.

El acceso a la Quebrada Las Blancas se realiza por la calle 14 del municipio de Acacias, la cuál atraviesa el pueblo de Oriente a Occidente, esta vía conduce hacía las Veredas Alto Acacias y Acaciitas. Dicho carretable conduce hasta un cauce de agua llamado Caño Negro, por el cuál se debe descender hasta donde esta desemboca sobre la Quebrada Las Blancas, lugar en el cual se inicia el levantamiento de la sección en dirección aguas arriba.

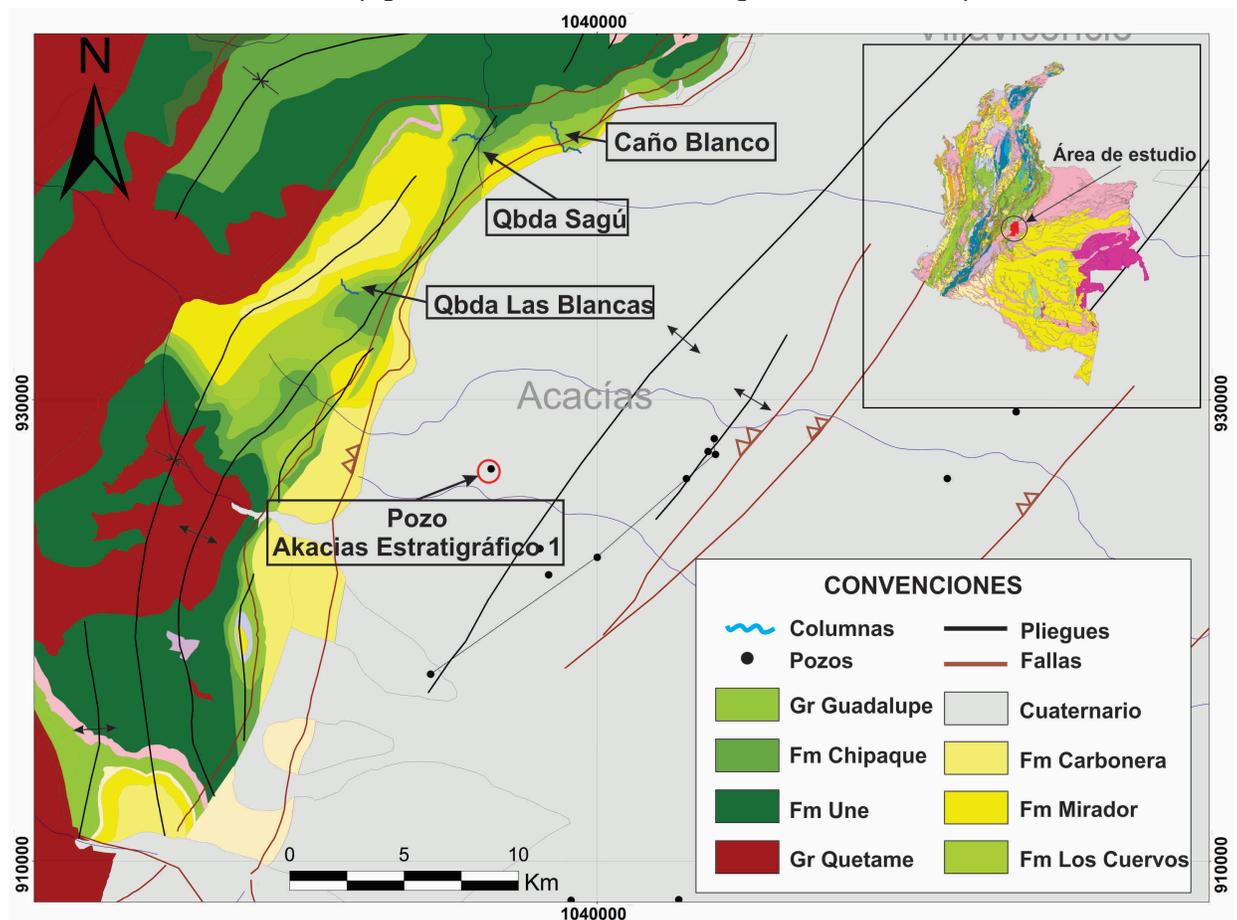
Para llegar al Caño Blanco, se debe tomar la vía que de Acacias conduce a la Cuncia (Meta) hasta un carreteable que se encuentra ubicado en el costado izquierdo de la vía antes del paradero denominado "Puerto Chorizo" y donde habitualmente se encuentran varias ventas ambulantes de Piña. Después de tomar este carreteable se llega a una bifurcación donde se debe escoger el camino de la derecha el cual conduce hasta una finca donde se termina la vía y se debe avanzar aproximadamente 500 m a pie para encontrar el cause de agua. En esta sección se avanzó aguas arriba para encontrar la base de la formación en contacto con la Formación Chípaque, y se midió la sección aguas abajo.

### **3.2.1. Levantamiento de columnas estratigráficas.**

La recolección de información de campo se desarrolló en 4 comisiones. La primera comisión fue realizada desde febrero 5 al 14 de 2014, se realizó un reconocimiento de las secciones a medir y describir. En la comisión del 12 al 29 de marzo de 2014 se midieron las secciones de la Quebrada Blanca y la del Caño Blanco. Posteriormente se desarrolló otra comisión del 18 de junio al 12 de julio de 2014, esta con el fin de realizar la medición y la descripción de la última columna y tomar el registro *Gamma Ray* de afloramiento, pero debido al mal tiempo no se pudo culminar dicha tarea. Debido al mal tiempo fue necesaria otra comisión que fue llevada a cabo desde el 22 de septiembre hasta el 11 de octubre del 2014, en la cuál se culminó la fase de adquisición de información.

En la fase de adquisición de información se levantaron tres columnas estratigráficas en tres quebradas de la zona de estudio, una en la Quebrada Sagú en inmediaciones de las veredas Guayuriba y El Pañuelo, otra en la Quebrada Las Blancas en alrededores de las veredas Alto Acacias y Acaciitas, y la última en el Caño Blanco en jurisdicción de la Cuncia-Meta (Ver figura 9).

**Figura 9:** Mapa Geológico con la localización de las secciones medidas en el Piedemonte Llanero y pozo con núcleo de roca que se midieron y describieron.



Fuente: Base geológica tomada de (Mora, 2007).

Las columnas fueron medidas con dos métodos, se utilizó el Bastón de Jacob para medir los espesores de los afloramientos expuestos y con el método de poligonal se midieron las secciones cubiertas.

Las columnas estratigráficas fueron levantadas con la ayuda de un equipo de estudiantes de pregrado de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Las secciones se describieron

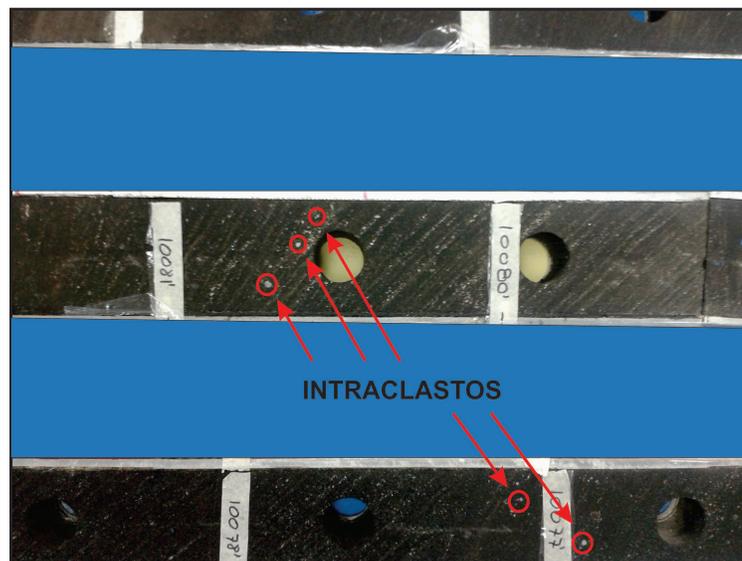
en dos escalas, las columnas de la Quebrada Las Blancas y el Caño Blanco fueron descritas a escala 1:100 y la sección de la Quebrada Sagú fue descrita a escala 1:50, esta última fue descrita a esta escala debido a que la exposición de roca es muy buena, pero para cuestión de correlación se dibujó a 1:100 como las demás. En total fueron medidos y descritos 876 m de columna sedimentaria (Ver tabla 6):

**Tabla 6:** Tabla de espesores medidos en las localidades trabajadas.

Localidad	Espesor medido (m)
Quebrada Las Blancas	232
Caño Blanco	307
Quebrada Sagú	337

También se describieron 132 m de núcleo de roca de un pozo (Akacias estratigráfico-1) propiedad de Ecopetrol, está descripción se realizó a escala 1:10, pero para correlación se dibujó 1:100 (Ver figura 10).

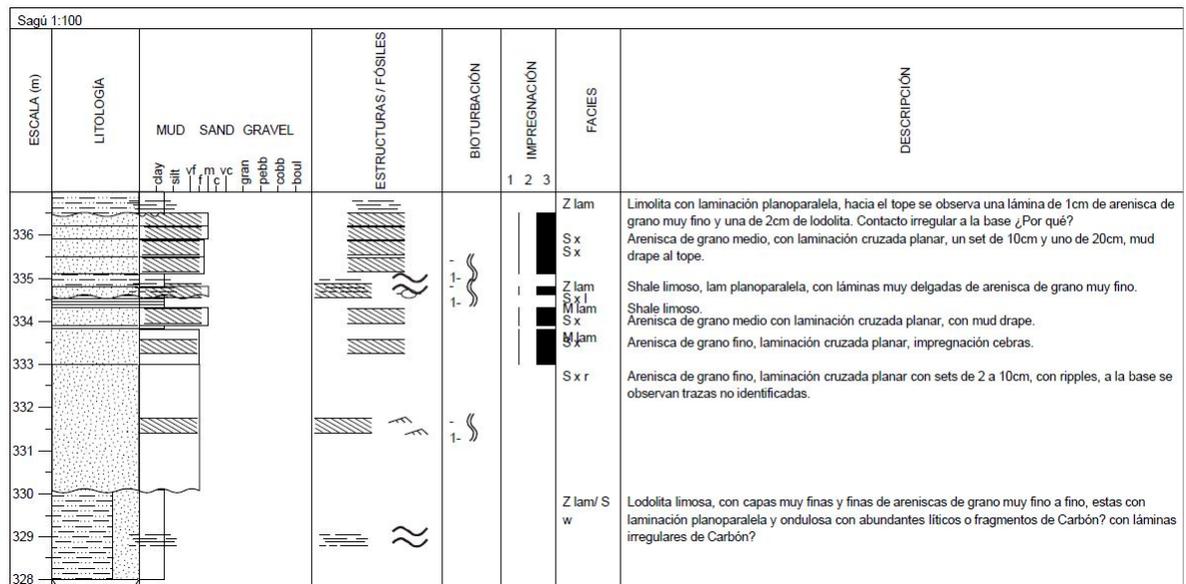
**Figura 10:** Muestra de núcleo descrito, encerrados en círculos rojos se observan intraclastos inmersos en los *foresets* de la laminación inclinada planar.



Las columnas estratigráficas y el núcleo fueron digitalizados en el programa *SedLog* (Zervas et al., 2009), aplicación desarrollado por el *Departments of Computer Science and Earth Sciences. Royal Holloway, University of London*. Se utilizó este programa debido a que es

de libre distribución, fácil acceso y de muy cómoda interacción, además de esto es un programa que almacena la información en una base de datos (tabla .csv), lo que permite fácil manipulación y disponibilidad organizada para futuros análisis, dejando atrás la idea de las columnas estratigráficas como un dibujo solamente. También se usa este programa por recomendación de los funcionarios del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), ya que es el que se usa en dicha institución.

**Figura 11:** Apariencia gráfica de la aplicación *Sedlog*, la gráfica muestra las diferentes columnas que pueden ser incluidas en el dibujo de la sección.



Fuente: Tomado de (Zervas et al., 2009).

### 3.2.2. Toma de *Gamma Ray* de afloramiento.

El registro de rayos Gama fue realizado con un equipo de uso manual que es propiedad del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) y fabricado por *GF Instruments*, y su referencia comercial es *Gamma Surveyor II* (Ver figura 12). Este dispositivo es de carácter espectral, por lo que se obtuvieron mediciones de % de potasio (**K**), ppm de torio (**Th**) y ppm de uranio (**U**) individualmente.

**Figura 12:** Dispositivo portátil para medición de rayos Gamma. Con este es posible tomar lecturas individuales de concentración de Torio en ppm, Uranio en ppm y Potasio en porcentaje, además de la lectura total de los Rayos Gama en cuentas por hora (nGy/h).



Fuente: Tomado de Manual de usuario del *Gamma surveyor II*.

El muestreo de rayos Gamma en las secciones fue tomado cada 25cm de espesor real en la formación y cada medida fue realizada ubicando el dispositivo sobre el afloramiento durante un minuto (1min)(Ver figura 13). El muestreo se realizó de esa manera para obtener 6 medidas por cada bastón marcado y una densidad de detalle aceptable para el objetivo de la investigación.

La información adquirida fue organizada en tablas y posteriormente convertida en archivos de tipo .las, esto con el propósito de tener un formato para facilitar la organización de la información y el uso mediante programas especializados de modelamiento.

### 3.3. Fase de oficina.

En esta etapa se organizó y digitalizó toda la información adquirida en campo, columnas estratigráficas y los registros de rayos Gamma, para realizar la debida visualización e interpretación de los datos.

#### 3.3.1. Organización de la información adquirida en el campo.

Usando la aplicación *Sedlog*(Zervas et al., 2009) se digitalizaron tres columnas estratigráficas de afloramiento y una columna estrafigráfica de un núcleo de roca de un pozo estratigráfico

**Figura 13:** Toma del Registro de rayos Gamma en afloramiento (GR), la fotografía ilustra la forma en como se coloca el dispositivo sobre el afloramiento para realizar la medición, toda el área del cilindro detector debe estar en contacto con la superficie sobre el afloramiento a medir.



del área de Acacias-Meta. Las cuales quedaron impresas en archivos de tipo *Pdf*. De igual manera se encuentran en el formato que genera la aplicación usada y además de esto se encuentran en formato de tablas de base de datos (.csv), que para futuros trabajos pueden ser de gran ayuda.

Los datos de los rayos Gamma fueron descargados del dispositivo en un formato básico y universal de texto (.txt), de estos archivos fueron tomados solamente las columnas de interés para este estudio que fueron:

- % potasio (**K**)
- ppm de torio (**Th**)
- ppm de uranio (**U**)

- Cuentas por minuto de **Gamma Ray (DR)**

Se enumera la información filtrada de los archivos generados por el dispositivo, ya que este además de almacenar los datos propios de la medición almacena información del día, hora, coordenadas y comentarios sobre cada dato tomado.

### **3.3.2. Estratigrafía y sedimentología de las columnas.**

En esta fase se realizó el análisis sedimentológico y estratigráfico de las secciones y el pozo que fueron descritos.

#### **Descripción de facies**

La descripción de facies se realizó con base en (Farrell et al., 2012) Farrell et al, (2012), en el cual buscan la estandarización de conceptos y nomenclatura para nombrar facies sedimentarias (Ver tabla 7 y tabla 8).

**Tabla 7:** Tabla para la estandarización de la nomenclatura de facies, en la tabla se relacionan la textura, los atributos (estructuras sedimentarias, bioturbación, trazas fósiles, *pellets*, etc.), también se muestran algunos ejemplos para la implementación de los códigos establecidos en las dos columnas finales.

Textura		Atributo		Código Litofacies - Ejemplos	
Código	Descripción	Código	Descripción	Código	Descripción
G	grava	m	masiva	sG gr	Grava arenosa gradada
sG	grava arenosa	biot	bioturbada	smG df	Grava areno-lodosa con fabrica disuelta
mG	grava lodosa	b	con madrigueras	smG ch	Grava arenosa, lodosa, capas caóticas
smG	grava lodosa, arenosa	lam	laminado	(s)G mot	Grava ligeramente arenosa, moteada
msG	grava arenosa, lodosa	b-lam	madrigueras-laminado	S m	Arenisca masiva
S	arenisca	l	estratificación lenticular	S biot	Arenisca bioturbada
mS	arenisca lodosa	w	laminación ondulosa	S b	Arenisca con madrigueras
gS	arenisca gravosa	f	laminación <i>flaser</i>	S x	Arenisca con estratificación cruzada
gmS	arenisca lodosa gravosa	gr	gradada	S r-lam	Arenisca con ondulas
mgS	arenisca gravosa lodosa	gr-lam	láminas gradadas	(m)S f	Arenisca ligeramente lodosa, laminación <i>flaser</i>
M	lodolita	x	estratificación cruzada	mS b	Arenisca lodosa con madrigueras
sM	lodolita arenosa	ch	capas caótica	gmS b-gr	Arenisca lodosa, gravosa gradada con madrigueras
gM	lodolita gravosa	con	convoluta	M mp	Lodolita micropelitica
gsM	lodolita arenosa gravosa	s	remolino		
		r	ondulas		
		r-lam	laminación ondulas		

Fuente: Tomada y modificada de (Farrell et al., 2012).

**Tabla 8:** Tabla para la estandarización de la nomenclatura de facies, en la tabla se relacionan la textura, los atributos (estructuras sedimentarias, bioturbación, trazas fósiles, *pellets*, etc.), también se muestran algunos ejemplos para la implementación de los códigos establecidos en las dos columnas finales.

Textura		Atributo		Código Litofacies - Ejemplos	
Código	Descripción	Código	Descripción	Código	Descripción
sgM	lodolita gravosa arenosa	s-lam	laminación remolino	M lam	Lodolita laminada
(g)	ligeramente gravosa	mld	móldica	(s)M l	Lodolita ligeramente arenosa capas lenticulares
(s)	ligeramente arenosa	intr	intraclastos	sM b	Lodolita arenosa <i>burrowed</i>
(m)	ligeramente lodosa	df	fabrica disuelta	(g)sM rt	Lodolita arenosa ligeramente gravosa con raíces
(c)	ligeramente arcillosa	rt	raíces	sP b	Turba arenosa con <i>burrows</i>
(z)	ligeramente limosa	mot	moteada		
		org	restos de plantas		
		dis	perturbado		
		r-mot	raíces moteadas	G/S	Intercalaciones de grava-arena, predomina grava
C	arcillolita	rh	laminación rítmica	S/G	Intercalaciones de arena-grava, predomina arena
Z	limolita	bnd	bandeado	S/M w	Intercalaciones de arena-lodo laminación <i>wavy</i>
c	arcillosa	cem	cementada	M/S l	Intercalaciones de lodo-arena laminación lenticular
z	limosa	p	pelitica	M/G	Intercalaciones de lodo-grava, predomina lodolitas
/	intercalaciones	mp	micropelitica	mSb/sMl	Intercalaciones de arenisca lodosa <i>burrowed</i>
P	turba	lig	lignito		con lodolita arenosa con laminación lenticular

Fuente: Tomada y modificada de (Farrell et al., 2012).

