

**Definición del sistema deposicional en una subcuenca del caribe costa afuera de Colombia,  
a partir de interpretación sísmica 3D**

**Juliana Mojica González**

**Proyecto de grado para optar al título de Geóloga**

**Director:**

**Rocío del Pilar Bernal Olaya**

**PhD en ciencias de la tierra**

**Co-Director:**

**Lina María Rendón Cardona**

**Geólogo Esp.**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físico Químicas**

**Escuela de Geología**

**Bucaramanga**

**2019**

### Dedicatoria

*A mi mami quien con todo su esfuerzo y dedicación me ha apoyado en cada etapa de mi vida,  
quien ha forjado mi carácter y me ha enseñado a luchar por mis sueños. A ella le debo la  
persona y profesional que soy hoy.*

*A mi hermano quien me ha enseñado que la única limitación está en los pensamientos y que la  
felicidad no depende de lo que tienes sino de lo que das.*

### **Agradecimientos**

A la Universidad Industrial de Santander que en estos años se convirtió en mi segundo hogar y me permitió prepararme profesionalmente y vivir un sinnúmero de experiencias que enriquecieron mi vida.

A los profesores de geología, especialmente a la profesora Rocío, quien me guió paso a paso y me brindó todo su conocimiento durante el desarrollo de este proyecto.

A Tuti y Ciro, a quienes considero mis segundos padres, por apoyarme y enseñarme que la educación es el camino y la base para lograr grandes cosas en la vida.

A Juan quien con su amor e inagotable paciencia fue mi voz de aliento de inicio a fin de este proyecto. Gracias por tu compañía y por enseñarme a soñar en grande dejando atrás los miedos y obstáculos que puedan aparecer en el camino.

A todos los amigos y ahora colegas que conocí a lo largo de esta etapa, con quienes viví grandes experiencias y quienes me enseñaron que la amistad trasciende más allá del campus. Especialmente a mis amigas Nata, Rossy, Manu y Juli, gracias por tanto niñas.

## Contenido

|                                              | Pág. |
|----------------------------------------------|------|
| Introducción .....                           | 15   |
| 1. Objetivos .....                           | 16   |
| 1.1 General .....                            | 16   |
| 1.2 Específicos .....                        | 16   |
| 2. Localización .....                        | 17   |
| 3. Marco Geológico .....                     | 18   |
| 3.1 Marco Estructural.....                   | 18   |
| 3.2 Morfología .....                         | 19   |
| 3.3 Estratigrafía.....                       | 24   |
| 4. Metodología .....                         | 27   |
| 4.1 Base de datos.....                       | 27   |
| 4.2 Definición de parámetros sísmicos .....  | 28   |
| 4.2.1 Polaridad Sísmica.....                 | 28   |
| 4.2.2 Resolución Sísmica Vertical .....      | 30   |
| 4.3 Amarre sísmica-pozo .....                | 32   |
| 4.3.1 Sismograma sintético .....             | 32   |
| 4.4 Interpretación Sismoestratigráfica ..... | 34   |
| 4.4.1 Interpretación de horizontes.....      | 34   |

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 4.4.2 Mapas Isópacos .....                  | 39 |
| 4.4.3 Atributos sísmicos.....               | 44 |
| 4.4.3.1 Amplitud RMS.....                   | 44 |
| 4.4.3.2 Amplitud Instantánea .....          | 46 |
| 5. Interpretación y resultados .....        | 47 |
| 5.1 Secuencias Tectonoestratigráficas ..... | 47 |
| 5.1.1 Secuencia A .....                     | 47 |
| 5.1.2 Secuencia B.....                      | 51 |
| 5.1.3 Secuencia C.....                      | 55 |
| 5.1.4 Secuencia D .....                     | 59 |
| 5.2 Elementos Deposicionales .....          | 62 |
| 6. Conclusiones .....                       | 67 |
| 7. Recomendaciones .....                    | 68 |
| Referencias Bibliográficas .....            | 69 |

### Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <b>Pág.</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Figura 1. a) Caribe colombiano. La flecha negra indica la dirección de movimiento de la placa Caribe respecto a la placa Sudamericana (según Egbue y Kellogg, 2010). El rectángulo rojo muestra la ubicación de la figura b. b) Configuración tectónica del margen noroeste de Colombia y batimetría actual, resaltando el Cañón de la Aguja, rasgo morfológico cercano al área de estudio limitada por el rectángulo rojo. El área de estudio (cuadro rojo) se localiza en la cuenca Guajira Offshore enmarcada en el polígono azul claro. .... | 17          |
| Figura 2. a) Elementos deposicionales en sistemas marinos profundos (tomado y modificado de J.S. Vinnels et al., 2010). b) Morfología en una sección que corta depósitos de transporte masivo (MTD's). c) Morfología en una sección que corta canales submarinos (Arnott, 2010). d) Morfología en una sección que corta un cañón submarino, en el cual se pueden encontrar sus diferentes elementos deposicionales. ....                                                                                                                         | 22          |
| Figura 3. Morfología submarina del sur de la Cuenca Guajira Costa Afuera. Tomado de Tabares, Soltau, Díaz, & Landazábal (2009).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 23          |
| Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de la cuenca Guajira costa afuera. Tomada y modificada de ANH (2007). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 26          |
| Figura 5. a) Geometría del cubo sísmico disponible, ubicado entre el cabalgamiento frontal del Cinturón Deformado del Caribe del Sur al Norte y la línea de costa de Colombia al sur. b) Inline y Xline representativos del cubo sísmico.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 27          |

Figura 6. Definición de la polaridad sísmica. a) Imagen sísmica extraída del cubo sísmico en la que se muestra una polaridad normal definida a partir de la amplitud del primer reflector negativo (rojo) que marca el contacto agua-sedimento. b) Representación de la polaridad normal o positiva producto del aumento de la impedancia acústica a profundidad.  $Z$ - impedancia acústica,  $\rho$  – densidad de la roca y  $V_p$  – velocidad de las ondas p. Escala de colores muestra el rango de las amplitudes de las reflexiones. .... 29

Figura 7. a) Sección sísmica utilizada para determinar la resolución sísmica vertical. b) Zoom de cada muestra en el cual se calculó la resolución c) Histograma de frecuencia instantánea para cada muestra, en círculo verde se indica la frecuencia dominante utilizada para calcular la resolución vertical..... 31

Figura 8. a) Ubicación del pozo Z respecto al cubo sísmico. b) Generación del sismograma sintético para el pozo Z. Nótese la correlación del tope de la secuencia arenosa con el reflector que define la base del Plioceno..... 33

Figura 9. Sección sísmica en dirección N-S en la cual se interpretaron los horizontes numerados de forma ascendente del más profundo (H1) al más somero (H5), horizontes que definieron las unidades tectonoestratigráficas A, B, C y D. .... 36

Figura 10. Mapas estructurales de cada uno de los horizontes interpretados. Los colores cálidos corresponden a las zonas más someras, mientras que los colores fríos corresponden a zonas de mayor profundidad. Cabe aclarar que la escala de colores no es la misma para todos los horizontes. .... 38

Figura 11. Terminaciones de reflexiones sísmicas al tope y la base de una secuencia. .... 39

Figura 12. a) Boceto que muestra la ventana de análisis en la cual se extrajo la amplitud RMS para cada una de las superficies interpretadas. a) Intervalo de análisis para la secuencia A (50 m). b)

intervalo de análisis para la secuencia B (25 m). c) Intervalo de análisis para la secuencia C (45.1 m). d) Intervalo de análisis para la secuencia D (45.1 m)..... 46

Figura 13. Mapas correspondientes a la secuencia A. a) Mapa isópaco con escala de colores en pies. b) Mapa de facies. c) Mapa de amplitud RMS, en el cual los colores cálidos representan anomalías de amplitud que pueden ser causadas por cambios litológicos (p. ej. arena vs lodo) asociados con sedimentos que transportaban antiguos canales. La zona anómala al noroeste es producto de efecto tuning. d) Mapa de amplitud instantánea. Las líneas blancas sugieren rasgos continuos de anomalías interpretadas como paleocanales. .... 50

Figura 14. Mapas correspondientes a la secuencia B. a) Mapa isópaco con escala de colores en pies. b) Mapa de facies. c) Mapa de amplitud RMS, en el cual los colores cálidos representan anomalías de amplitud que se distribuyen linealmente hacia el noreste, asociadas a paleocanales, además de dos zonas hacia el centro de la secuencia asociadas a sedimentos de desborde de canal y finalmente un área producto de suma de amplitudes o efecto tuning. d) Mapa de amplitud instantánea. Las líneas blancas sugieren rasgos continuos de anomalías interpretados como paleocanales. .... 54

Figura 15. Mapas correspondientes a la secuencia C. a) Mapa isópaco con escala de colores en pies. b) Mapa de facies. c) Mapa de amplitud RMS en el cual los colores cálidos representan anomalías de amplitud que se distribuyen linealmente hacia el noreste, asociadas a paleocanales cárcavas submarinas. d) Mapa de amplitud instantánea. .... 58

Figura 16. Mapas correspondientes a la secuencia D. a) Mapa isópaco, escala de colores en pies, muestra mayor espesor al sur que disminuye progresivamente hacia el sureste, sin embargo, el menor espesor se encuentra al tope del paleoalto. b) Mapa de facies. c) Mapa de amplitud RMS en el cual los colores cálidos representan anomalías que se distribuyen linealmente hacia el noreste,

asociadas a paleocanales y una zona al suroeste producto de algunas fallas que cortan la secuencia.

d) Mapa de amplitud instantánea en el cual no se observa ninguna clase de anomalía (colores cálidos) lo cual permite interpretar que esta secuencia es litológicamente homogénea. Las líneas blancas representan los paleocanales identificados. .... 61

Figura 17. Sección sísmica en dirección sur-norte que muestra las cuatro secuencias tectonoestratigráficas interpretadas y los diferentes elementos deposicionales identificados. Se observa el contraste de la continuidad, amplitud y frecuencia de las reflexiones sísmicas entre las secuencias B y C. .... 65

Figura 18. Elementos deposicionales interpretados en cada una de las secuencias analizadas. a) mapa de la secuencia A. b) Mapa de la secuencia B. c) Mapa de la secuencia C. d) Mapa de la secuencia D. .... 66

### Lista de Tablas

|                                                                                                                                                                                   | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1. Dimensiones del survey interpretado en este trabajo.....                                                                                                                 | 28   |
| Tabla 2. Cálculo de la resolución vertical para cada intervalo interpretado. ....                                                                                                 | 32   |
| Tabla 3. Criterio de selección mediante el cual fueron elegidos los horizontes interpretados. ....                                                                                | 35   |
| Tabla 4. Significado geológico de las terminaciones sísmicas. ....                                                                                                                | 40   |
| Tabla 5. Interpretación geológica de las características de una reflexión sísmica (Sangree & Windmier, 1977). ....                                                                | 40   |
| Tabla 6. Configuración interna de la reflexión y su respectiva interpretación geológica y representación sísmica (Sangree & Windmier, 1977). ....                                 | 41   |
| Tabla 7. Nomenclatura de mapeo de facies sísmicas. Tomado y modificado de Ramsayer, 1979. ....                                                                                    | 43   |
| Tabla 8. Clasificación de facies en el intervalo A. Nomenclatura= AB/CD, donde A – terminación al tope, B – terminación a la base, C – configuración interna, D – amplitud. ....  | 49   |
| Tabla 9. Clasificación de facies en el intervalo B. Nomenclatura= AB/CD, donde A – terminación al tope, B – terminación a la base, C – configuración interna, D – amplitud. ....  | 53   |
| Tabla 10. Clasificación de facies en el intervalo C. Nomenclatura= AB/CD, donde A – terminación al tope, B – terminación a la base, C – configuración interna, D – amplitud. .... | 57   |
| Tabla 11. Clasificación de facies en el intervalo D. Nomenclatura= AB/CD, donde A – terminación al tope, B – terminación a la base, C – configuración interna, D – amplitud. .... | 60   |

## Resumen

**TÍTULO:** DEFINICIÓN DEL SISTEMA DEPOSICIONAL EN UNA SUBCUENCA DEL CARIBE COSTA AFUERA DE COLOMBIA, A PARTIR DE INTERPRETACIÓN SÍSMICA 3D\*

**AUTOR:** JULIANA MOJICA GONZALEZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** interpretación sísmica, cuenca Guajira costa afuera, sísmica 3D, atributos sísmicos, morfología submarina.