### **Identificación de secuencias estratigráficas.**

La identificación de las secuencias estratigráficas, se realizó en primer lugar en las columnas de roca y en el núcleo del pozo.

Como primer paso se identificaron los tipos de superficies principales que son usadas para limitar las parasecuencias y las secuencias. Estas son las superficies de inundación y las superficies erosivas, representadas en la roca por litologías de granulometrías muy finas (lodos principalmente) y por superficies de discontinuidad estratigráfica respectivamente.

Después se identificaron los diferentes ciclos de progradación, retrogradación, etc., con los cuales se definieron las parasecuencias y secuencias dentro de las columnas de roca levantadas.

### **Modelamiento de facies.**

En este punto se compararon los facies descritas con los modelos de depósito que se encuentran en la literatura para interpretar el sistema deposicional de las secciones levantadas.

### **3.3.3. Correlaciones estratigráficas. (afloramientos-registros eléctricos)**

Para elaborar las correlaciones en este trabajo, se utilizó columnas estratigráficas y registros eléctricos de pozos dentro del área de estudio. En total se elaboraron 7 correlaciones en las cuales se incluyeron los registros de rayos Gama de las secciones medidas en el Piedemonte y registros eléctricos, principalmente *Gamma Ray* de 22 pozos que se encuentran en la parte del área de estudio que pertenece a la Cuenca de los Llanos orientales. Tres se realizaron en dirección Suroeste-Noreste y tres en dirección Noroeste-Sureste.

Las correlaciones son de tipo cronoestratigráficas. El amarre en tiempo para estas correlaciones se llevo a cabo usando las zonas bioestratigráficas determinadas por el equipo de bioestratigrafía del Instituto Colombiano de Petróleo (ICP) (De la parra et al., 2014) y (Rueda and De la Parra, 2014). En este punto cabe resaltar que las muestras para palinología de las quebradas Sagú, Las Blancas y el Caño Blanco fueron colectadas en su gran mayoría durante las campañas de campo que se hicieron en este trabajo. Los límites de dichas zonas fueron usados para definir la posible zona que abarca el intervalo de edad correspondiente a la depositación del Grupo Guadalupe.

Para las correlaciones roca - registro, se realizó la calibración de la respuesta de los registros de rayos Gama con las facies y los tipos de roca descritos en las columnas de roca. Lo anterior con el fin de poder llevar las respuestas a los registros de los pozos en los cuales no hay registro de roca.

Con los límites definidos en los registros de rayos Gama, tanto de afloramiento como de pozo se llevó a cabo la definición del intervalo de tiempo de interés en las secciones y los pozos a trabajar. Entre los límites establecidos como aproximaciones muy buenas al tope y la base del intervalo correlacionable con el Grupo Guadalupe, se identificaron básicamente tres tendencias en las respuestas o lecturas de los registros *Gamma Ray*. Estas tendencias se compararon y amarraron con la roca, ya que en las secciones medidas se puede observar directamente a que corresponden las lecturas del registro en la columna de roca. La identificación de dichas tendencias es lo que se conoce como electrofacies, y como tal se les asigna una nomenclatura clara y explícita para nombrarlas dentro de las correlaciones, por lo cual fueron denominadas de la siguiente manera:

- Facies de arenitas.
- Facies de lodolias.
- Facies de heterolíticos.

Estas electrofacies se definieron de esta forma para simplificar el modelo y para elaborar mapas de los componentes principales del sistema de depósito, el cual está representado por cada una de esas electrofacies. Donde las facies de arenitas son asociadas a la parte de los canales en el sistema, esto ya que las asociaciones de facies arenosas nos dan evidencia de ello. Las facies heterolíticas corresponden a la zona más transicional entre la región más continental que es donde se observan los canales y la zona más marina que es donde esperamos el depósito de las granulometrías más finas, para las cuales se asignó el nombre de facies de lodolitas en la definición de las electrofacies.

Para la identificación de las electrofacies se usaron los siguientes *cutoffs* (Ver tabla 9):

Estos valores fueron tomados con base en las lecturas del registro de rayos Gamma en la columna de roca, ya que se sabe exactamente que litología es la que se está midiendo. Con estos valores se realizó la identificación de las electrofacies en todos los pozos usando los registros de rayos Gamma. Los cuales se editaron pozo a pozo, con el fin de hacer control de calidad al resultado del algoritmo aplicado en el programa que se usó.

**Tabla 9:** En esta tabla se relacionan los cutoffs usados para la discriminación de cada una de las electrofacies identificadas.

<b>Electrofacies</b>	<b><i>Cutoff</i></b>
Arena	menor a 30 api
Heterolíticos	mayor a 30 y menor a 90 api
<i>Shale</i>	mayor a 90 api

### 3.3.4. Mapas de facies, espesores.

En esta parte, se elaboraron mapas de espesores de facies con potencial para la acumulación de hidrocarburos, estos se elaboraron mediante el uso de herramientas de interpolación, tales como *Kriging* con la ayuda del *software Petrel*. También se elaboraron los mapas paleogeográficos, los cuales se elaboraron teniendo en cuenta la variación lateral de facies, los espesores de las asociaciones de facies, los subambientes y ambientes, y las superficies de tiempo identificadas por el equipo de Palinología del ICP.

### 3.3.5. Reconstrucción Paleogeográfica.

Con la sedimentología, la estratigrafía de las columnas de roca, el núcleo del pozo las correlaciones, se analizaron las variaciones en espesores de los subambientes definidos y con ello se elaboró la reconstrucción de la paleogeografía.

Para realizar la reconstrucción paleogeográfica se elaboraron mapas de espesor y de porcentaje de las electrofacies usadas (arenitas, heterolíticos, lodolitas). Estos mapas fueron elaborados a cuatro (4) niveles que subdividen el intervalo objeto de este trabajo. Con base en los mapas por electrofacies a cada nivel, se elaboró un mapa de la paleogeografía en cada una de estas subdivisiones. Cabe anotar que los niveles con los que se elaboraron dichos mapas son los mismos que se usaron en las correlaciones.

## 4 RESULTADOS

### 4.1. Identificación de facies

En las columnas de roca y en el pozo descritos para la realización de este trabajo fueron identificadas las siguientes facies.

#### **Columna del pozo Akacias Estratigráfico 1.**

Se describieron 132 m de núcleo. No se encontró la base del Grupo Guadalupe mientras que el techo es difícil determinarlo con exactitud, ya que las rocas del Paleoceno y Eoceno están suprayaciendolas formando un solo conjunto de arenitas muy continuas como también lo evidencia la respuesta en los registros eléctricos. Dentro de este paquete se observan varias superficies erosivas, pero es una tarea dura identificar la que corresponde al tope sin más estudios complementarios. Sin embargo se determinaron tres secciones dentro del grupo que se denominaron de base a tope como: Guadalupe Inferior, Guadalupe Medio, Guadalupe Superior (Ver figura 14). Las cuales se definieron teniendo en cuentas las litologías descritas tanto en la zona de la CO como en el Piedemonte Llanero. Es decir, las secciones Inferior y Superior se determinaron por tener principalmente facies arenosas y la sección denominada como Guadalupe Medio por su predominancia de facies de granulometría fina.

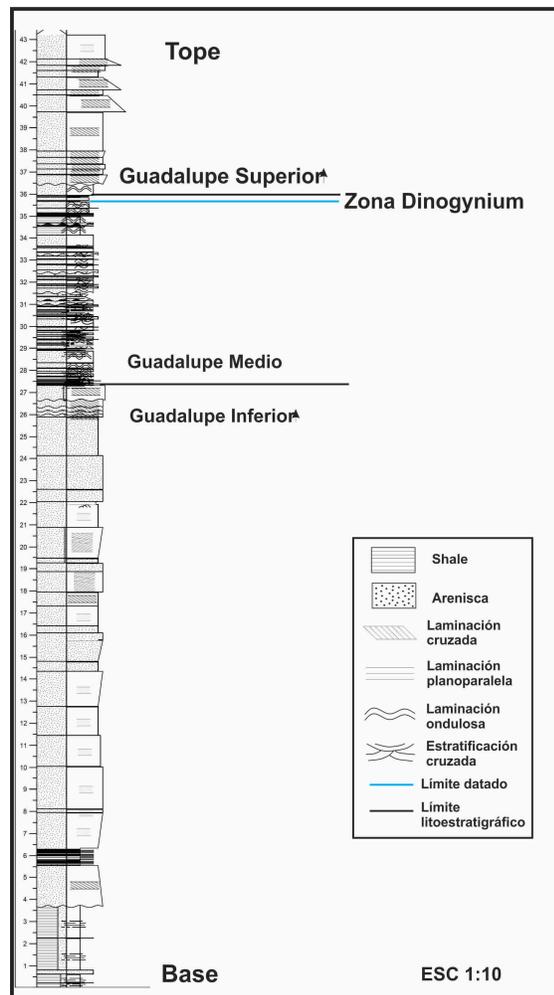
Las facies descritas en esta sucesión de roca en orden de mayor aparición son: Arenitas con laminación inclinada (S x), Arenitas masivas (S m), Arenitas laminadas (S lam), Arenitas con intraclastos (S intr), Arenitas ligeramente conglomerática con laminación inclinada ((g)S x), Arenitas conglomeráticas con laminación inclinada (gS x), Arenitas conglomeráticas (gS) y Conglomerado(G). Estas facies se encuentran en los miembros que son principalmente areníticos, es decir, en los miembros nombrados como Guadalupe inferior y Guadalupe Superior. En el miembro denominado Guadalupe medio se identifica principalmente Arenitas con bioturbación (Sbiot), y en menor proporción aparecen, lodolitas bioturbadas (Mbiot), Arenitas con ondulitas (S r), Arenitas con laminación ondulosa (S w), Limolita con laminación ondulosa (Z w), Como se nota, las facies más frecuentes en esta columna son Arenitas con laminación inclinada (S x) y Arenitas con bioturbación (Sbiot), lo cual nos da indicios del posible ambiente de sedimentación (Ver figura 15).

### **Columna Quebrada Las Blancas.**

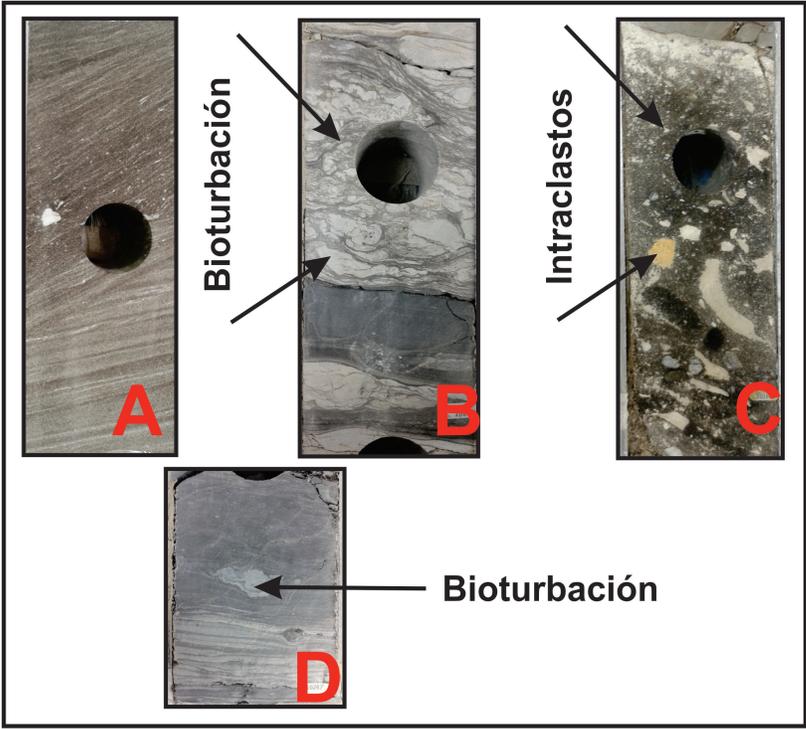
En esta columna se describieron y midieron 232 m de espesor. La base del Grupo Guadalupe en esta sección no se encuentra aflorando y se definió un tope aproximado con base en la información bioestratigráfica, que limita el Cretácico con el Paleoceno, pero al igual que en el pozo la parte superior de este Grupo está conectado con las areniscas del Paleoceno y Eoceno. En esta columna también se definieron tres secciones dentro de la columna medida: Guadalupe Inferior, Guadalupe Medio, Guadalupe Superior (Ver figura 16).

Las facies descritas en esta sección que más predominan son: Arenitas con laminación inclinada (S x), Arenitas con laminación ondulosa (S w). Estas facies aparecen a través de toda la sección, sin embargo las Arenitas con laminación inclinada predominan en el miembro nombrada como Guadalupe superior y las Arenitas con laminación ondulosa predominan en los miembros Guadalupe Inferior y Guadalupe Medio. En menor cantidad se observaron; Arenitas con estratificación cruzada (S con), Arenitas laminadas (S lam), Lodolita laminada intercalado con Arenitas con intraclastos (M lam/S intr), Arenitas con intraclastos (S intr), Arenitas con laminación ondulosa e intraclastos (S w intr), Arenitas con laminación ondulosa intercalada con Lodolitas con laminación ondulosa (S w/ M w), Arenitas con laminación inclinada e intraclastos (S x intr), las cuales aparecen en menor proporción a través de la sección sin una tendencia marcada en ninguno de los miembros identificados. También es muy común observar a través de toda la secuencia evidencias de bioturbación, siendo más evidente y en mayor grado hacia la base de esta. Las facies descritas en esta columna también nos indican la presencia de sistemas de depósito de tipo transicional, con influencias marcadas tanto de procesos continentales y marinos.

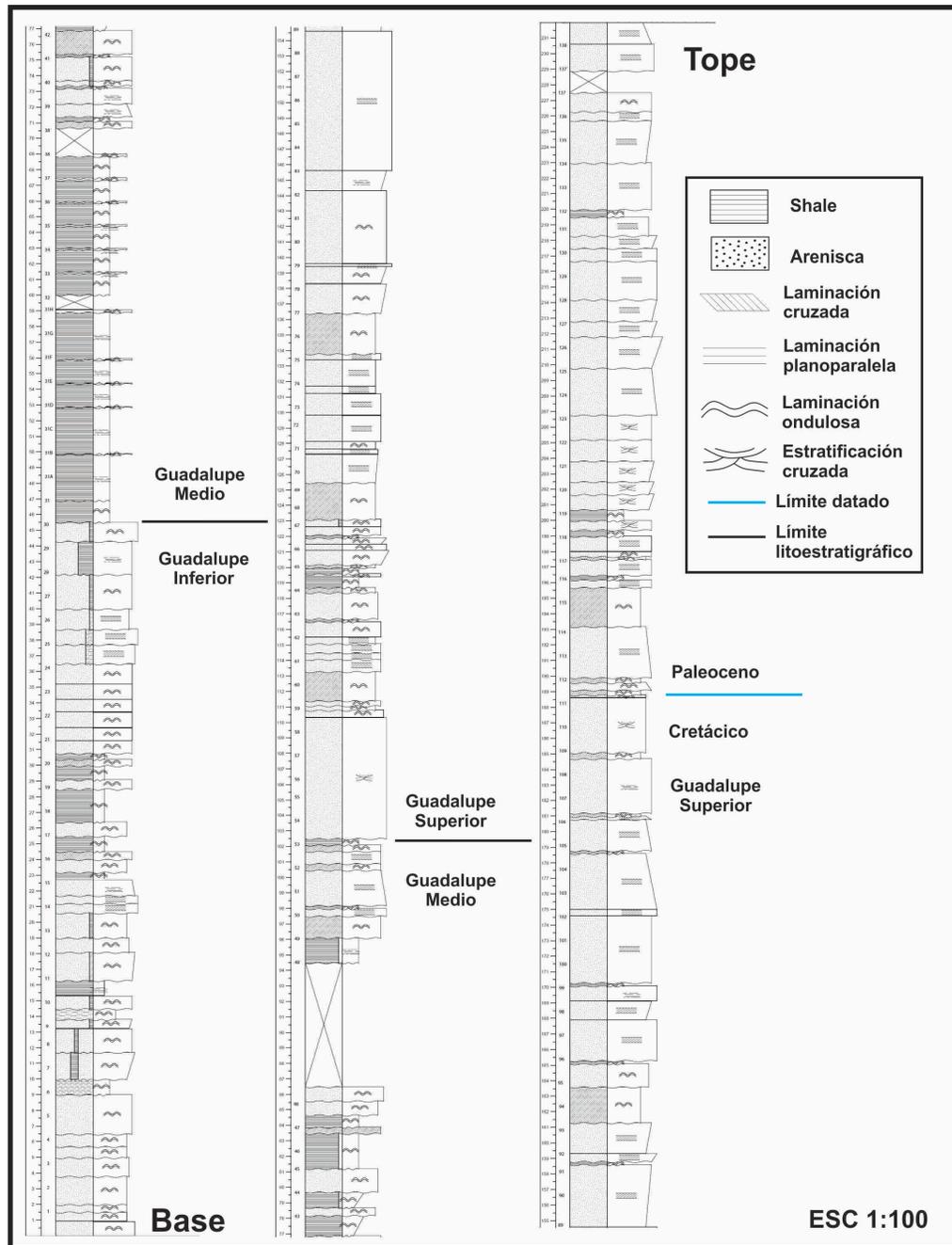
**Figura 14:** Columna del pozo Akacias Estratigráfico 1, en esta se muestran las tres secciones definidas con base en lo descrito para este grupo en otra localidades y también se señala la zona palinológica definida (línea azul). Este último esta por debajo de lo que se denominó Guadalupe Superior debido a que esta zona puede ir más arriba, solo que con palinomorfos no es posible mostrar ya que la recuperación de muestras en arenitas es casi nula.



**Figura 15:** Facies identificadas en el núcleo de roca. A) Arenitas con laminación inclinada (S x), B) Arenitas con bioturbación (S biot), C) Arenitas con intraclastos (S intr), D) Lodolita bioturbada (M biot).



**Figura 16:** Columna de la Quebrada Las Blancas, en esta se indican las tres subdivisiones realizadas para esta sección: Guadalupe Inferior, Guadalupe Medio y Guadalupe Superior. También se indica con la línea azul la zonificación bioestratigráfica, la cual delimita el Cretácico y el Paleoceno.