## DESCRIPCIÓN

Identificamos los sistemas de depósito en el intervalo Plioceno Inferior – Holoceno interpretando un cubo sísmico de reflexión en la depresión Tayrona, un área ubicada en la cuenca Guajira costa afuera, al noreste de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM). En la primera etapa seleccionamos cinco reflectores de alta amplitud y continuidad, que delimitan cuatro secuencias tectonoestratigráficas dentro del intervalo de estudio. A partir de la interpretación de estos horizontes a través del cubo sísmico calculamos los mapas estructurales y los mapas isópacos de cada secuencia, mediante los cuales se evidencia que estas se profundizan y se acuñan hacia el noreste, donde se encuentra el depocentro de la depresión Tayrona. En segundo lugar, analizamos cada secuencia a partir de la interpretación de atributos (amplitud RMS y amplitud instantánea) y facies sísmicas, para lo cual utilizamos el método de mapeo e interpretación propuesto por Ramsayer (1979), el cual se basa en tres criterios: la terminación de los reflectores al tope (A) y la base (B) de la secuencia, y su configuración interna (C); para este trabajo incluimos la amplitud de la onda sísmica como cuarto criterio (D) con el fin de realizar un análisis más detallado de las facies.

La interpretación sismoestratigráfica permitió reconocer y delimitar elementos arquitectónicos como canales submarinos, cañones y depósitos de transporte masivo (MTD). Finalmente, teniendo en cuenta el reconocimiento de estos elementos establecimos dos sistemas deposicionales para este intervalo: un sistema marino profundo de talud superior-medio para las dos secuencias más profundas y un sistema marino somero clástico, que varía entre talud superior y plataforma externa para las dos secuencias menos profundas.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Geología. Director: Rocío del Pilar Bernal Olaya, Geólogo PhD. Co-director: Lina María Rendón Cardona, Geólogo Especialista.

## Abstract

**TITLE:** DEFINITION OF THE DEPOSITIONAL SYSTEM IN A SUB-BASIN OF THE CARIBBEAN OFFSHORE OF COLOMBIA, FROM 3D SEISMIC INTERPRETATION\*

**AUTHOR:** JULIANA MOJICA GONZALEZ\*\*

**KEYWORDS:** seismic interpretation, Guajira offshore basin, 3D seismic, seismic attributes, submarine morphology.

### DESCRIPTION:

We identify the depositional systems in the lower Pliocene-Holocene interval by interpreting a 3D reflection seismic cube in the Tayrona depression, an area located in the Guajira offshore basin, northeast of the Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM). Firstly, we selected five reflectors of high amplitude and continuity, which delimit four tectonostratigraphic sequences within the study interval. From the interpretation of these horizons through the seismic cube we calculate the structural maps and the isopach maps of each sequence, by means of which it is evident that these are deepened and wedged towards the northeast, where the depocenter of the Tayrona depression is located. Secondly, we analyze each sequence from the interpretation of attributes (RMS amplitude and instantaneous amplitude) and seismic facies, for which we used the mapping and interpretation method proposed by Ramsayer (1979), which is based on three criteria: the termination of the reflectors to the top (A) and the base (B) of the sequence, and their internal configuration (C); for this work we include the amplitude of the seismic wave as the fourth criterion (D) in order to perform a more detailed analysis of the facies. The seismic stratigraphy allowed to recognize and delimit architectural elements such as submarine channels, canyons and massive transport deposits (MTD). From this recognition, we established two depositional systems for this interval: a deep upper-middle slope marine system for the two deepest sequences and a shallow marine system, which varies between upper slope and external platform for the two shallowest sequences

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Geología. Director: Rocío del Pilar Bernal Olaya, Geólogo PhD. Co-director: Lina María Rendón Cardona, Geólogo Especialista.

## Introducción

La exploración de hidrocarburos en Colombia se ha extendido en los últimos años hacia las cuencas frontera del Caribe. Vatha y Phally (2006) definen estas cuencas como cuencas sedimentarias inexploradas o en etapa temprana de exploración, en las que la información geológica es escasa comparada con la de cuencas semi-maduras y maduras, lo que hace complejo definir modelos sedimentológicos, estratigráficos y tectónicos en estas cuencas.

Es por ello que la interpretación y análisis de la información sísmica de reflexión disponible es fundamental para reconocer inicialmente secuencias sismo-estratigráficas que permitan reconstruir ambientes deposicionales del pasado, teniendo en cuenta entre otros factores, los cambios relativos del nivel del mar durante el tiempo en el que ocurrió la deposición. Reconocer los ambientes de depósito es el primer paso para identificar zonas prospectivas, ya que permite predecir a grandes rasgos donde se pudo haber generado, migrado y entrampado el hidrocarburo.

## 1. Objetivos

### 1.1 General

Sugerir posibles ambientes sedimentarios en el intervalo más somero de un cubo sísmico ubicado al sur de la Cuenca Guajira costa afuera de Colombia, a partir de la interpretación de datos sísmicos de reflexión en 3D utilizando la plataforma de interpretación Openworks®.

### 1.2 Específicos

- Plantear una metodología para la identificación de ambientes sedimentarios a partir de interpretación de sísmica de reflexión 3D.
- Reconocer e interpretar secuencias tectonoestratigráficas en el intervalo de estudio con el propósito de generar las respectivas superficies.
- Identificar y clasificar facies sísmicas teniendo en cuenta la metodología de Ramsayer (1979).
- Calcular y visualizar mapas de atributos sísmicos: amplitud RMS y amplitud instantánea; con el fin de identificar zonas de impedancia acústica anómalas.

## 2. Localización

El área de estudio se localiza costa afuera al norte de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) en el sur de la cuenca Guajira (Barrero et al., 2007). Esta cuenca limita al norte-noroeste con el cinturón deformado del Sur del Caribe (CDSC), al noreste con la línea geográfica que define la frontera entre Colombia y Venezuela; hacia el sur con la falla de Oca y con la costa continental de la Guajira (Figura 1).

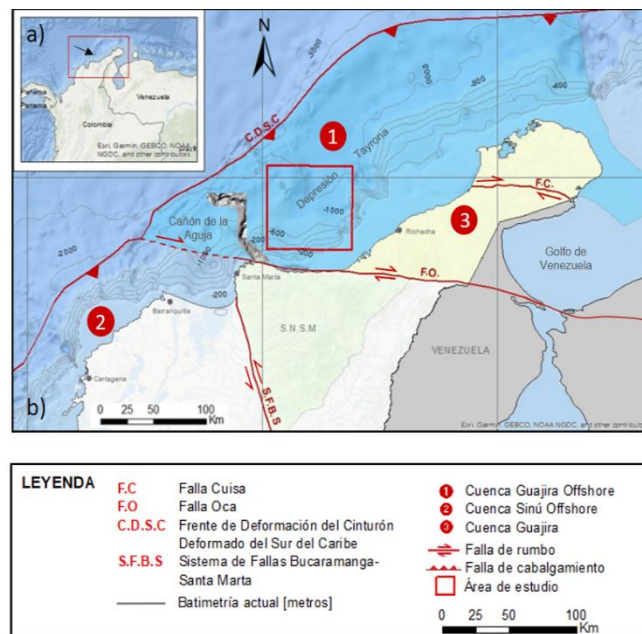


Figura 1. a) Caribe colombiano. La flecha negra indica la dirección de movimiento de la placa Caribe respecto a la placa Sudamericana (según Egbue y Kellogg, 2010). El rectángulo rojo muestra la ubicación de la figura b. b) Configuración tectónica del margen noroeste de Colombia y batimetría actual, resaltando el Cañón de la Aguja, rasgo morfológico cercano al área de estudio limitada por el rectángulo rojo. El área de estudio (cuadro rojo) se localiza en la cuenca Guajira Offshore enmarcada en el polígono azul claro.

### 3. Marco Geológico

#### 3.1 Marco Estructural

La evolución tectónica del Caribe Colombiano está directamente relacionada con la formación del cinturón deformado del Sur del Caribe (CDSC) desde el Cretácico tardío, un prisma de acreción sedimentario generado debido a la colisión y subducción oblicua en dirección E-SE de la Placa del Caribe debajo de la Placa Sudamericana (Leslie, Mann, & Carvajal , 2015).

Durante el Cenozoico se presentaron eventos de acreción, extensión e inversión tectónica. La ocurrencia de estos eventos tectónicos a lo largo del tiempo geológico ha convertido esta área en una región geológicamente compleja, caracterizada por diversos estilos estructurales como cinturones de empuje y bloques rotados. Además de la actividad tectónica, los cambios del nivel del mar durante el Pleistoceno causados por fenómenos orogénicos y de glaciaciones; y fenómenos erosivos de corto y largo plazo han generado cambios en la configuración del relieve continental y oceánico (Restrepo & Ordoñez, 2009).

Teniendo en cuenta el estilo estructural, el Caribe colombiano se ha dividido en dos estilos predominantes. El primer estilo estructural se localiza entre el Arco de Panamá y Santa Marta, el cual corresponde a un sistema transpresivo de cuñas sedimentarias adosadas de manera oblicua al margen norte de la placa sudamericana que transportan cuencas sedimentarias “piggy back” (López, 2005), acompañado de una intensa actividad diapírica. El segundo estilo comprende desde Santa Marta hasta la Alta Guajira, y corresponde a un estilo estructural dominado por fallas de

rumbo dextrales que conforman un gran sistema transtensivo en la subcuenca Baja Guajira (García, y otros, 2008), limitada al sur por la Falla de Oca, la cual hace parte del sistema de fallas Oca-Ancón, que se prolonga desde el norte de la Sierra Nevada de Santa Marta hasta la zona costera de Boca de Aroa al noroeste de Venezuela (Audemard, 1996); y al norte hasta la Falla de Cuisa que se extiende desde costa afuera al oeste de la Península de la Guajira, hasta el oeste del Golfo de Venezuela (Cediel, Almanza, & Montes, 2012) (Figura 1).

### 3.2 Morfología

La morfología submarina del Caribe colombiano es diversa debido a la dinámica tectónica y los procesos hidro-geomorfológicos que han modelado el relieve del fondo marino a través de tiempo.

Esta diversidad se ve reflejada al sur de la cuenca Guajira Costa Afuera, en donde se presenta una plataforma estrecha (entre 8.5 km y 14.6 km) asociada a la Sierra Nevada de Santa Marta, la cual finaliza entre los -130 y -150 m de profundidad y se va ampliando hacia el noroeste (Rangel, 2008). Por lo tanto, el talud continental se encuentra muy cercano a la línea de costa, y presenta una pendiente alta (7° en promedio) que varía de acuerdo al sector estudiado. El talud continental está limitado entre las cotas batimétricas de -200 m y -3500 m, con una longitud inferior a 100 km (Figura 1).

Los sistemas deposicionales desarrollados a estas profundidades se correlacionan con los sistemas de plataforma y marino profundo como lo han descrito diferentes autores como Nichols, G (2009), Selley R (1996) y Duff & Holmes (1993). En este tipo de sistema, los elementos deposicionales más importantes son (Figura 2a):

- **Depósitos de movimiento en masa (MTD por sus siglas en inglés).**

Es un término general que se refiere a todos los depósitos generados y emplazados por procesos controlados por gravedad (Nelson, Escutia, Damuth, & Twichell, 2011). Incluye deslizamiento laminar (slide), deslizamiento rotacional (slump) y flujo de detritos (Figura 2b). Los deslizamientos laminares (slide) consisten en cuerpos rígidos que se mueven a lo largo de un plano y con poca o ninguna deformación interna, mientras que en los deslizamientos rotacionales (slump) los sedimentos se mueven a través de un plano cóncavo y presentan deformación interna (Covault, 2011). Por otro lado, el flujo de detritos es una mezcla de rocas, sedimentos y agua.

- **Canales submarinos**

Son geomorfologías negativas en forma de V o de U que pueden desarrollarse tanto en el talud continental como en la planicie abisal. Con base en observaciones de sistemas modernos y antiguos, se reconocen tres tipos de canales marinos profundos (Figura 2c): erosionales, deposicionales y una mezcla entre los dos anteriores.

Los canales erosivos están limitados por una superficie de socavación que trunca claramente los estratos más antiguos, mientras que los canales deposicionales están limitados por diques de margen de canal bien desarrollados. Finalmente, los canales mixtos muestran una combinación de deposición de diques y erosión del eje del canal (Arnott, 2010). Las formas de los canales varían de rectilíneos a sinuosos, similar a la forma de los sistemas fluviales. Aunque el origen de la sinuosidad del canal se debate, las observaciones generales evidencian que el grado de sinuosidad es inversamente proporcional a la inclinación del talud (Weimer, 2004).