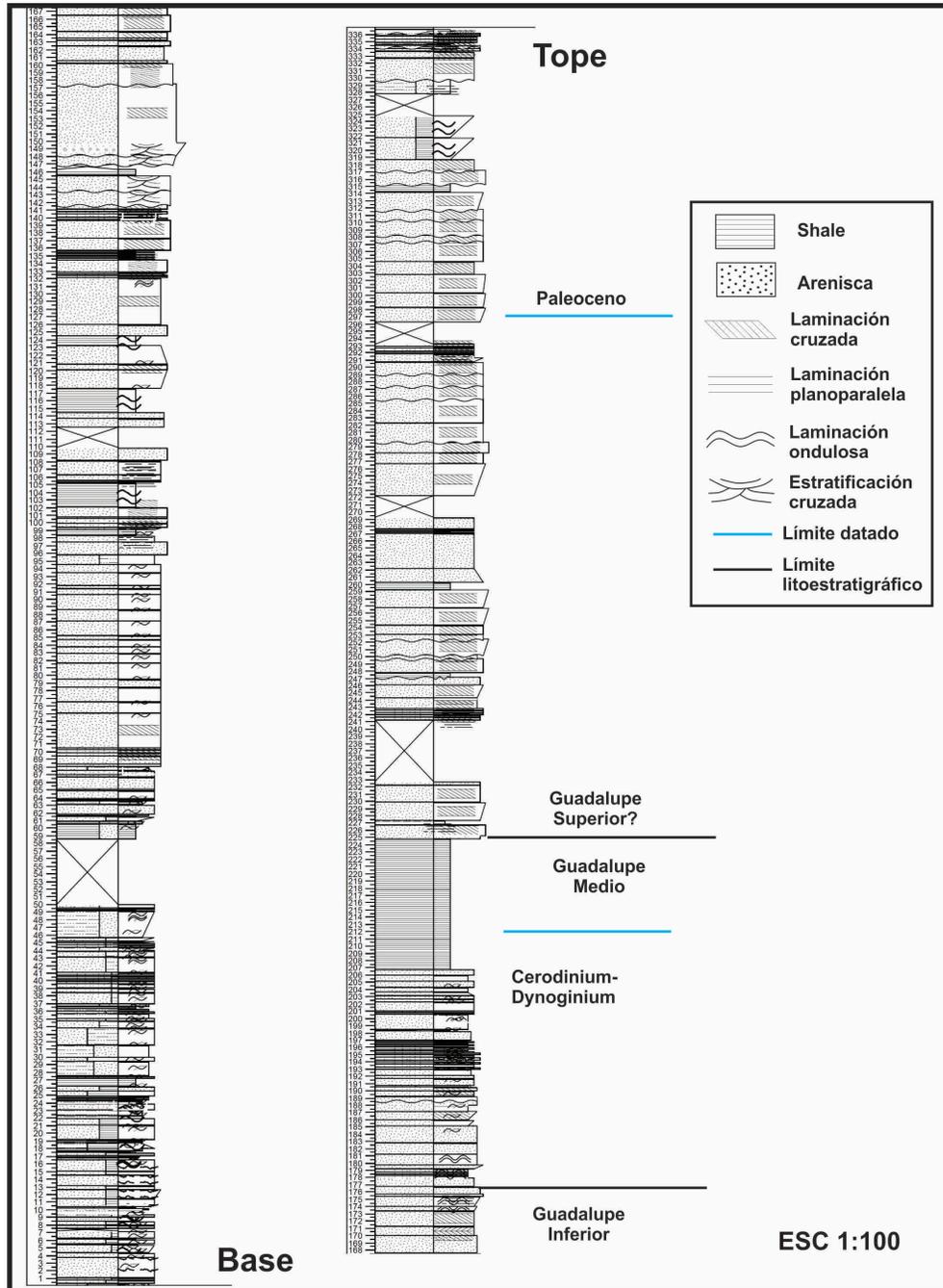


## Columna Quebrada Sagú.

La sección de la Quebrada Sagú se midió desde el primer afloramiento que se encuentra aguas arriba desde la desembocadura de este cauce en el Rio Guayuriba. Desde este punto se midieron 337 m a través del lecho de la quebrada en dirección aguas arriba. En esta sección no aflora la base del Grupo Guadalupe, y el tope es un poco incierto, ya que en los resultados bioestratigráficos hay un intervalo indeterminada entre la zona Cerodinium-Dynoginium que incluye parte del Coniaciano (Medio y Superior), Santoniano, Campaniano y parte del Maastrichtiano. Sin embargo con base en las características que este Grupo expone en otras localidades, se subdividió el intervalo correspondiente al Cretácico, y la sección indeterminada en tres segmentos que son comparables con los Miembros descritos en otro estudios (Ver figura 17).

En esta columna de roca, las facies descritas e identificadas que más predominan son: Arenita bioturbada con laminación ondulosa (S biot w), Arenita con laminación inclinada (S x), Arenita bioturbada (S biot). En el miembro Guadalupe Inferior es donde se observan con mayor frecuencia las Arenitas bioturbadas con laminación ondulosa y las Arenitas bioturbadas, las Arenitas con laminación inclinada aparecen con mayor frecuencia en el miembro Guadalupe Superior. En menor proporción fueron descritas las siguientes facies: Arenita con laminación *Flaser* (S f), Limolita con laminación ondulosa (Z w), Lodolita con lentes de arenita (M l), Arenita con laminación ondulosa e intraclastos (S w intr), Arenita con laminación *Herringbone* (S h), Arenita bioturbada con laminación irregular (S biot i), Lodolita con laminación ondulosa (M w), Arenita masiva (S m), heterolíticos (intercalación de Arenitas con lodolitas (M/S), Arenita con laminación ondulosa y lentes de arena (S wl), Limolita intercalada con Arenita con laminación ondulosa (Z/S w), Arenita bioturbada con intraclastos (S biot intr), Lodolita bioturbado (M biot), Lodolita con laminación planoparalela (M lam), Lodolita laminada con Arenita masiva (M lam/S m), Arenita con laminación inclinada y ondulosa (S x w), Arenita bioturbada masiva (S biot m), Arenita masiva con intraclastos (S m intr), Arenita con laminación planoparalela (S lam), Arenita con laminación inclinada bioturbada (S x biot), las cuales están distribuidas a lo largo de la sección y aparecen con poca frecuencia, en este grupo de facies cabe resaltar que las que corresponden a las litologías más finas (Lodolita con lentes de arenita, Lodolita con laminación ondulosa, Lodolita bioturbado, Lodolita con laminación planoparalela básicamente) están concentradas y definen el miembro Guadalupe Medio. En esta sucesión de rocas se observan facies que dan indicios de un ambiente de depósito transicional, ya que se observaron características que dan evidencia de este tipo de sistemas.

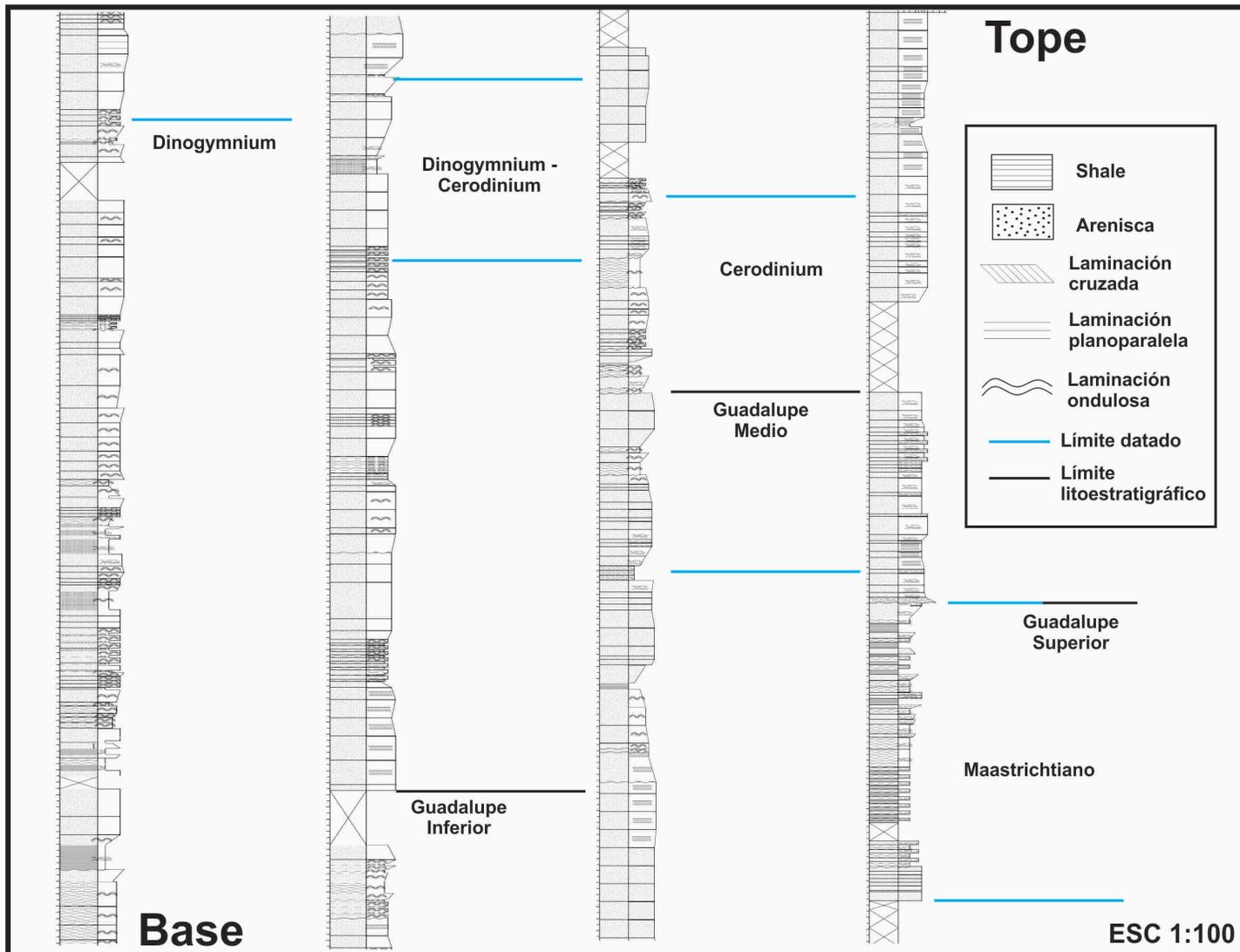
**Figura 17:** Sección Quebrada Sagú, en la imagen se muestra la columna medida, las subdivisiones realizadas en este trabajo y los límites datados mediante palinología. El segmento denominada Guadalupe Superior aparece interrogado debido a que la edad de esta zona es indeterminada.



### **Columna Caño Blanco.**

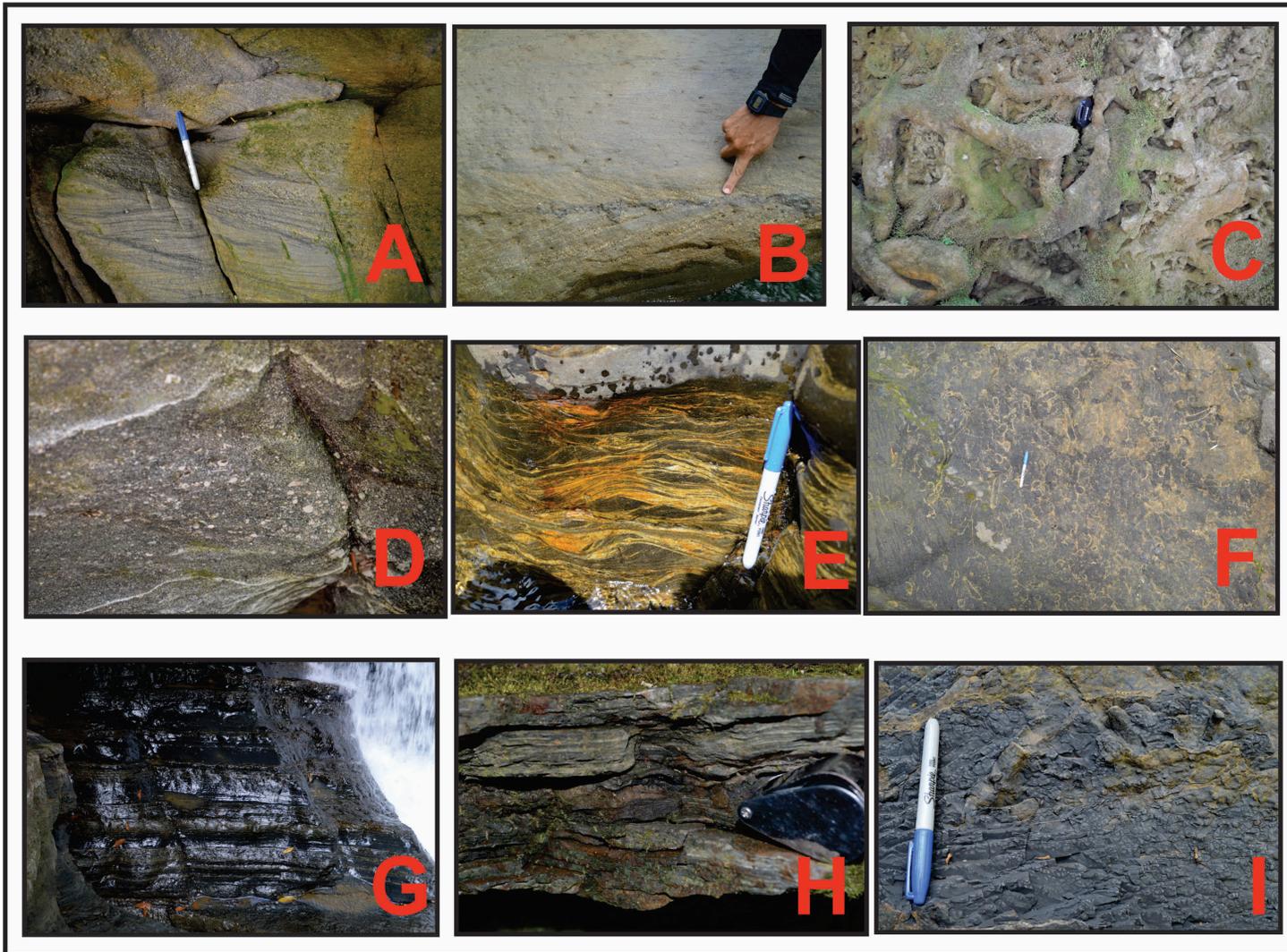
En esta localidad se midieron 307 m. En este caño a diferencia de las demás quebradas la medición y descripción se realizó aguas abajo, debido a que por donde se ingresa al curso de agua se encuentra la sección más superior de esta secuencia. En esta columna fue posible identificar la base, aunque el contacto no es muy claro (posiblemente cubierto), se observa un cambio abrupto en la litología en un corto intervalo de sección, el cual pasa de un espesor considerable de Shales que posiblemente hacen parte de la Formación infrayacente (Chípaque) a un capas muy espesas (mayores a un metro) de areniscas, que concuerdan con las características de esta sección del Cretácico. En esta sección también se identificaron tres secciones según la similitudes litológicas, pero que difieren de lo que se ha observado en las demás secciones descritas en este trabajo y en los trabajos anteriores. Con base en las observaciones de campo y los análisis palinológicos se tiene buena certeza de tener delimitada la base y el tope de la secuencia en esta sección. Con esto definido, se observó que las segmentos Inferior y Superior en esta secuencia son de granulometrías más finas en comparación con estos mismos segmentos en las otras secciones, igualmente sucede con el nivel Medio. Estas observaciones que sugieren un cambio lateral de facies para esta zona más Norte del área de estudio (Ver figura 18).

**Figura 18:** Columna del Caño Blanco. En la imagen se muestran los segmentos definidos en este trabajo (líneas negras) y las zonas definidas mediante palinología (líneas azules). En esta sección se observa una variación lateral de facies.



En la sección descrita en el Caño Blanco, se identificaron principalmente las siguientes facies: Arenita con laminación inclinada (S x), Arenita con laminación ondulosa (S w), Arenita con laminación ondulosa bioturbada (S w biot), Arenita bioturbada (S biot). La facies Arenita con laminación inclinada se encuentra principalmente en el miembro Guadalupe Medio, las demás aparecen principalmente en el miembro Guadalupe Inferior y menor cantidad en el miembro Guadalupe Superior. En menor proporción se describieron e identificaron: Arenita bioturbada (S biot), Arenita masiva (S m), Arenita con laminación planoparalela (S lam), Arenita con intraclastos bioturbada (S intr bio), Limolita con laminación ondulosa (Z w), Arenita con laminación planoparalela e intraclastos (S lam intr), Arenita con laminación planoparalela bioturbada (S lam biot), Limolita laminada (Z lam), Conglomerado arenoso (sG), estas facies aparecen a lo largo de toda la sección pero en frecuencias bajas. De igual manera en las facies de esta sucesión, se observan facies que dan evidencia de ambientes transicionales como su sistema de depósito (Ver figura 19).

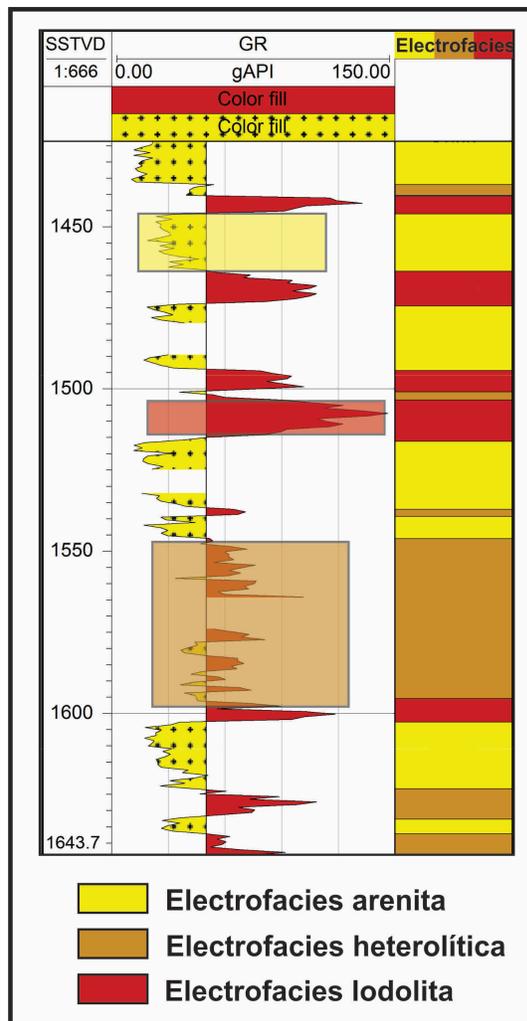
**Figura 19:** A) Arenita con laminación inclinada (S x), B) Arenita con laminación Herringbone (S h), C) Arenita bioturbada (S biot) con *Thalassinoides*, D) Arenita con intraclastos (S intr), E) Arenita con onduladas (S r), F) Arenita bioturbada (S biot) con *Ophiomorfas*, G) Lodolita laminada (M lam), H) Arenita con laminación ondulosa (S w), I) Lodolita bioturbada (M biot).



#### 4.2. Definición de electrofacies.

La definición de electrofacies se llevo a cabo usando el *software Petrel*, donde usando los parámetros mencionados anteriormente (*cutoffs*) y teniendo en cuenta que se tienen medidas directas en el afloramiento se obtuvo una buena calibración de estas (Ver figura 20).

**Figura 20:** Electrofacies obtenidas a partir de registros de rayos Gamma y calibración con roca en afloramiento. En la imagen se nota que los valores más bajos en el registro (a la izquierda) corresponde a arenitas, los más altos (a la derecha) a lodolitas y donde se intercalan valores altos y bajos a heterolíticos.



### 4.3. Sistemas de depósito.

El sistema de depósito interpretado con base en las columnas estratigráficas y el núcleo de roca en un pozo, corresponde a un sistema de tipo estuarino, según el modelo para este sistema de (Boyd et al., 2006).

#### 4.3.1. Interpretación del sistema de depósito.

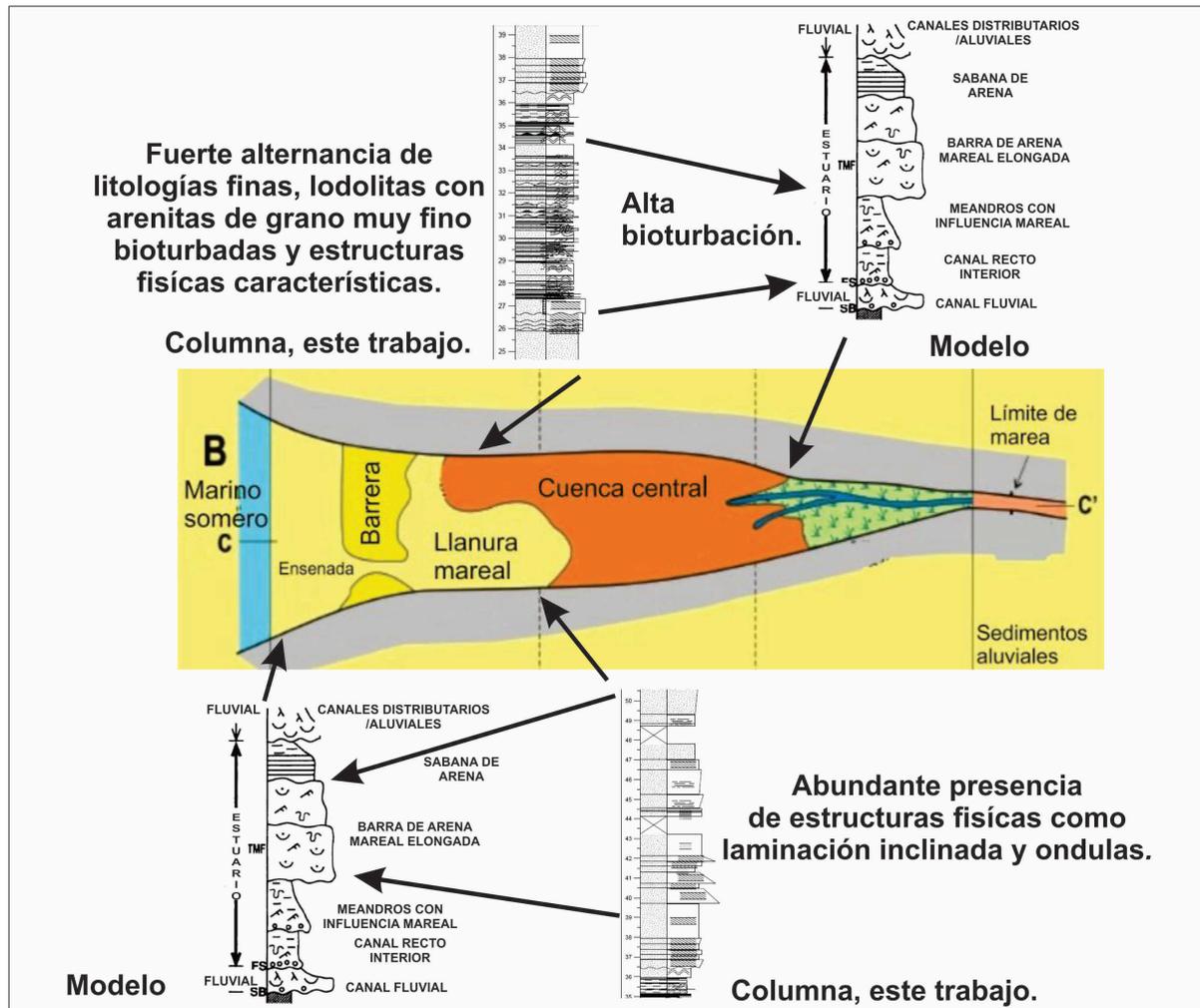
La sucesión de facies descritas en las secciones y en el pozo dan indicios de un ambiente transicional, ya que se notan características e indicios de influencias tanto del continente como del océano. Además, también se observan facies características de una influencia de mareas, tales como las que hacen referencia a heterolíticos de granulometrías muy finas (Ver figura 21).

En las columnas (secciones y pozo) fue posible identificar subambientes del sistema de depósito tales como: la bahía central, que es una zona caracterizada por un ciclo granodecreciente, conectado con una granocreciente, donde se encuentran litologías predominante finas, las cuales pueden ser de tipo arcilloso a arenas de grano muy fino en finas intercalaciones, con presencia de diversas estructuras físicas propias de dicha granulometría y además por la relativa tranquilidad de esta zona, pueden registrar presencia de bioturbación.

De igual manera se identificaron facies con laminación inclinada y ondulas, las cuales se pueden asociar con a un subambiente formado al final del estuario, el cual es llamado boca de estuario. Este sería algo parecido a la desembocadura del canal estuarino, donde se encuentra la llegada de arenas principalmente finas y debido a las corrientes se formaran las estructuras físicas anteriormente mencionadas.

En algunas columnas, como la de la Quebrada Sagú y la Quebrada Las Blancas, se observa un paquete importante de *Shales* de color gris medio a oscuro, físis a subfísis, sin bioturbación, por lo cual se infiere que probablemente pertenezca a una zona más influencia por el mar.

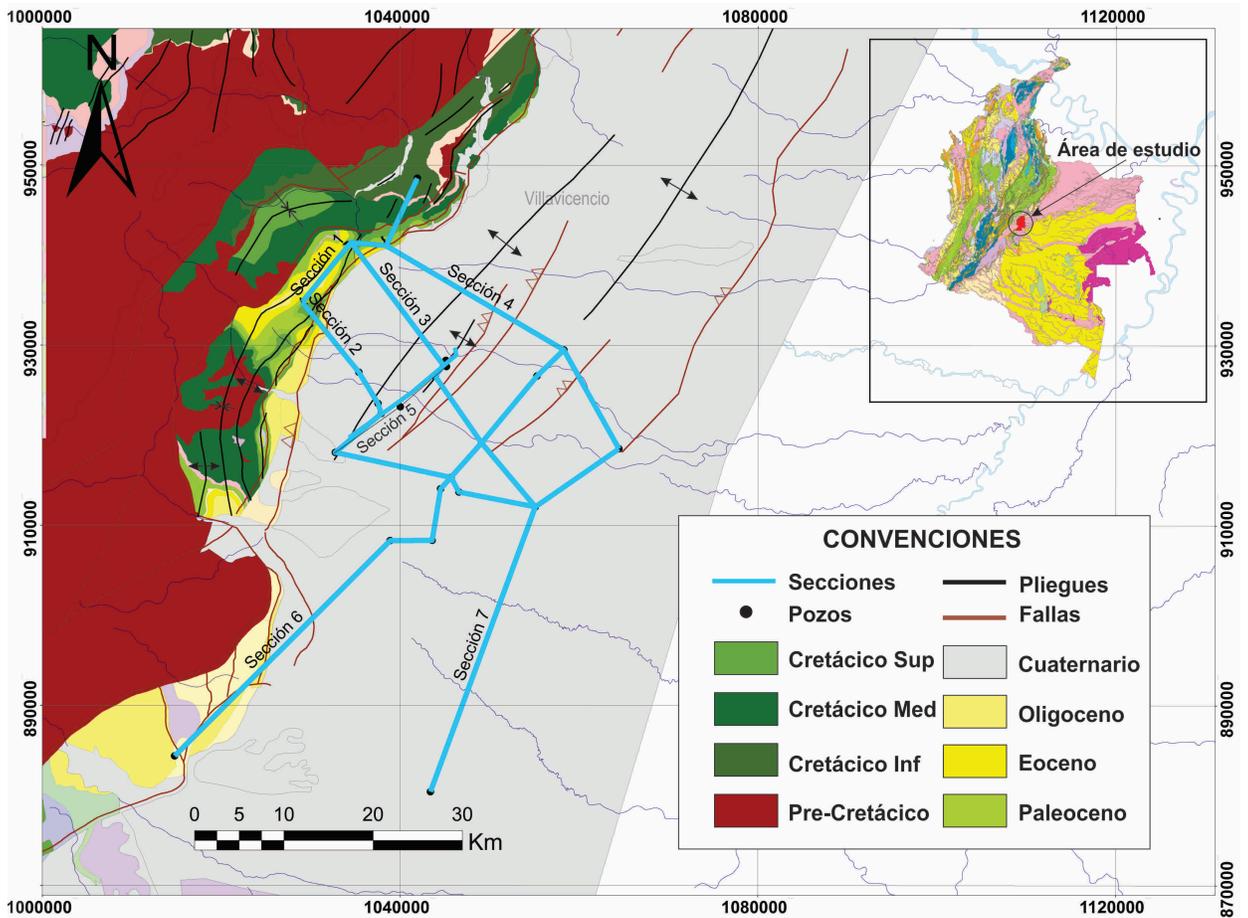
**Figura 21:** Comparación del modelo de estuarios de Boyd et al., 2006 con la estratigrafía descrita en este trabajo. En esta imagen se muestra la comparación de la asociación de facies descritas en este trabajo con la asociación de facies del modelo citado. Se nota que las zonas asociadas a la cuenca central y a la boca del estuario se pueden identificar en las columnas de este trabajo.



#### 4.4. Correlaciones estratigráficas

A continuación se muestra un mapa geológico con la ubicación y dirección de las correlaciones estratigráficas (Ver figura 22):

**Figura 22:** Mapa de ubicación de las correlaciones y los pozos: las correlaciones (azul), pozos (puntos negros).



Fuente: Base geológica tomada de (Mora, 2007).

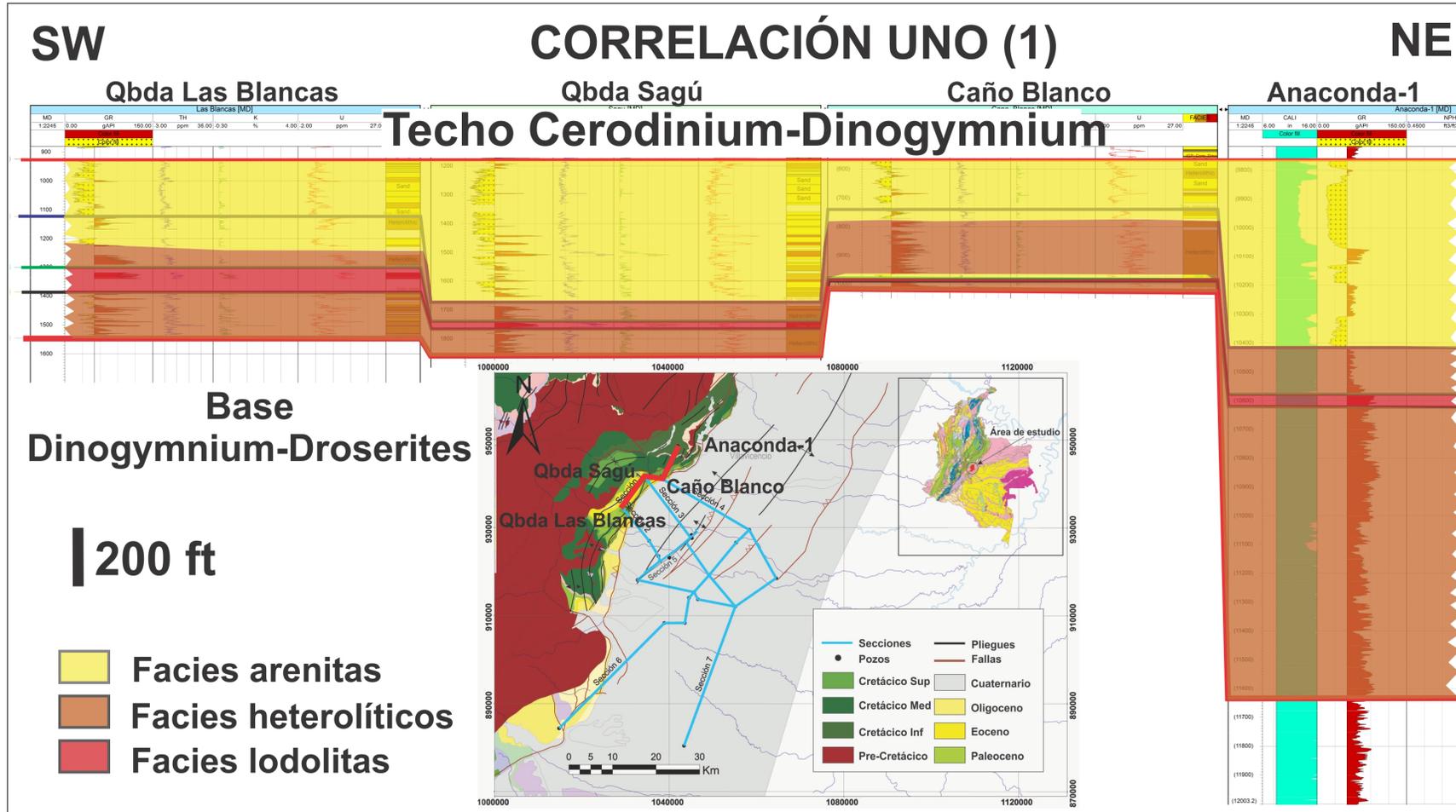
A continuación se presentan los resultados de las correlaciones elaborados en este trabajo:

### **Correlación Uno (1).**

La correlación uno (1) (Ver figura 23), es la que se encuentra ubicada en la parte más Noroccidental del área de trabajo, esta incluye todas las secciones medidas y un pozo que se encuentra sobre el Piedemonte. Las localidades en esta son desde la región más Suroccidental hasta lo más Nororiental:

- Quebrada Las Blancas.
- Quebrada Sagú.
- Caño Blanco.
- Pozo Anaconda-1.

**Figura 23:** Correlación Uno (1). Los límites marcados como base Dinogymnium-Droserites y techo Cerodium-Dinogymnium son biozonas, los demás son horizontes guías determinados en este trabajo para correlacionar. Se observa como el espesor en general aumenta en dirección Noreste (aproximadamente de 200m a 580m), los espesores por electrofacies no muestran una tendencia marcada, por el contrario se notan aumentos y disminuciones a lo largo de la sección.



En esta correlación se observa un aumento de espesor hacia la parte más Norte, donde se encuentra el pozo Anaconda-1, específicamente en la parte basal la cual corresponde a la electrofacies de niveles heterolíticos, el cual pasa de aproximadamente 200m a 580m.

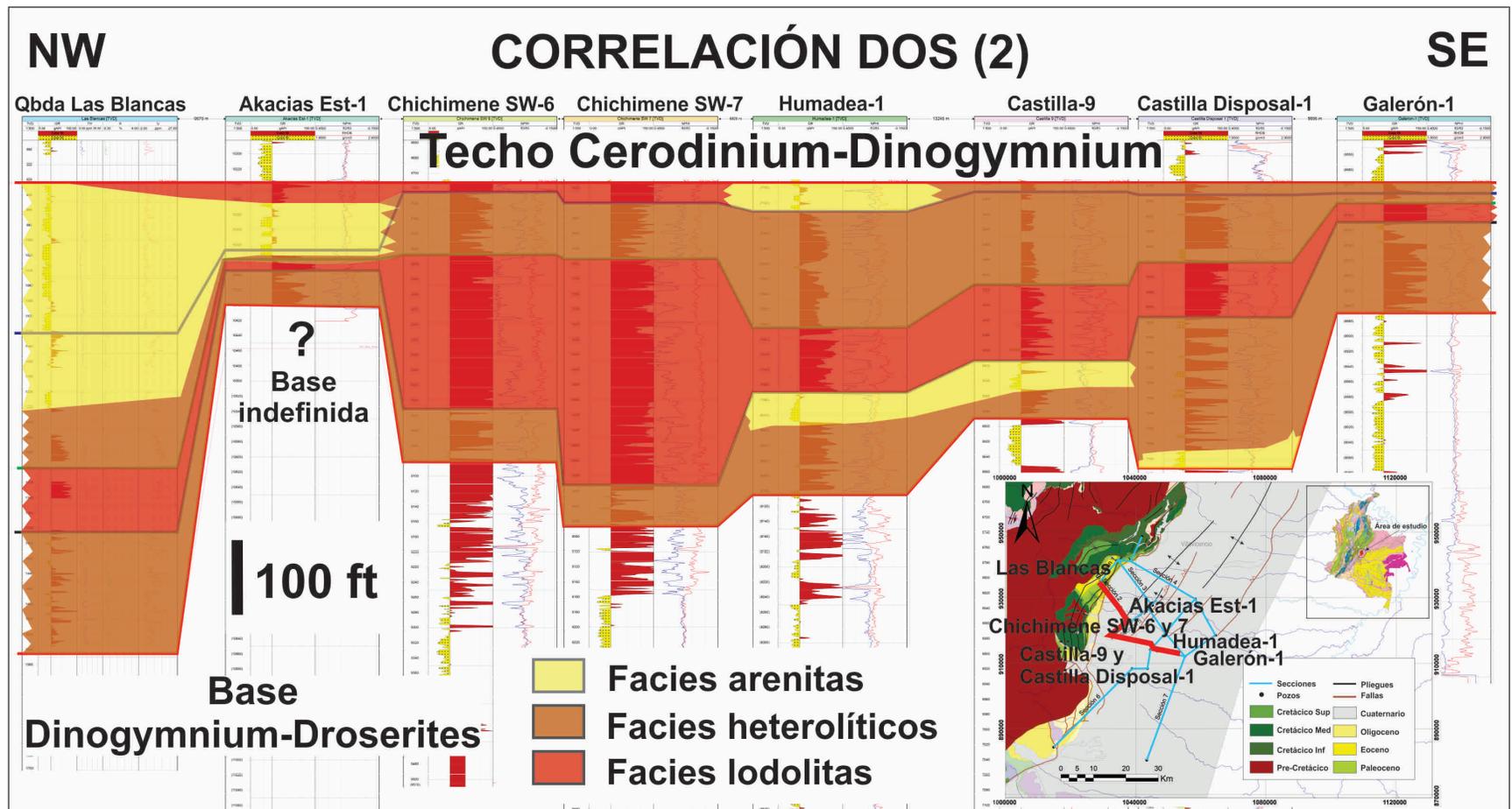
Esta correlación no muestra cambios laterales de facies significativos dentro de los niveles identificados. La tendencia general del comportamiento de los espesores se nota como un aumento hacia la parte Nororiental. El espesor para la electrofacies lodolitas presenta el mismo comportamiento en la variación del espesor contrario a la tendencia general. Aunque la variación del espesor no es tan notable, esto es porque la potencia no es muy grande hacia el Sur donde se observa el mayor espesor. Suprayaciendo e infrayaciendo esta electrofacies, se observan electrofacies de niveles heterolíticos, la cual no muestra un comportamiento con tendencia ya que el espesor de esta es variable a través de la dirección analizada. La electrofacies de arenitas muestra un aumento de espesor en las zonas donde se encuentran la sección de la Quebrada Sagú y el pozo Anaconda-1, cabe notar que en la sección de Caño Blanco se observa una pequeña capa a la base.