- **Cañones submarinos**

Valle que configuran conductos principales para el transporte de sedimentos hacia las profundidades marinas (Arnott, 2010). Su relleno es estratigráficamente complejo y

litológicamente variable, debido a que estos pueden estar asociados con movimientos en masa producto de la falla de sus paredes escarpadas (Catuneanu, 2006). Pueden alcanzar más de 2.5 km de profundidad y 100 km de ancho (Normark & Carlson, 2003), y principalmente están confinados al talud aunque en algunos casos cortan la plataforma continental (Arnott, 2010) (Figura 2d).

- **Cárcavas submarinas (gullies)**

Están confinadas al talud, es decir, se localizan entre el borde de la plataforma y el pie de la pendiente. En corte transversal, tienen forma de 'V' o 'U', y son típicamente más estrechos, más cortos y de menor relieve que los canales o cañones submarinos. A diferencia de los canales submarinos, las cárcavas suelen producirse en grupos espaciados uniformemente, y sus patrones de apilamiento son predominantemente agradacionales (Prelat, Pankhaina, & Hodgson, 2015) (Figura 2a).

Las morfologías de estos elementos, descritos en la sísmica han servido para interpretar estos ambientes en unidades fosilizadas (Figura 2a).

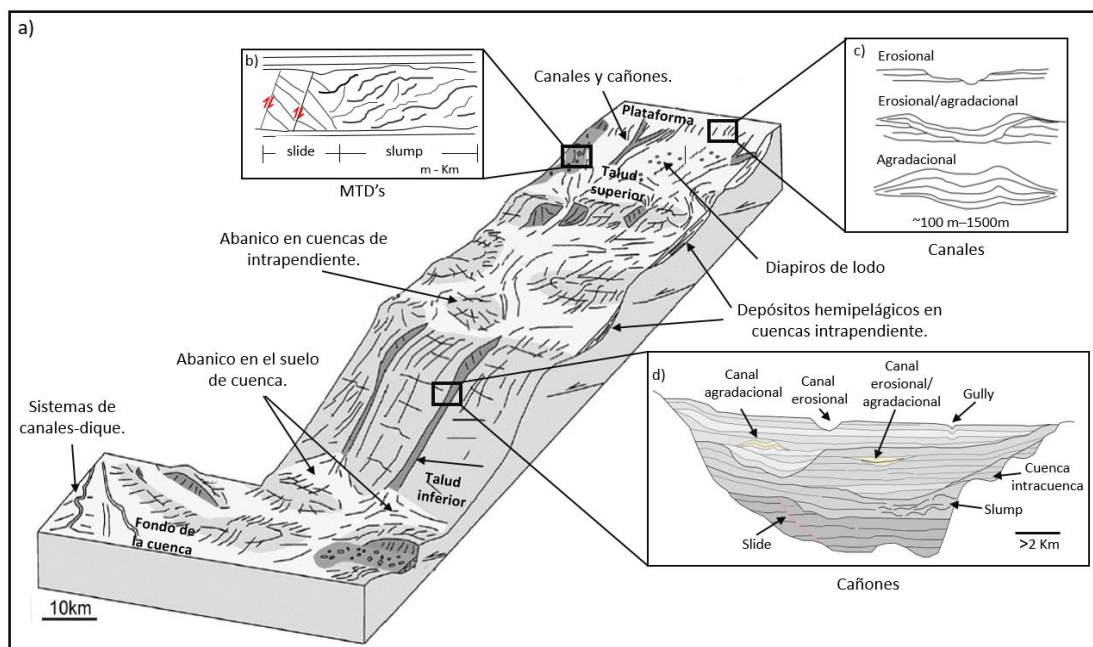


Figura 2. a) Elementos deposicionales en sistemas marinos profundos (tomado y modificado de J.S. Vinnels et al., 2010). b) Morfología en una sección que corta depósitos de transporte masivo (MTD's). c) Morfología en una sección que corta canales submarinos (Arnott, 2010). d) Morfología en una sección que corta un cañón submarino, en el cual se pueden encontrar sus diferentes elementos depositacionales.

De acuerdo con los elementos descritos en los sistemas a estudiar, y teniendo en cuenta la batimetría actual, se identificó que en el sur de la cuenca Guajira costa afuera el talud se encuentra cortado por canales estrechos y cañones submarinos de laderas pronunciadas orientados de manera oblicua y perpendicular a la costa; entre ellos se destaca el cañón de La Aguja (Shepard, 1973), ubicado al norte de la costa aledaña a la SNSM (Figura 1 y 3). El cañón se extiende 115 km por toda la plataforma y la pendiente continental, en un rango de profundidades que va desde 10 m hasta 3200 m. El ancho del cañón varía de 2 a 6 km, producto de los procesos erosivos activos (deslizamientos) en los escarpes.

Al noreste del cañón de La Aguja se encuentran las colinas de Neguanje y el espolón de Santa Marta (Figura 3), este último se encuentra cerca de la plataforma entre los 1000 y 1500 m de profundidad, y corresponde a una elevación uniforme de 46 km de longitud (Tabares, Soltau, Díaz, & Landazabal, 2009). Adicionalmente, a lo largo de esta zona se observan depósitos de movimiento en masa, volcanes submarinos de lodo generados por el afloramiento de sedimentos finos (arcillas) y gases provenientes de capas sedimentarias antiguas, debido a las diferencias de densidad de las rocas del subsuelo y a las altas presiones a las que son sometidas (Herrera & Díaz, 2018).

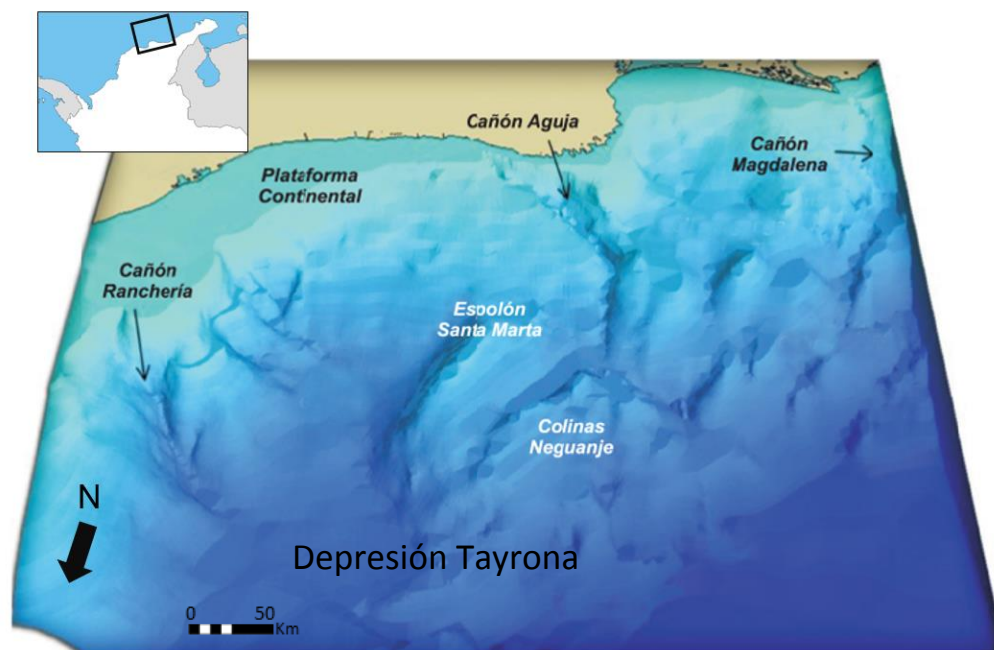


Figura 3. Morfología submarina del sur de la Cuenca Guajira Costa Afuera. Tomado de Tabares, Soltau, Díaz, & Landazábal (2009).

Otro rasgo morfológico importante se encuentra inmediatamente al norte de la SNSM, se trata de la depresión Tayrona, un depocentro que parece estar alineado a lo largo del CDSC, formado

en un entorno transtensional debido al movimiento dextral de la falla de Oca en la que el bloque norte se movió entre 60 y 100 km al este con respecto al bloque sur (Ceron, 2008). Esta depresión presenta muy poca deformación y según Escalante (2006) se han identificado secuencias desde el Mioceno inferior al presente (Figura 3).

En este trabajo se explora la distribución de los elementos deposicionales en las secuencias Neógenas depositadas en la depresión Tayrona, a través de la interpretación de un cubo de sísmica de reflexión en 3D proveído por Ecopetrol durante una pasantía de 6 meses en sus oficinas de Bogotá.

### 3.3 Estratigrafía

De acuerdo con lo anterior, se describen a continuación de base a techo las unidades depositadas en la Cuenca Guajira costa afuera desde el período Neógeno al presente (Figura 4):

- **Formación Uitpa**

Esta unidad está compuesta principalmente por calizas, intercaladas en menor proporción con arcillolitas ligeramente grises. Fue depositada en un ambiente marino profundo. De acuerdo con Rollins (1960) esta unidad es del Oligoceno, mientras Renz (1960) y Rubio & Ramírez (2000) basados en interpretación bioestratigráfica de pozos la consideran de edad Mioceno Inferior.

- **Formación Jimol**

Según Rollins (1960), esta unidad consiste en calizas arenosas muy fosilíferas intercaladas con areniscas calcáreas de color blanco a gris, de grano medio a grueso. En menor proporción se presentan arcillolitas limosas intercaladas con calizas. Pulido et al., (1991) señalan que esta secuencia se depositó durante el Mioceno Tardío, mientras que Rubio et al., (1998) determinan

que esta unidad se depositó principalmente en la parte superior del Mioceno Medio a Mioceno Superior en un ambiente que varía desde continental hasta batial superior.

- **Formación Castilletes**

Rollins (1960), indica que la Formación Castilletes descansa conforme sobre la Formación Jimol, y está constituida hacia la base por intercalaciones de areniscas calcáreas fosilíferas, lutitas y calizas margosas fosilíferas de color gris y estratificación gruesa dominante, mientras que hacia el tope de la sucesión estratigráfica la constituyen arcillolitas limosas de color gris a gris verdoso intercaladas con capas delgadas de areniscas (Figura 4). Esta unidad fue depositada durante el Mioceno Medio-Plioceno Inferior en un ambiente marino somero. Según Rubio et al. (1998) con base en análisis bioestratigráficos esta unidad se depositó en un ambiente de plataforma externa a plataforma interna.

El espesor de esta unidad es variable, según Renz (1960) se calcula entre 2789 y 2953 pies (850 y 900 metros), mientras que Rollins (1960) le asigna 2270 pies (692 metros).

Las intercalaciones de areniscas de la Formación Castilletes tienen potencial como roca reservorio, mientras que las arcillolitas limosas son consideradas con potencial de roca sello (Cerón et al., 2009).

- **Formación Gallinas - Depósitos Cuaternarios**

Para el intervalo Pleistoceno - Holoceno se han descrito depósitos de arcillolitas arenosas intercaladas con bancos de areniscas de grano medio a grueso y conglomerados con cantos de tamaño decimétrico de origen ígneo, encerrados en una matriz areno-arcillosa (Rollins, 1960).