### **Correlación Dos (2).**

Esta correlación es la que se encuentra más al Sur y esta orientada en sentido Nororiental - Sureste. La correlación dos (2) (Ver figura 24), en esta se incluyen los siguientes pozos y sección estratigráfica:

- Quebrada Las Blancas.
- Akacias Estratigráfica-1.
- Chichimene Sw-6.
- Chichimene Sw-7.
- Humadea-1.
- Castilla-9.
- Castilla Disposal-1.
- Galerón-1.

**Figura 24:** Correlación Dos (2). Los límites marcados como base Dinogymnium-Droserites y techo Cerodinium-Dinogymnium son biozonas, los demás son horizontes guías determinados en este trabajo para correlacionar. Se observa como el espesor en general disminuye en dirección Sureste (aproximadamente de 190m a 55m), los espesores por electrofacies muestran tendencias diferente, donde lo más relevante es que aparecen paquetes delgados aislados de arenitas y un aumento significativo en el espesor de las lodolitas y las electrofacies heterolíticas en el centro de la sección.



En esta se observa una tendencia marcada a disminuir el espesor en dirección Sureste, pasando de aproximadamente 190m a 55m. En el pozo Akacias Estratigráfico-1 se observa poco espesor, pero esto es debido a que en ese pozo no se encuentra registrada la base que posiblemente se encuentra más abajo.

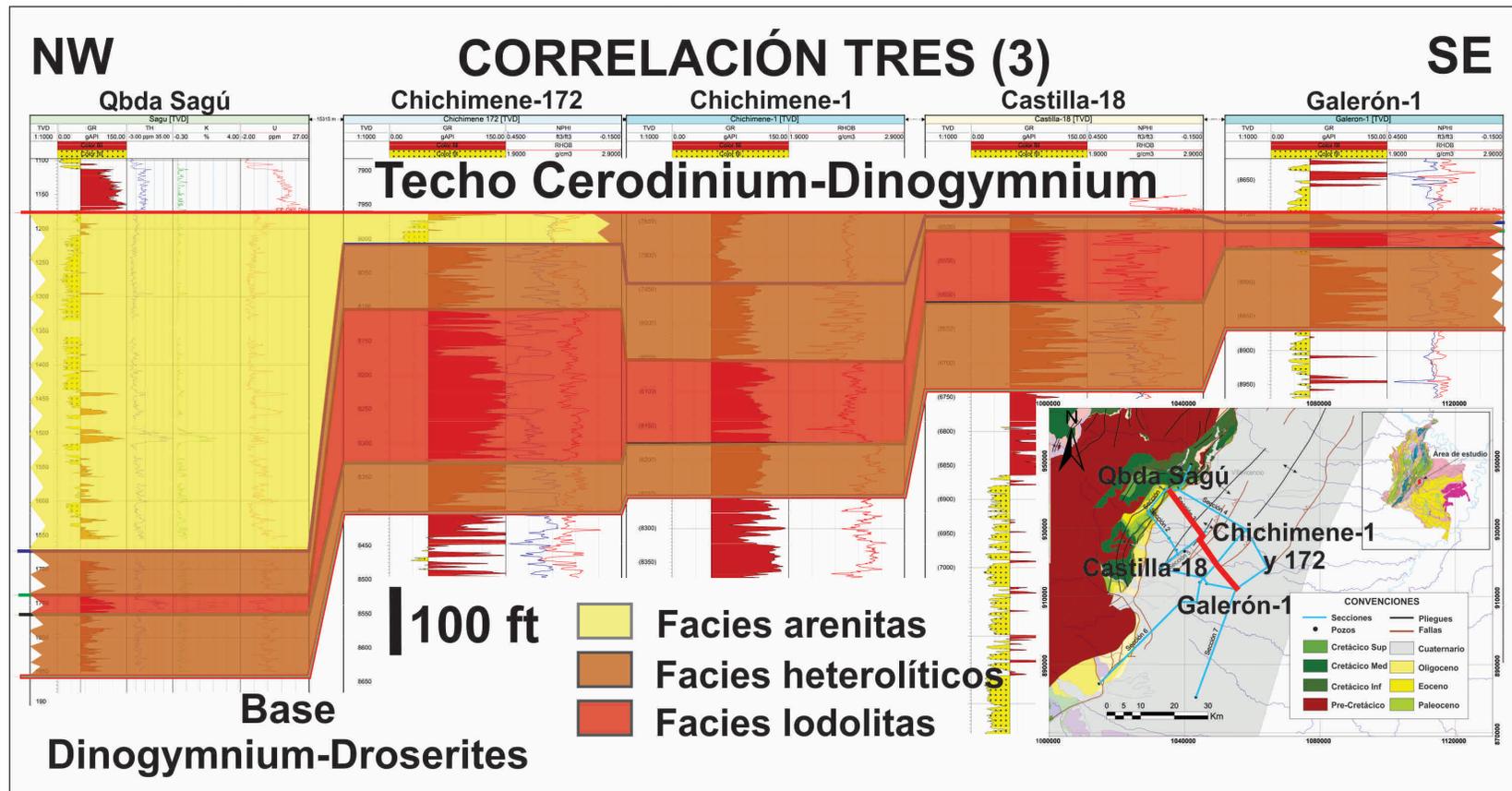
En esta correlación se observan variaciones laterales en las electrofacies, donde se pueden identificar paquetes pequeños y aislados de arenitas. Estas se encuentran principalmente hacia el Nororiente, en la Quebrada Sagú y el pozo Akacias Estratigráfico-1 y a partir del pozo Humadea-1 en sentido Sureste hasta el pozo Castilla Disposal-1. Estas electrofacies de arenitas están ubicadas en el nivel más basal y más superior del Grupo Guadalupe. La electrofacies lodolitas conserva la tendencia general de adelgazamiento, pero hacia el más o menos el centro muestra un incremento de espesor, esto es donde se encuentran los pozos Chichimene Sw-6 y Chichimene Sw-7. La electrofacies que corresponde a niveles heterolíticos aparece a la base de la sección y al techo de esta, dentro de lo cual la de la base presenta un menor espesor en el centro de la correlación donde están los pozos Chichimene Sw y aumenta en el sentido de los extremos. La más próxima al techo muestra un comportamiento diferente, donde se observa un aumento de espesor al centro (pozo Humadea-1 y Castilla-9) y adelgazamientos a los extremos.

### **Correlación Tres (3).**

Esta correlación se orienta en sentido Noroeste-Sureste (Ver figura 25) y esta constituida por:

- Quebrada Sagú.
- Chichimene 172.
- Chichimene 1.
- Castilla 18.
- Galerón 1.

**Figura 25:** Correlación Tres (3). Los límites marcados como base Dinogymnium-Droserites y techo Cerodinium-Dinogymnium son biozonas, los demás son horizontes guías determinados en este trabajo para correlacionar. Se observa como el espesor en general disminuye en dirección Sureste (aproximadamente de 210m a 55m), los espesores por electrofacies muestran tendencias diferente, lo más notorio es que las arenitas están restringidas a la zona Noroeste y se adelgaza al Oriente.



En esta correlación se observa una disminución de espesor hacia el Sureste, el cual disminuye desde aproximadamente 210m hasta 55m. El comportamiento individual por electrofacies es muy similar a la tendencia general.

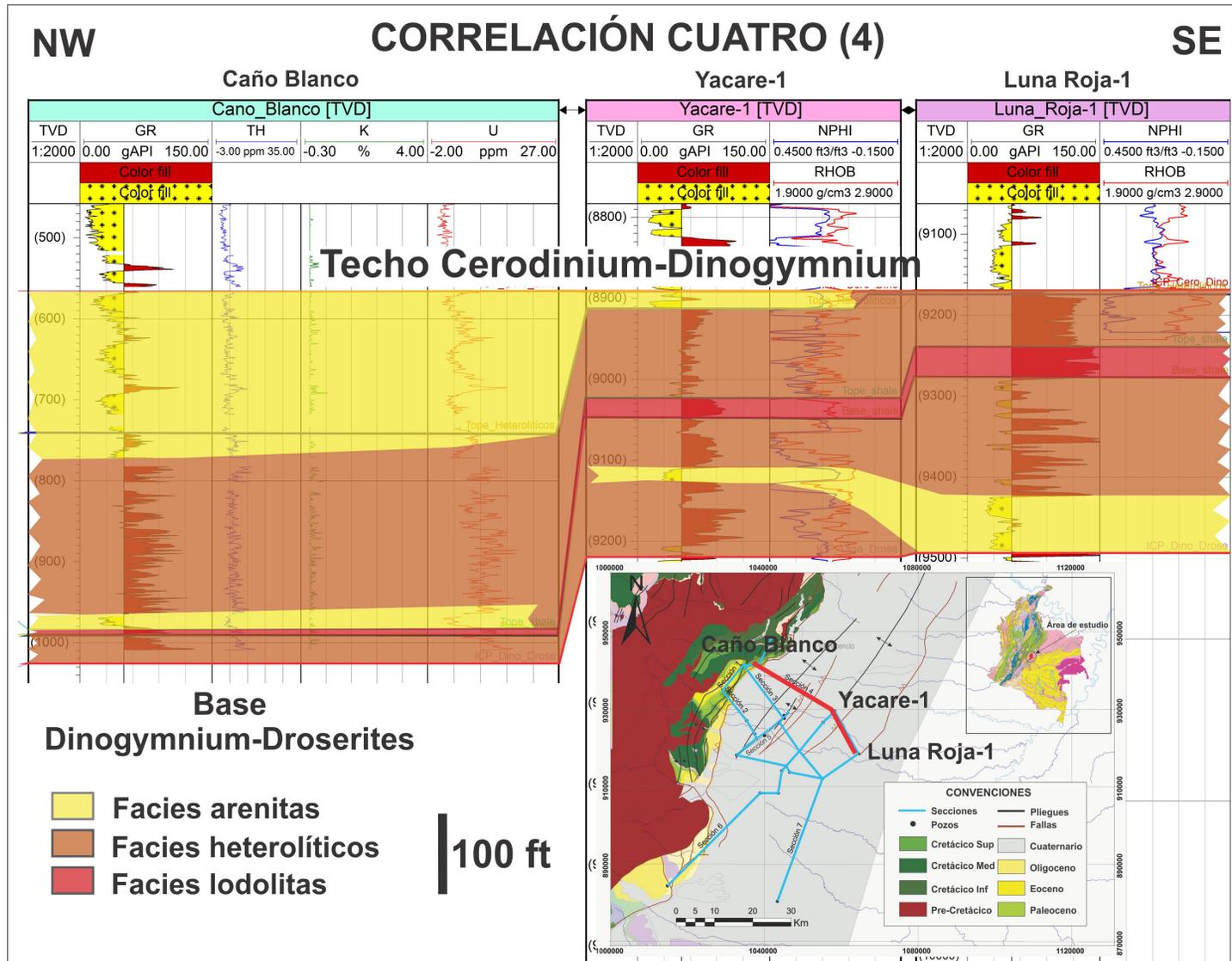
Las electrofacies de arenitas en esta se observa en la zona más Noroeste y se va adelgazando hacia el Sureste y se pierde entre los pozos Chichimene-172 y Chichimene-1. El comportamiento de la electrofacies de lodolitas en esta sección muestra un aumento de espesor en la parte media, donde se encuentran los pozos Chichimene-172, Chichimene-1 y Castilla 18 y hacia los extremos muestra adelgazamientos. El comportamiento de las electrofacies heterolíticas es un poco diferente, las que se encuentran al techo están más espesas en el centro de la correlación (pozos Chichimenes) y las de la base tienen un espesor bastante homogéneo con una pequeña tendencia al aumento en sentido Sureste.

#### **Correlación Cuatro (4).**

Esta correlación se orienta del Noroeste al Sureste (Ver figura 26) y en esta se encuentran los siguientes pozos y columna estratigráfica:

- Caño Blanco.
- Yacare-1.
- Luna Roja-1.

**Figura 26:** Correlación Cuatro (4). Los límites marcados como base Dinogymnium-Droserites y techo Cerodinium-Dinogymnium son biozonas, los demás son horizontes guías determinados en este trabajo para correlacionar. Se observa como el espesor en general disminuye en dirección Sureste (aproximadamente de 135 m a 100 m), los espesores por electrofacies muestran tendencias diferente, lo más notorio es que las arenitas muestran dos tendencias una a la base y otra al techo. Al techo, la arenitas disminuye en sentido Sureste y a la base aumenta en esta misma dirección.



Esta correlación muestra tendencia a disminuir el espesor en sentido Sureste, la disminución va desde aproximadamente 135 m en el Caño Blanco hasta 100 m en el pozo Luna Roja-1.

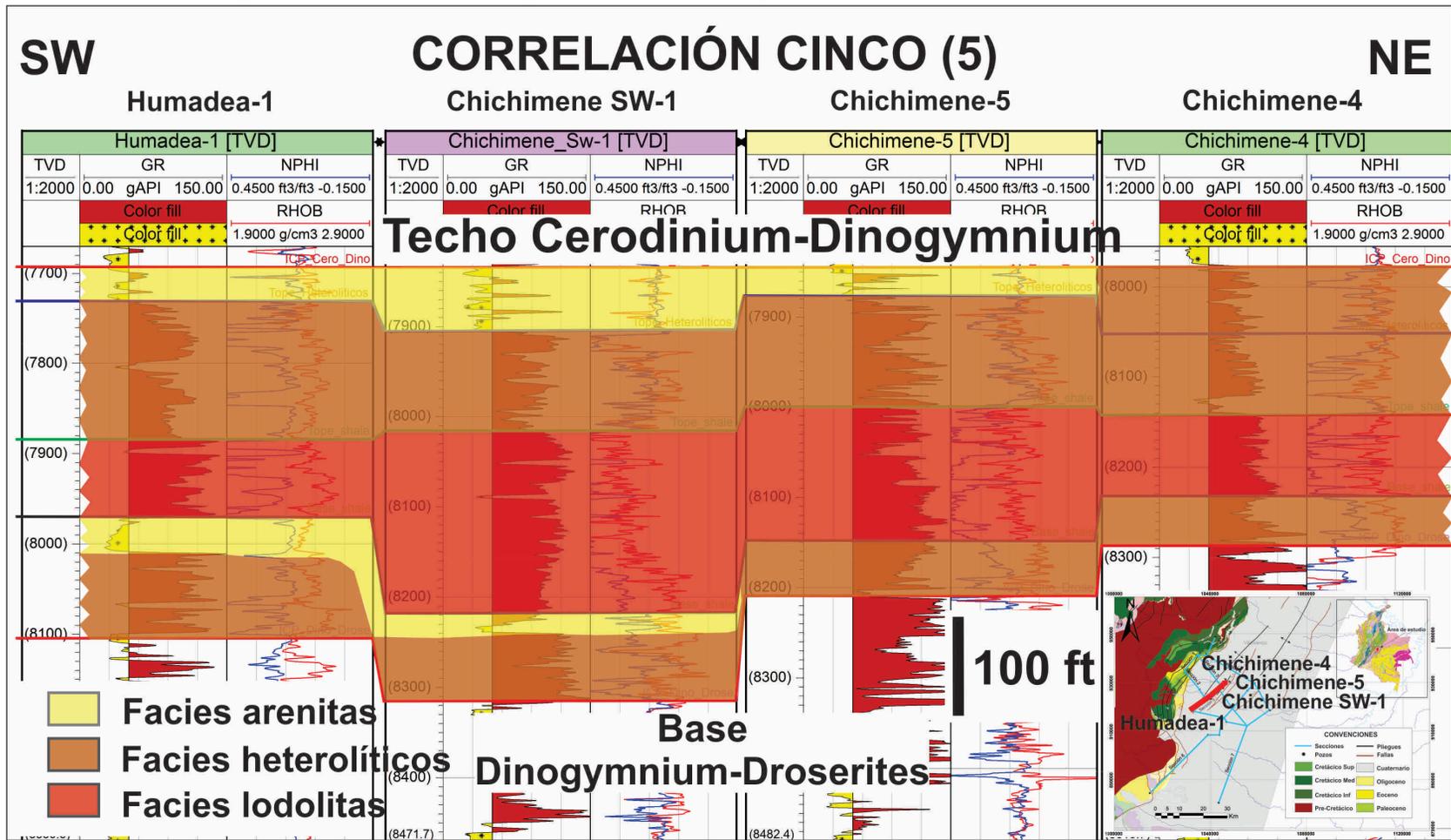
La electrofacies de arenitas en esta correlación se encuentra en dos niveles, uno a la base que muestra un leve aumento de espesor en sentido Sureste y la potencia de este nivel es poca. La electrofacies de lodolitas en este sector no aparece con buenos espesores, estos son bastante delgados y casi desaparece hacia el Noreste, lo que se puede observar en la sección de Caño Blanco. Las electrofacies heterolíticas muestra un espesor bastante constante a lo largo de la correlación, los dos niveles que se distinguen de esta electrofacies están separadas por el pequeño nivel de lodolitas que aparece al Noreste y por un delgado nivel de arenitas en esta misma dirección.

#### **Correlación Cinco (5).**

Esta correlación esta orientada de Suroeste-Noreste (Ver figura 27), esta la componen únicamente los pozos:

- Humadea-1.
- Chichimene Sw-1.
- Chichimene-5.
- Chichimene-4.

**Figura 27:** Correlación Cinco (5). Los límites marcados como base Dinogymnium-Droserites y techo Cerodinium-Dinogymnium son biozonas, los demás son horizontes guías determinados en este trabajo para correlacionar. Se observa como el espesor en general es mas o menos homogéneo, con un pequeño adelgazamiento al Noreste(aproximadamente de 127 m a 92 m), los espesores por electrofacies muestran tendencias diferente, lo más notorio es que la arenitas aparece en dos niveles un al techo y otra a la base. Al techo la arenita disminuye en sentido Noreste ligeramente, con un aumento aislado en el pozo Chichimene Sw-1 y a la base disminuye en la misma dirección.



Esta correlación muestra un espesor aproximadamente homogéneo, notando un pequeño adelgazamiento hacia el final en el Noreste y un pequeño aumento en el pozo Chichimene Sw-1.