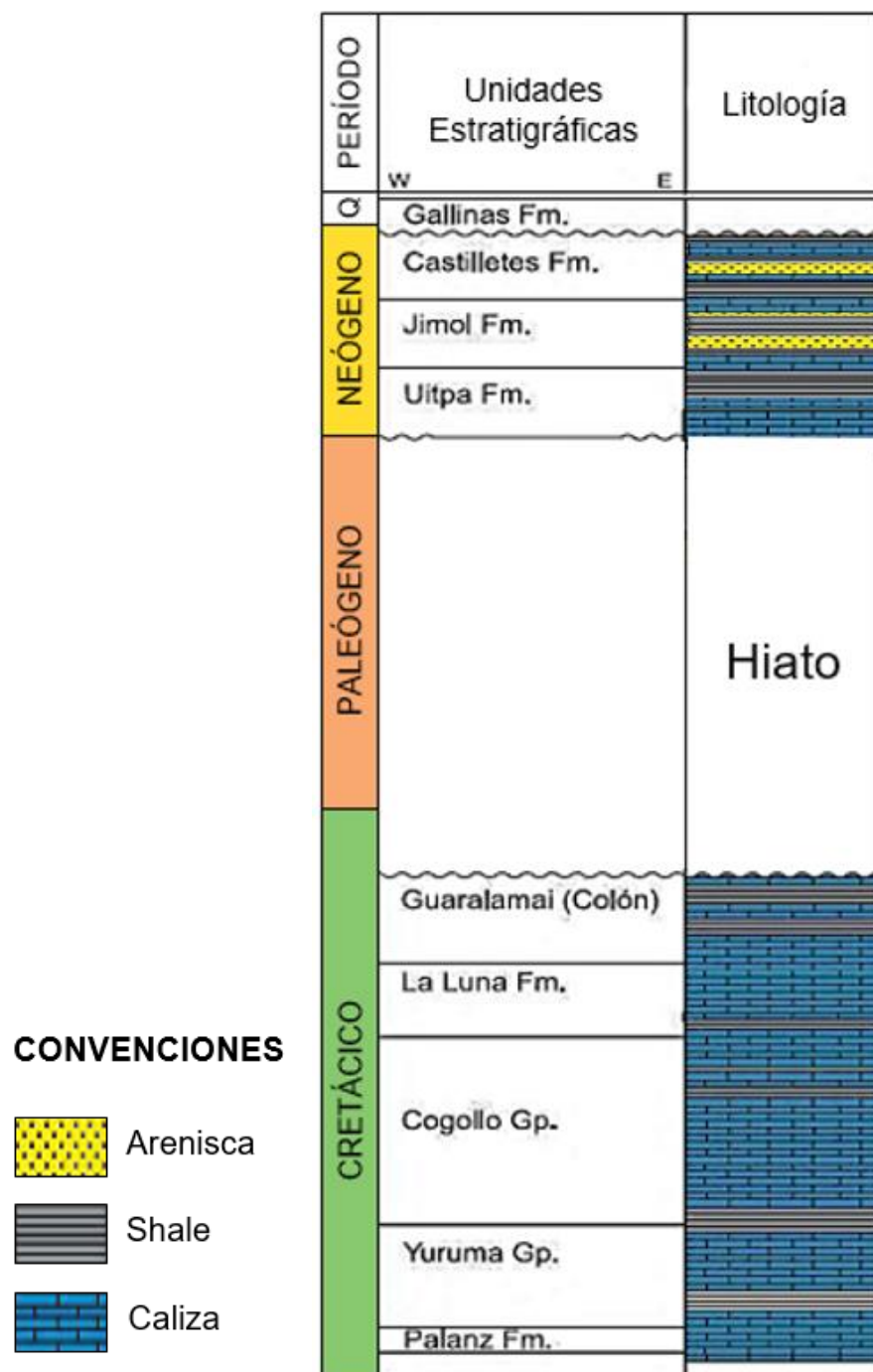


Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de la cuenca Guajira costa afuera. Tomada y modificada de ANH (2007).

## 4. Metodología

### 4.1 Base de datos

La información sísmica utilizada corresponde a un volumen 3D Pre-Stack Depth Migration (PSDM) que cubre un área de 4620 km<sup>2</sup>, ubicado en la depresión Tayrona (Figura 5; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.a).**

El cubo sísmico tiene 2300 Inlines y 6428 Xlines separados cada 25 m y 12,5 m respectivamente, y muestra información hasta 26246 pies (8000 metros) de profundidad (Figura 1 y 5a y Tabla 1).

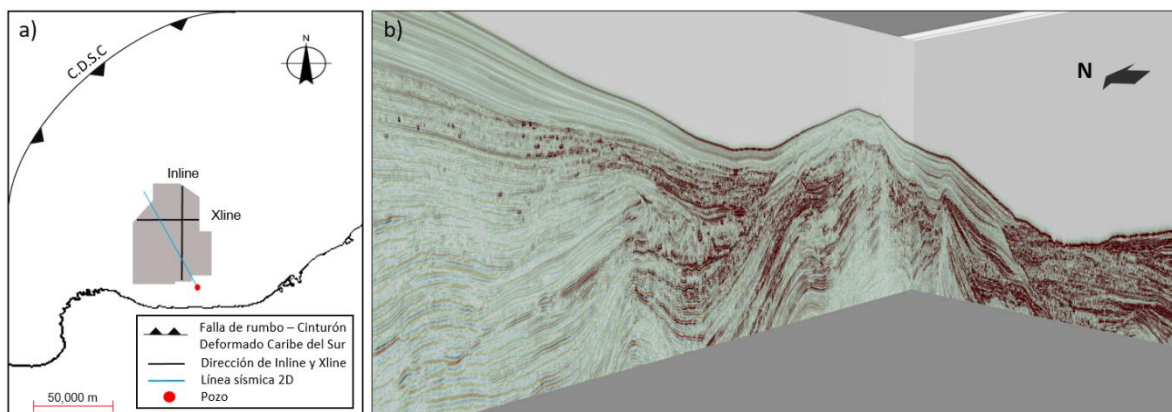


Figura 5. a) Geometría del cubo sísmico disponible, ubicado entre el cabalgamiento frontal del Cinturón Deformado del Caribe del Sur al Norte y la línea de costa de Colombia al sur. b) Inline y Xline representativos del cubo sísmico.

Tabla 1.

*Dimensiones del survey interpretado en este trabajo.*

| DIMENSIONES DEL SURVEY |               |       |          |                    |             |               |
|------------------------|---------------|-------|----------|--------------------|-------------|---------------|
|                        | Espaciamiento | Total | Longitud | Área               | Profundidad | Muestreo      |
|                        | [m]           |       | [km]     | [km <sup>2</sup> ] | [ft]        | vertical [ft] |
| <b>Inline</b>          | 25            | 2300  | 80,4     | 4620               | 10818       | 16,4          |
| <b>Xline</b>           | 12,5          | 6428  | 57,5     |                    |             |               |

Además, se utilizó una línea sísmica 2D, la cual sirvió para correlacionar los datos sísmicos con los datos de pozo disponibles (ubicado a 2 km aproximadamente al sureste del cubo sísmico) mediante un sismograma sintético. Esta línea sísmica fue seleccionada debido a que es la información sísmica más cercana al pozo que a su vez atraviesa el cubo sísmico en dirección SE-NW (Figura 5a).