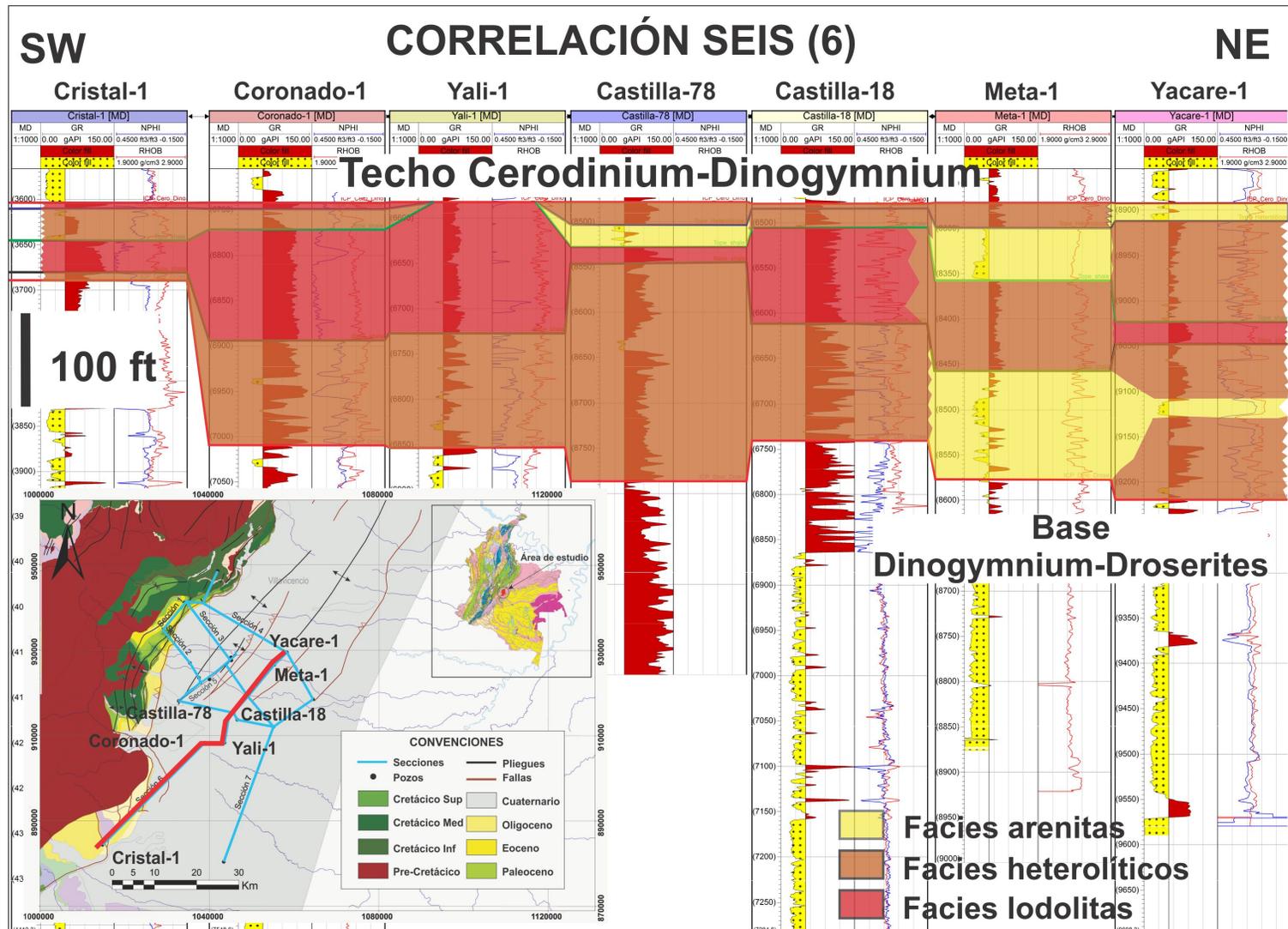
Las electrofacies de arenitas en esta correlación aparece en dos niveles con poco espesor, uno en el techo propiamente dicho y otro aproximadamente a la base; el del techo muestra un pequeño aumento de espesor en el pozo Chichimene Sw-1 y se observa como pequeños niveles de arenitas intercalada con litologías más finas. Las de la parte inferior son niveles aislados con tendencia a disminuir el tamaño de grano. La electrofacies de lodolitas se observa en un nivel más o menos a la parte media con alguna tendencia a la base, este muestra un pequeño adelgazamiento hacia los extremos de la correlación y a la parte media se observa aumento en el espesor, sobre todo en el pozo Chichimene Sw-1. Las electrofacies heterolíticas están en dos niveles, uno por debajo de las arenitas del techo con espesores que aumenta hacia las partes externas de la correlación. Aparece otro a la base de la sección con un espesor menor y que se mantiene muy constante.

### **Correlación Seis (6).**

Esta correlación está dirigida de Suroeste-Noreste (Ver figura 28 ), la constituyen los siguientes pozos:

- Cristal-1.
- Coronado-1.
- Yalí-1.
- Castilla-78.
- Castilla-18.
- Meta-1.
- Yacare-1.

**Figura 28:** Correlación Seis (6). Los límites marcados como base Dinogymnium-Droserites y techo Cerodinium-Dinogymnium son biozonas, los demás son horizontes guías determinados en este trabajo para correlacionar. Se observa como el espesor en general aumenta en dirección Noreste (aproximadamente de 27 m a 100 m), los espesores por electrofacies muestran tendencias diferente, lo más notorio es que las arenitas muestran tres niveles principalmente al Norte. Donde los mayores espesores aparecen en el pozo Meta-1.



La dirección de esta correlación es Suroeste-Noreste y muestra un espesor menor hacia el Suroeste, lo cual se puede observar en el pozo Cristal-1. En los demás pozos el espesor se mantiene muy homogéneo, en esto cabe notar que el pozo Cristal-1 se encuentra bastante alejado de los otros. El espesor en el pozo Cristal-1, que es el más Suroeste es de 27 m y en el más Norte es de 100 m aproximadamente.

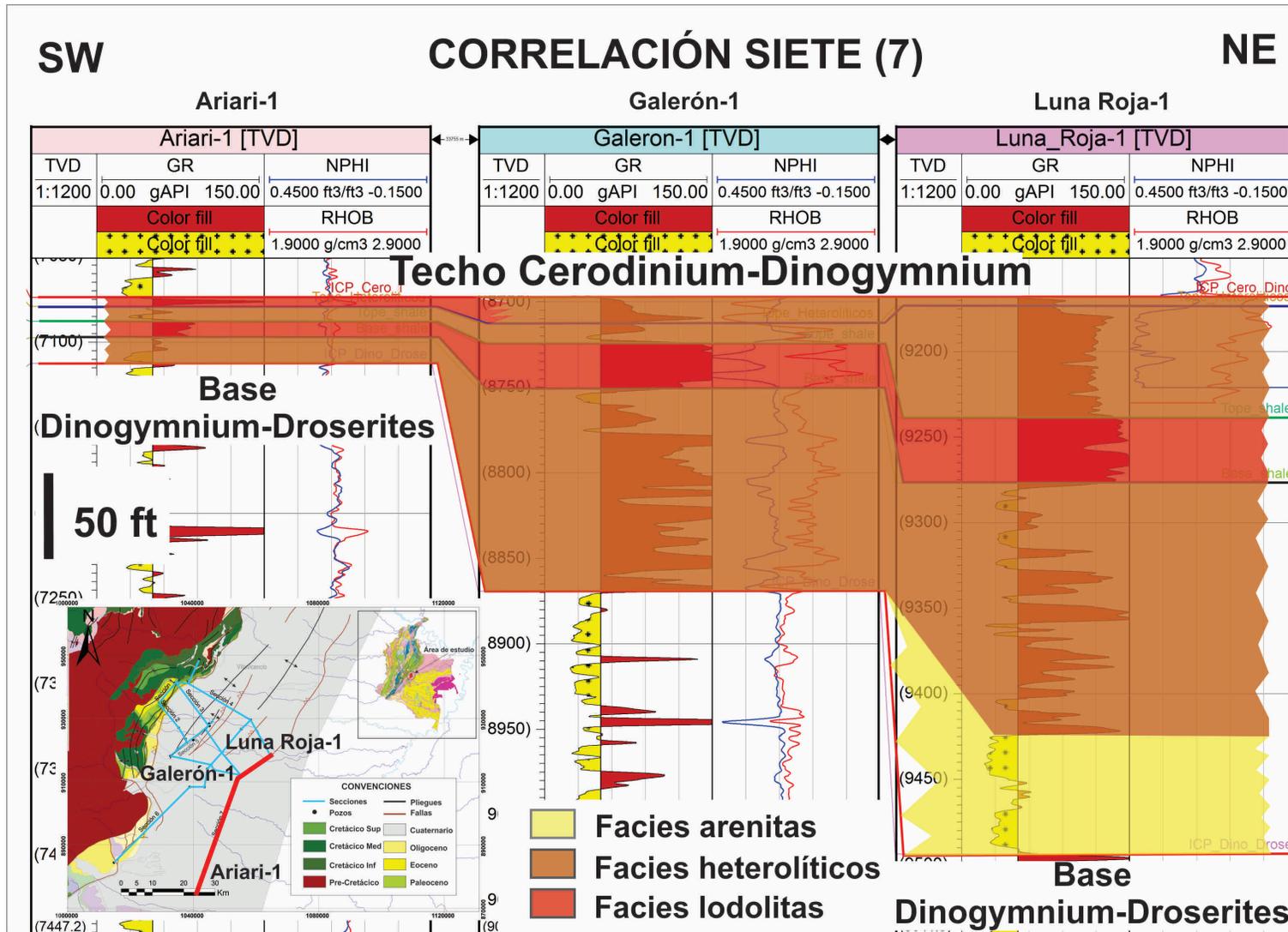
La electrofacies de arenitas en esta sección se observa en tres niveles, los cuales aparecen desde el pozo Castilla-78 y en los dos últimos al Noreste de la correlación. El nivel de arenitas que aparece en el pozo Castilla-78 es delgado y se nota como pequeños niveles intercalados con rocas de granulometrías más finas. Los niveles que aparecen en el extremo más Norte, aparecen al techo y a la base. Los mayores espesores están en el pozo Meta-1 donde se observa dos niveles marcados, a la base esta intercalada con litologías más finas y al techo es un solo nivel con tendencia granodecreciente. El espesor en el pozo más Norte es mucho menor. La electrofacies de lodolitas en esta sección aparece predominantemente hacia el Sur, también se nota un pequeño nivel al Norte en el pozo Yacare-1 y al Sur otro bien delgado en los pozos Cristal-1 y Coronado-1. Los espesores más grandes se encuentran en los pozos Coronado-1, Yalí-1 y Castilla-18, este se adelgaza al Sur y al Norte. Al Norte no se observa esta electrofacies en el pozo Meta-1. La electrofacies heterolíticas en esta sección aparece principalmente en un único nivel, con dos pequeños niveles aislados en las partes externas de la correlación. El nivel principal no muestra una tendencia definida, se observa un engrosamiento al centro de la sección y disminución del espesor a los extremos de la sección. Los niveles aislados son de poco espesor y se ubican al Norte a la base del pozo Yacare-1 y al Sur al techo de los pozos Cristal-1 y Coronado-1.

### **Correlación Siete (7).**

Esta correlación esta en la zona más Oriental del área de estudio y esta en dirección Suroeste-Noreste e incluye los siguientes pozos (Ver figura 29):

- Ariari-1.
- Galerón-1.
- Luna Roja-1.

**Figura 29:** Correlación Siete (7). Los límites marcados como base Dinogymnium-Droserites y techo Cerodinium-Dinogymnium son biozonas, los demás son horizontes guías determinados en este trabajo para correlacionar. Se observa como el espesor en general disminuye en dirección Sureste (aproximadamente de 35 m a 13 m), los espesores por electrofacies muestran tendencias muy similares a la general, lo más notorio es que las arenitas están restringidas a la base del pozo mas al Norte (Luna Roja-1).



Esta correlación se encuentra en dirección Suroeste-Noreste. En esta sección se nota un fuerte aumento de espesor hacia el Norte, el cual va desde 13 m hasta 35 aproximadamente.

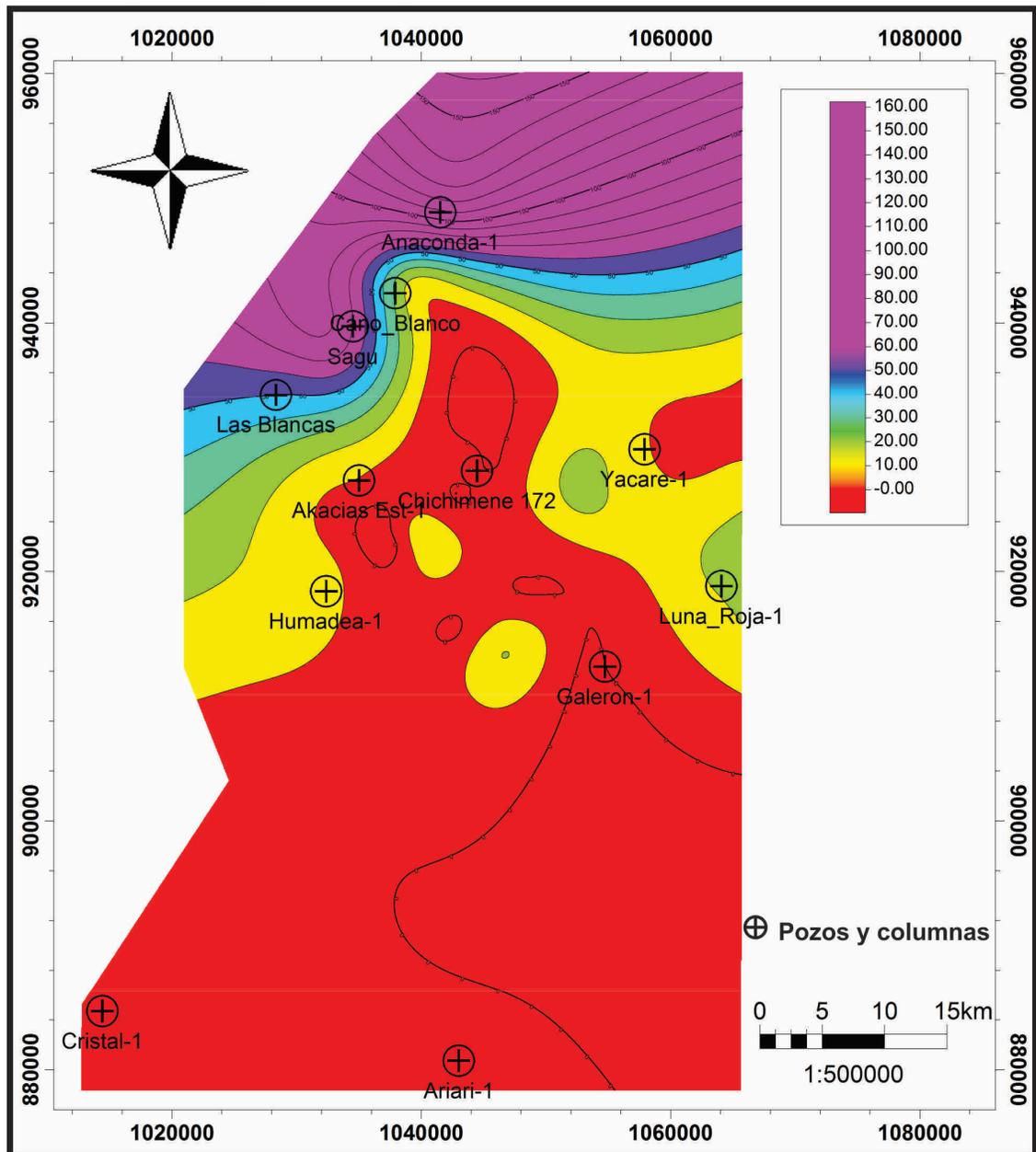
En esta sección la electrofacies arenitas se restringe al Norte como se puede ver en el pozo Luna Roja-1, en este pozo se observa a la base del pozo como dos niveles separados por una delgada capa de una litología de menor tamaño de grano. La electrofacies de lodolitas en esta correlación aparecen como un delgado nivel entre dos niveles de niveles heterolíticos, el cual se hace más delgado hacia el Sur. También se observa un pequeño nivel en el tope al Sur que se pierde entre el pozo Ariari-1 y Galerón-1. Los niveles de heterolíticos aparecen en dos niveles, unos suprayaciendo las lodolitas y otro subyacente a estos. Los que se encuentran por encima de las lodolitas son de menor espesor, siendo este más espeso al Norte y disminuyendo su potencia al Sur. Inclusive en la parte mas al techo cambia de electrofacies. Los que se encuentran por debajo de las lodolitas son más potentes pero conservan la misma tendencia de pérdida de espesor al Sur.

#### **4.5. Facies con potencial para acumular hidrocarburos.**

Las facies arenosas con potencial para la acumulación de hidrocarburos se encuentran principalmente en la parte Norte del área de estudio. Esto se observa en los mapas de espesor de arena que se elaboraron (Ver figura 30).

El mapa de espesor de facies de arenitas para todo el intervalo identificado contemporáneo con el Grupo Guadalupe, muestra una tendencia a mejores espesores en la parte Norte del área de estudio. También se observan arenitas al Este Y Oeste hasta más o menos la parte media de la zona, están aparecen separadas por una región con ausencia de arenitas. Estas regiones aisladas van en el Oeste hasta alrededor del pozo Humadea-1 y las del Este hasta el pozo Luna Roja-1. En la parte central de la zona se observan dos zonas aisladas de Arenas, las cuales están influenciadas por los pozos Chichimene Sw-1 al Noroeste y Castilla Disposal-1 al Sureste (Ver figura 30).

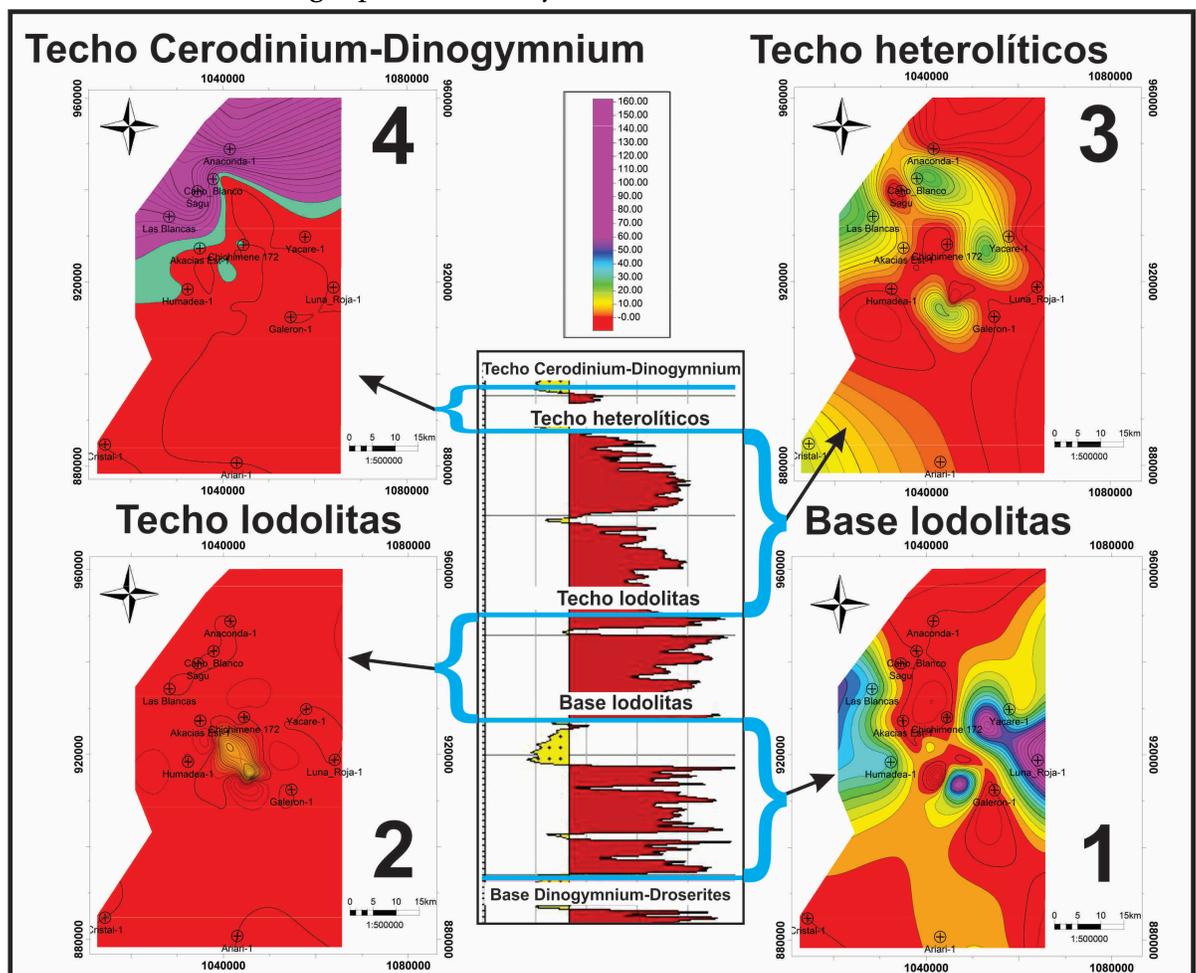
**Figura 30:** Mapa de espesor de facies de arenitas. El color púrpura representa los valores más altos y el rojo los valores menores. En este mapa se observa que los mejores espesores de las facies arenosas se encuentran ubicadas en la parte Norte de la zona. De igual manera se nota que en la parte media en los extremos Oriental y Occidental hay espesores con menor potencia, pero no despreciables.



Los mapas elaborados al techo de cada nivel establecido en las correlaciones muestran lo siguiente de base a techo: en la parte más basal (entre los horizontes base Dinogymnium-Droseriotes y base lodolitas), la presencia de facies de arenitas aparece predominantemente en dos franjas, una al Este y otra al Oeste de la zona separados por una con ausencia de estas. En el siguiente nivel (entre los horizontes base lodolitas y techo lodolitas), la presencia de facies de arenitas esta prácticamente ausente excepto por un pequeño espesor que aparece en el pozo Castilla-9. Suprayaciendo este nivel (entre los horizontes techo lodolitas y techo heterolíticos) se observan pequeños niveles de facies de arenitas principalmente al Norte en dos franjas al Este y Oeste separadas por una región sin estos depósitos. Finalmente en el nivel cuyo techo es el limite de toda la sección (entre los horizontes techo heterolíticos y techo Cerodinium-Dinogymnium), se observan los mejores espesores y mayor continuidad de las arenitas; los cuales se encuentran en la parte Norte (Ver figura 31).

Las facies de arenitas identificadas en general presentan condiciones buenas a regulares como reservorio, debido a que en algunos casos los niveles no son tan continuos y su espesor no es muy grande. Además de esto en todos los niveles arenosos no se observan buenas condiciones de porosidad, esto se observa en los registros nucleares (Neutron y Densidad). La extensión de las arenitas y la continuidad en la parte Norte es buena.

**Figura 31:** Mapas de arenitas por cada uno de los niveles usados para correlacionar. En esta imagen se muestran los mapas asociados a los intervalos mapeados. 1) Entre la base Dinogymnium-Droserites y base lodolitas, se observa que los mejores espesores para este nivel se encuentran al Oriente y Occidente predominantemente en la zona media. 2) Entre la base lodolitas y el techo lodolitas, en este la arena prácticamente esta ausente. 3) Entre techo lodolitas y techo heterolíticos aparecen espesores considerables en varios puntos de la zona, los cuales están predominantemente desde la parte media hacia el Norte sin llegar hasta el limite del área en ese sentido. 4) Entre techo heterolíticos y techo Cerodinium-Dinogymnium), en este nivel se encuentran los mejores espesores los cuales se agrupan al Norte y al Noroccidente.



## **4.6. Mapas Paleogeográficos**

A continuación se describen los mapas paleogeográficos elaborados en cuatro (4) niveles en el intervalo de roca objeto de esta investigación.

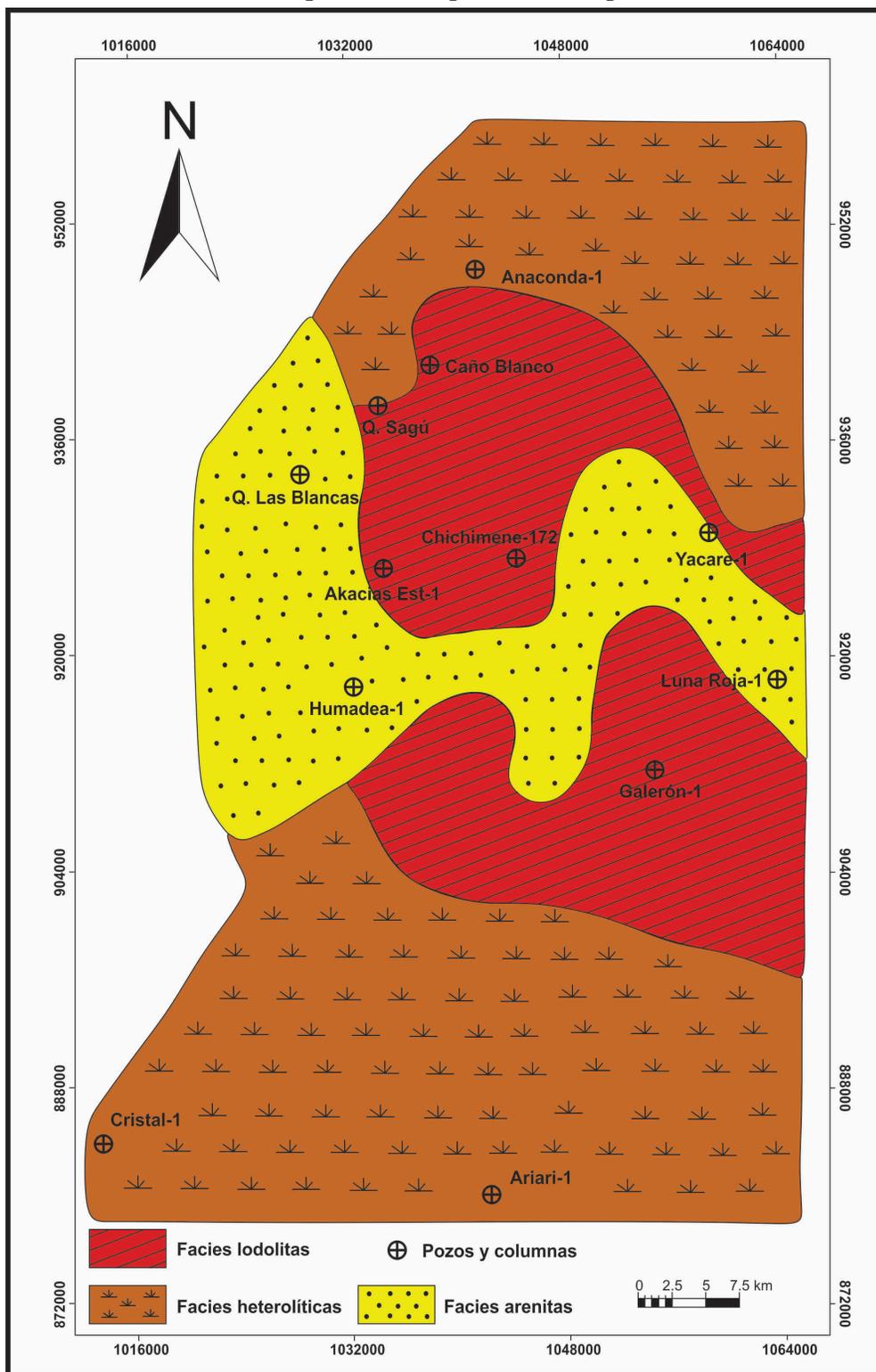
### **4.6.1. Nivel 1 (Base de la secuencia).**

En este nivel se observa el valle aluvial en la parte media aproximadamente, esta franja de facies de arenitas se hace más amplio hacia el Oeste (Ver figura 32). Alrededor de esta franja de facies de arenitas se encuentran las facies más finas (lodolitas), las cuales se extienden hacia el Norte y el Sur de la zona. En este nivel, las facies heterolíticas aparecen hacia los extremos del área al Norte y al Sur de esta.

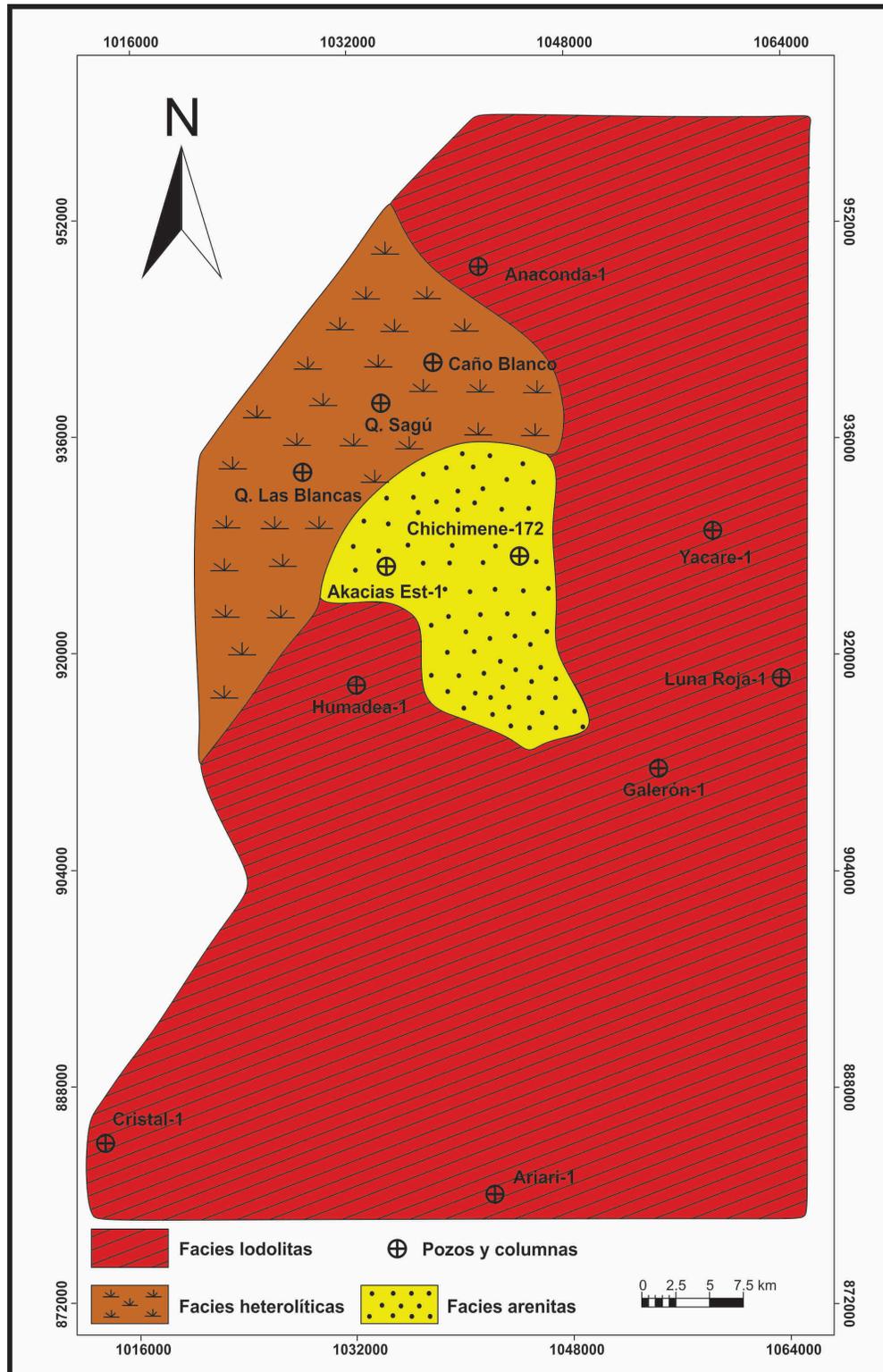
### **4.6.2. Nivel 2.**

Este nivel, que esta suprayaciendo el nivel más basal, muestra un predominio de las facies más finas descritas para la zona (lodolitas), donde se observa que aparece en la gran parte del área. Esta se encuentra principalmente distribuida hacia la parte media y Oriental de Norte a Sur, notando la ausencia de ella en la parte media Occidental. La electrofacies arenitas en este nivel aparece restringida a la parte central del mapa. Las electrofacies heterolíticas se encuentran en la parte Noroccidental en contacto con el cuerpo arenoso (Ver figura 33).

**Figura 32:** Mapa paleogeográfico para el nivel más basal. En este nivel se observa la distribución arenosa formando un cinturón que asemeja un valle aluvial, el cual se encuentra rodeado de las facies más finas (lodolitas) y las facies de Llanura mareal que están representadas por las facies heterolíticas.



**Figura 33:** Mapa paleogeográfico para el nivel 2. En esta se observa el predominio de las facies más finas (lodolitas), las facies arenosas se ven como un relicto en la parte media del área y las facies heterolíticas al frente de estas en la parte Noroccidental.



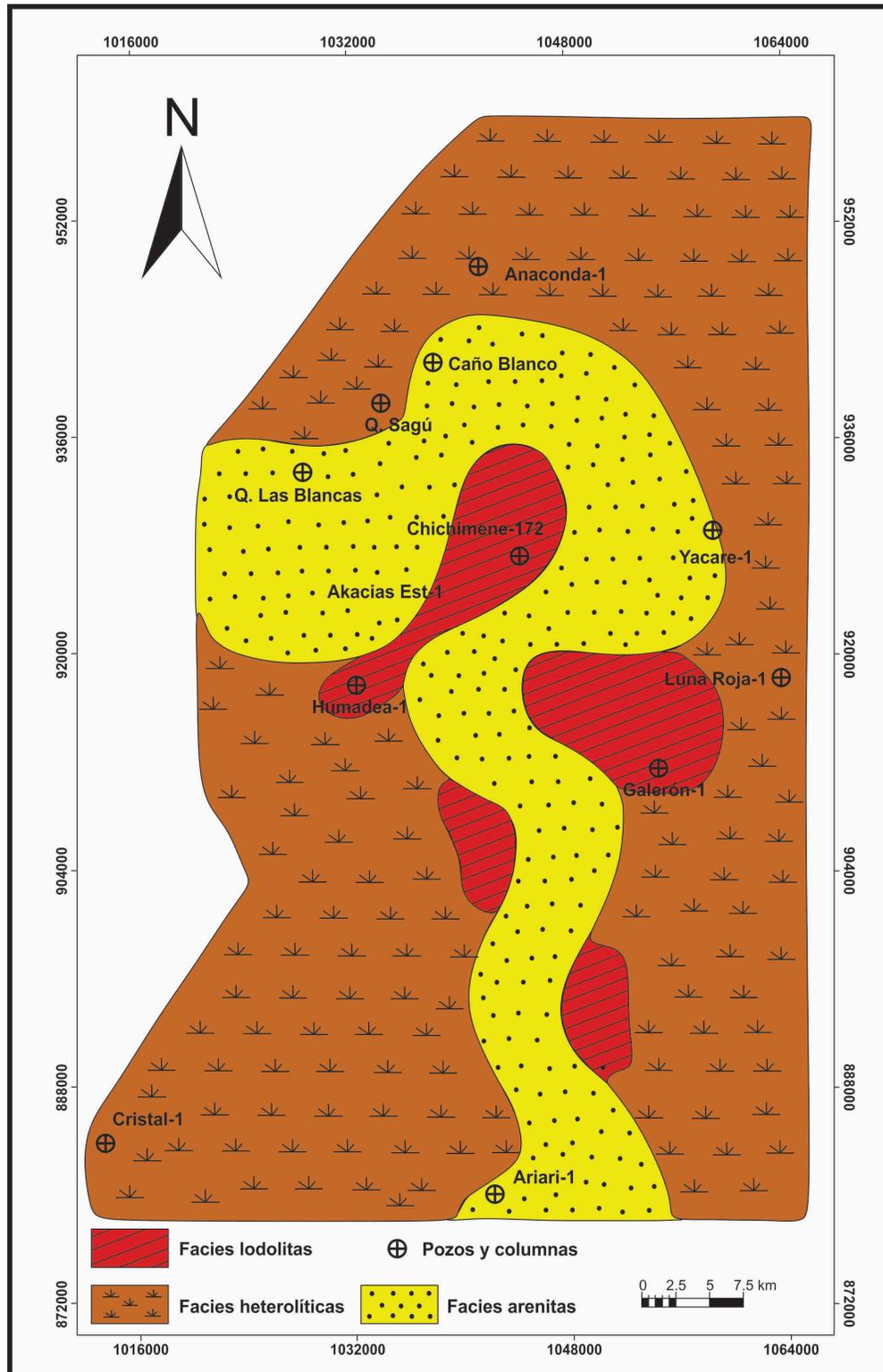
### **4.6.3. Nivel 3.**

Este nivel se caracteriza por el predominio de las facies heterolíticas, las cuales se ubican predominantemente en el extremo Norte del área, hacia la parte Occidental desde la parte media hasta el Sur y al Oriente en una franja delgada que se conecta con la distribución al Norte y se prolonga hasta el Sur. Las facies de arenitas aparecen en una franja la cual va aumentando su amplitud desde la parte Sur hacia la parte Noroccidental, estas arenitas están distribuidas por la parte media de la zona y presentan un comportamiento sinuoso. Esta sinuosidad se observa más pronunciada en la parte Noroccidental. Las facies más finas (lodolitas) están restringidas a las curvas interiores a ambos lados de la franja donde se encuentra la distribución de facies arenosas (Ver figura 34).

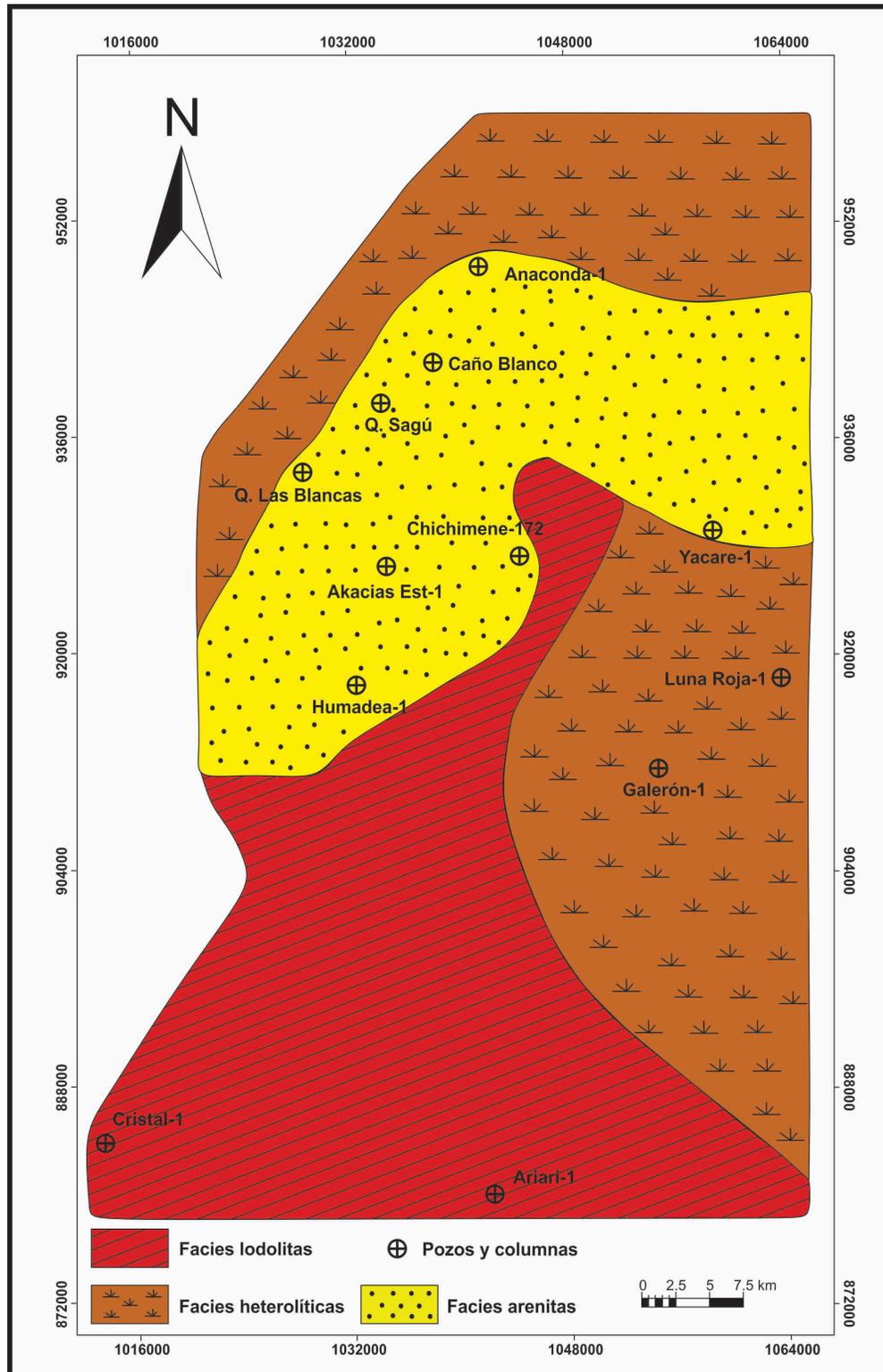
### **4.6.4. Nivel 4(Tope de la secuencia).**

Este nivel, que es el final de la secuencia objeto de este trabajo muestra una distribución diferente de facies. Las facies arenosas en este nivel se observan en una franja levemente sinuosa, la cual esta orientada de Nororiente a Suroccidente. Además se encuentra desde la parte media hacia el Norte. Las facies heterolíticas se encuentra en la parte más Norte y en un franja hacia el Oriente y por debajo de la ubicación de las facies arenosas. Las facies finas están restringidas a la parte Suroccidental por debajo del cinturón arenoso (Ver figura 35).

**Figura 34:** Mapa paleogeográfico al nivel 3. En este nivel se muestra claramente la predominancia de las facies heterolíticas, las cuales se encuentran alrededor del cinturón de facies arenosas. Las facies más finas (lodolitas) aparecen en las curvas interiores de cinturón de arenas.



**Figura 35:** Mapa paleogeográfico al nivel del tope de la secuencia. En este mapas no se observa una buena distribución de las facies, esta es debido posiblemente a que el techo de este nivel es erosivo lo que genera un caos debido a este proceso de cambio en el paisaje.



## 5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

### 5.1. Facies y ambiente de depósito.

Las facies descritas muestran que los sedimentos fueron depositados en un ambiente transicional con influencia de mareas, esto representado principalmente por facies como:

- Arenita con ondulas (S r).
- Arenita con laminación *Herringbone* (S h).
- Arenita con laminación *Flaser* (S f).
- Arenita con laminación *Wavy* (S w).
- Arenita con laminación ondulosa y lentes de arena (S wl).

La laminación *flaser* es una estructura sedimentaria caracterizada por la alternancia de arenas con ondulas y capas de lodo discontinuas, las cuales son creadas por la depositación de lodo sobre ondulas previamente formadas. De manera semejante la laminación *wavy* consiste de la alternancia de arenas con ondulas y capas de lodo, pero con mayor espesor y con mayor continuidad horizontal de las capas de lodo. Estos dos tipos de estructura se originan en un sistema de depósito que alterna un relativo alto régimen de flujo con el reposo del agua. Donde la arena forma las ondulas durante el tiempo del flujo y el lodo se deposita en la etapa de quietud (Reineck and Wunderlich, 1968). Por lo cual se infiere la influencia de las mareas en el área de trabajo. De igual manera (Martinius et al., 2001) interpreta que estas litofacies han sido depositadas en aguas tranquilas, ricas en lodos, con una tasa de depositación baja desde procesos por suspensión hasta la depositación de arenas por corrientes de tracción. Corrientes que junto al régimen de flujo y tamaño de las partículas son las responsables de formar las estructuras físicas mencionadas anteriormente (Leeder, 2009).

Estas facies además dan evidencia de un ambiente de depósito estuarino, como lo evidencian capas de roca que se encuentran asociados a diferentes procesos depositacionales. Debido a que los estuarios son sistemas complejos donde se encuentran contenidos y relacionados diferentes procesos depositacionales. Donde se ven involucrados olas, mareas y ríos dentro del mismo espacio (Boyd et al., 2006). Por la complejidad de dicho sistema es común encontrar estas litofacies en una sección de rocas:

- Arenita con laminación inclinada (S x).
- Arenita con laminación planoparalela (S lam).
- Limolita con laminación *Wavy* (Z w).
- Lodolita bioturbada (M biot).
- Lodolita con lentes de arenita (M l).
- Arenita conglomerática con laminación inclinada (gS x).
- Arenitas con intraclastos (S intr).

La erosión de los canales durante la transgresión puede generar barras de arena con laminación inclinada o laminación planoparalela (facies y asociaciones descritas en este trabajo). En la región central donde se mezclan los dos tipos de energía (fluvial y mareal) aparecen los depósitos de barras de arena, las cuales pueden estar suprayacidos e infrayacidos por depósitos de los canales rectos. En estos depósitos también pueden ocurrir dunas en los canales más profundos, las dunas y las ondulas son más abundantes en los meandros y en los canales rectos (representados en las facies con estructuras físicas tales como laminación inclinada y laminación con ondulas). El contacto entre las diferentes zonas de facies coincide con bases erosionales (facies con intraclastos, gránulos y arenitas ligeramente conglomeráticas), el banco de canales consiste de sedimentos con capas de arenas y lodos influenciadas por las mareas (facies heterolíticas) (Dalrymple et al., 1991). Este tipo de depósito también fue descrito por (Johnson and Levell, 1995) en Inglaterra para el Cretácico Inferior.

La asociación de facies en estas secciones muestra que hacia esta región del país el Grupo Guadalupe ha variado leve y lateralmente las facies sedimentarias, ya que en la CO se han reportado ambientes de depósito Marino (Hubach, 1952), Marino somero y Llanura mareal (Pérez et al., 1978), Marino somero y Frente de playa-Llanura costera (Guerrero et al., 1996).

## **5.2. Facies con potencial para acumular hidrocarburos.**

Las facies arenosas con potencial para acumular hidrocarburos se encuentran principalmente desde la parte media hacia el Norte y en la parte media se observan los mejores espesores al Oriente y Occidente. Sin embargo los espesores no son los mejores, además estas facies se encuentran conectadas con la sección Cenozoica que se encuentra en la zona y forman una unidad compacta que juntas si son una buena roca reservorio. También se observa que los espesores en general del Grupo Guadalupe se van adelgazando en sentido Suroriental.

### 5.3. Paleogeografía.

Lo que se puede notar en los niveles a los cuales se elaboraron los mapas paleogeográficos, es como las facies arenosas se agrupan en cinturones que pueden estar representando el valle que agrupa los canales fluviales dentro de un sistema de depósito Estuarino. Sobre esta distribución aparecen las facies de subambientes Estuarinos que complementan este sistema.

En el nivel al tope de la secuencia no se observa una distribución muy clara de las facies, esto debido probablemente a que este tope es erosivo. Dicho proceso puede generar esa anomalía en la distribución de las facies en el espacio. Las cuales han sido removidas del área como producto del proceso de erosión.

Con estos mapas se puede observar que la distribución de los paquetes arenosos no tienen una dirección preferente. Sin embargo se nota que las diferentes distribuciones en los diferentes niveles pasan por la parte media y hacia el Norte, lo que implica que la mayor probabilidad de encontrar estas facies se encuentra en esta región.

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- El ambiente de depósito para esta zona presenta una variación de facies con respecto a lo que se ha observado en la CO, en esta región el intervalo de roca equivalente en edad al Grupo Guadalupe muestra evidencias que sugieren que este se depositó en un ambiente transicional con influencia de mareas (sistema estuarino).
- El espesor del Grupo Guadalupe muestra notable disminución en esta área con respecto a los que afloran en la CO. Donde se observa que de la CO al Piedemonte Llanero pasa de espesores medidos de entre 775 y 420m a entre 307 y 132m en las secciones medidas en este trabajo. El espesor medido en la cuenca (pozo descrito) para este grupo es de aproximadamente 60m.
- El intervalo de roca identificado en este trabajo como equivalente en edad al Grupo Guadalupe, el cual ha sido ampliamente descrito y estudiado en la Cordillera Oriental no presenta las características para considerarlo como un grupo. Por lo cual se sugiere que sea considerado como una formación.
- La distribución espacial de las mejores facies arenosas con potencial para acumulación de hidrocarburos, se encuentran desde la parte media del área hacia el Norte. También se observan otros sectores que se ubican en la parte media en los extremos Oriental y Occidental, si bien estos últimos son de menor espesor ellos junto a la secuencia Cenozoica pueden formar un reservorio de calidad.
- Los mapas muestran que las mayores probabilidades de encontrar facies arenosas se encuentran en la parte media y hacia el Norte. Sin embargo en los mapas de arenas en el nivel más basal y en el denominado "Techo Heterolíticos" se observa que hay tendencia a la aparición de arenas por el flanco Occidental y se extiende al Sur. La tendencia no es clara ya que la densidad de pozos en esta región es baja, pero puede ser una zona prospectiva.
- Las facies con potencial para acumular hidrocarburos no poseen buenos espesores, pero junto con las arenas de la secuencia Cenozoica se ha notado que forman una buena opción de roca reservorio.
- Se recomienda elaborar estudios palinológicos más detallados para identificar con mayor precisión el techo y la base de este intervalo de roca en la región.

- Incluir análisis de procedencia para complementar y refinar las orientaciones de los cinturones arenosos mapeados en este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bayona, G., Cardona, A., Jaramillo, C., Mora, A., Montes, C., Caballero, V., Mahecha, H., Lamus, F., Montenegro, O., Jimenez, G., et al. (2013). Onset of fault reactivation in the eastern cordillera of colombia and proximal llanos basin; response to caribbean–south american convergence in early palaeogene time. *Geological Society, London, Special Publications*, 377(1):285–314.
- Boyd, R., Dalrymple, R. W., and Zaitlin, B. A. (2006). Estuarine and incised-valley facies models. *SPECIAL PUBLICATION-SEPM*, 84:171.
- Branquet, Y., Cheilietz, A., Cobbold, P., Baby, P., Laumonier, B., and Giuliani, G. (2002). Andean deformation and rift inversion, eastern edge of cordillera oriental (guateque–medina area), colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(4):391–407.
- Cooper, M., Addison, F., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R., Hayward, A., Howe, S., Martinez, J., Naar, J., Peñas, R., et al. (1995). Basin development and tectonic history of the llanos basin, eastern cordillera, and middle magdalena valley, colombia. *AAPG bulletin*, 79(10):1421–1442.
- Cortés, M., Angelier, J., and Colletta, B. (2005). Paleostress evolution of the northern andes (eastern cordillera of colombia): Implications on plate kinematics of the south caribbean region. *Tectonics*, 24(1).
- Dalrymple, R. W., Makino, Y., and Zaitlin, B. A. (1991). Temporal and spatial patterns of rhythmite deposition on mud flats in the macrotidal cobequid bay-salmon river estuary, bay of fundy, canada.
- De la parra, F., Paez, M., Cardenas, D., Bedoya, O., and Pinzon, D. (2014). Informe paleontológico de las secciones caño sagú, caño las blancas y pozos castilla-18 y cristal-1. *INFORME INTERNO 20-14*.
- Dengo, C. A. and Covey, M. C. (1993). Structure of the eastern cordillera of colombia: implications for trap styles and regional tectonics. *AAPG Bulletin*, 77(8):1315–1337.
- Etayo, F. (1964). Posicion de las faunas en los depositos cretaticos colombianos y su valor en la subdivision cronologica de las mismas, bucaramanga: Universidad industrial de santander. *Boletin*, (16-17):5–142.

- Farrell, K. M., Harris, W. B., Mallinson, D. J., Culver, S. J., Riggs, S. R., Pierson, J., Self-Trail, J. M., and Lautier, J. C. (2012). Standardizing texture and facies codes for a process-based classification of clastic sediment and rock. *Journal of Sedimentary Research*, 82(6):364–378.
- Gressly, A. (1841). *Observations géologiques sur le Jura Soleurois*. Allgemeine schweizerische Gesellschaft für die gesammten Naturwissenschaften.
- Guerrero, Javier y Sarmiento, G. et al. (1996). Estratigrafía física, palinológica, sedimentológica y secuencial del cretácico superior y paleoceno del piedemonte llanero: Implicaciones en exploración petrolera. *Geología Colombiana-An International Journal on Geosciences; Vol. 20 (1996); 3-66 Geología Colombiana; Vol. 20 (1996); 3-66 2357-3767 0072-0992*.
- Horton, B. K., Saylor, J. E., Nie, J., Mora, A., Parra, M., Reyes-Harker, A., and Stockli, D. F. (2010). Linking sedimentation in the northern andes to basement configuration, mesozoic extension, and cenozoic shortening: Evidence from detrital zircon u-pb ages, eastern cordillera, colombia. *Geological Society of America Bulletin*, 122(9-10):1423–1442.
- Hubach, E. (1952). *Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores*.
- Johnson, H. D. and Levell, B. K. (1995). Sedimentology of a transgressive, estuarine sand complex: the lower cretaceous woburn sands (lower greensand), southern england. *Sedimentary Facies Analysis: a Tribute to the Research and Teaching of Harold G. Reading*, pages 17–46.
- Julivert, M. (1962a). Estudio sedimentológico de la parte alta de la formación guadalupe al e de bogotá (cretácico superior). *Universidad de Santander (Bucaramanga), Boletín de Geología*, 10:25–54.
- Julivert, M. (1962b). La estratigrafía de la formación guadalupe y las estructuras por gravedad en la serranía de chía (sabana de bogotá). *Bol. Geol*, pages 5–21.
- Leeder, M. R. (2009). *Sedimentology and sedimentary basins: from turbulence to tectonics*. John Wiley & Sons.
- Martinez, A y Osorio, L. (2012). Reconstrucción paleoambiental del área de llanos sur. *INFORME INTERNO 30-14, CONTRATO N° MA-0014798, ACTA 005, ENTREGABLE N° 01*.
- Martinius, A. W., Kaas, I., Helgesen, G., Kj, J. M., Leith, D. A., et al. (2001). Sedimentology of the heterolithic and tide-dominated tilje formation (early jurassic, halten terrace, offshore mid-norway). *Norwegian Petroleum Society Special Publications*, 10:103–144.

- Mora, A. (2007). *Inversion tectonics and exhumation processes in the Eastern Cordillera of Colombia*. PhD thesis, Ph. D. dissertation, University of Potsdam.
- Pérez, G., Salazar, A., et al. (1978). Estratigrafía y facies del grupo guadalupe. *Geología Colombiana-An International Journal on Geosciences; Vol. 10 (1978); 6-85 Geología Colombiana; Vol. 10 (1978); 6-85 2357-3767 0072-0992*.
- Posamentier, HW y Walker, R. (2006). Facies models revisited: Sepm (society for sedimentary geology) special publication. *Tulsa, Oklahoma, 84*.
- Potter, P. E. (1959). Facies model conference. *Science*, 129(3358):1292–1294.
- Reineck, H.-E. and Wunderlich, F. (1968). Classification and origin of flaser and lenticular bedding. *Sedimentology*, 11(1-2):99–104.
- Rueda, M. and De la Parra, F. (2014). Reporte palinológico caño blanco y caño la unión. *INFORME INTERNO 30-14*.
- Sarmiento-Rojas, L., Van Wess, J., and Cloetingh, S. (2006). Mesozoic transtensional basin history of the eastern cordillera, colombian andes: Inferences from tectonic models. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4):383–411.
- Schlumberger, L. I. (1989). Principles/applications. *Schlumberger Educational Services, Houston, TX*.
- Teichert, C. (1958). Concepts of facies. *AAPG Bulletin*, 42(11):2718–2744.
- Ujueta, G. (1961). Geología del noreste de bogotá, bol. *Geol. Serv. Geol. Nal*, 9(1-3):23–46.
- Vera, T. (1994). Ja (1994): Estratigrafía. *Principios y métodos*.
- Vergara, S., Luis, E., et al. (1997). The upper cretaceous and lower paleocene of the eastern bogotá plateau and llanos thrustbelt, colombia: Alternative appraisal to the nomenclature and sequence stratigraphy. *Geología Colombiana-An International Journal on Geosciences; Vol. 22 (1997); 51-79 Geología Colombiana; Vol. 22 (1997); 51-79 2357-3767 0072-0992*.
- Zervas, D., Nichols, G. J., Hall, R., Smyth, H. R., Lüthje, C., and Murtagh, F. (2009). Sedlog: A shareware program for drawing graphic logs and log data manipulation. *Computers & Geosciences*, 35(10):2151–2159.