## 4.2 Definición de parámetros sísmicos

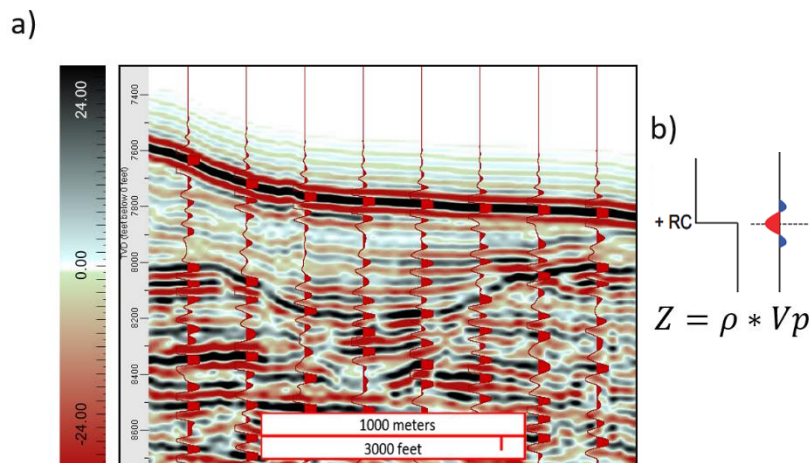
Se definió la polaridad sísmica con el fin de tener clara la relación de impedancia acústica entre los reflectores para hacer su interpretación; y así mismo se determinó la resolución sísmica vertical con el propósito de conocer cuál es el espesor mínimo que puede ser identificado en este cubo sísmico.

**4.2.1 Polaridad Sísmica** De acuerdo con la Society of Exploration Geophysics (SEG) (Sheriff R. E., 2002), existen dos tipos de polaridad: la polaridad normal (americana) y la polaridad inversa (europea). Se conoce como polaridad inversa si el incremento de la impedancia acústica a

profundidad tiene una amplitud positiva que se refleja en la traza sísmica como un pico, mientras que los datos sísmicos que tienen polaridad normal americana muestran el incremento de la impedancia acústica con la profundidad como una amplitud negativa y su respuesta sísmica es un valle.

La polaridad se define en un reflector donde los contrastes de impedancia sean conocidos, como el del fondo marino donde se tendrá el contraste entre el agua y el cuerpo rocoso. Este reflector se espera sea el primero de gran amplitud en la línea sísmica, lo que facilita su identificación.

Considerando lo anterior, en las trazas sísmicas que muestra la figura 6 el primer reflector que surge del aumento de la impedancia acústica se muestra como un valle que representa amplitud negativa, lo cual corresponde una polaridad normal.



*Figura 6.* Definición de la polaridad sísmica. a) Imagen sísmica extraída del cubo sísmico en la que se muestra una polaridad normal definida a partir de la amplitud del primer reflector negativo (rojo) que marca el contacto agua-sedimento. b) Representación de la polaridad normal o positiva producto del aumento de la impedancia acústica a profundidad. Z- impedancia acústica,  $\rho$  – densidad de la roca y  $Vp$  – velocidad de las ondas p. Escala de colores muestra el rango de las amplitudes de las reflexiones.

**4.2.2 Resolución Sísmica Vertical** Se entiende como resolución sísmica vertical la menor distancia vertical entre dos interfaces litológicas que produce dos reflexiones discretas, las cuales pueden separarse visualmente. Es un aspecto clave para la extracción de detalles estratigráficos y según Sheriff (1997) puede expresarse como un cuarto de la longitud de onda (Ecuación 1).

$$RV = \frac{\lambda}{4}$$

*Ecuación 1.* Resolución vertical (RV), definida como  $\frac{1}{4}$  de la longitud de onda ( $\lambda$ ).

La longitud de onda se define por los valores de la velocidad de propagación de las ondas y su frecuencia (Ecuación 2). Para el cálculo de este parámetro se debe tener en cuenta que a menor profundidad será posible discriminar capas de menor espesor que a mayor profundidad, ya que a mayor profundidad las velocidades sísmicas de las unidades se incrementan, mientras que la frecuencia dominante disminuye, puesto que las amplitudes asociadas a altas frecuencias de la señal sísmica se atenúan. En consecuencia, la resolución vertical no es un constante.

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

*Ecuación 2.* Longitud de onda, determinada a partir de la V - velocidad de propagación y f - frecuencia de la onda.

La resolución sísmica fue calculada en una sección sísmica tomando cuatro muestras a diferentes profundidades (Figura 7a). En cada una de ellas se determinó la velocidad de propagación y la frecuencia dominante de las ondas sísmicas. La velocidad utilizada fue la velocidad promedio en cada muestra, calculada restando la velocidad de la base y tope de la muestra y dividiendo este resultado en dos. En el caso de la frecuencia, se observó el espectro de

frecuencias de cada intervalo, y se seleccionó la frecuencia dominante (círculo verde en la Figura 7b).

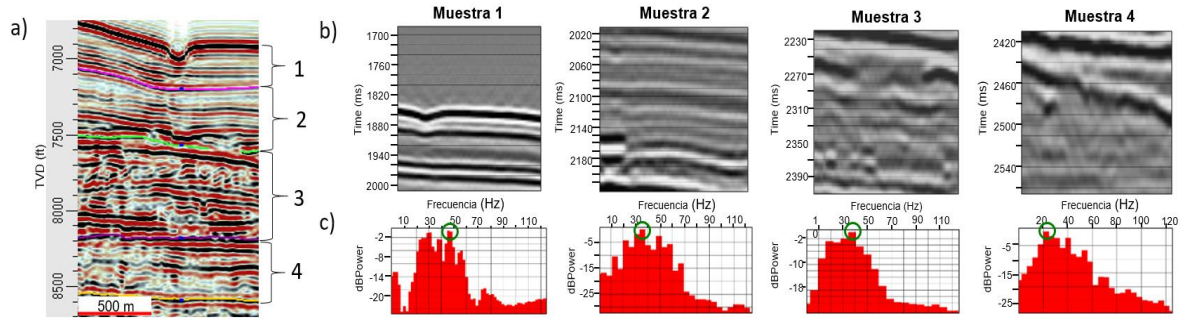


Figura 7. a) Sección sísmica utilizada para determinar la resolución sísmica vertical. b) Zoom de cada muestra en el cual se calculó la resolución c) Histograma de frecuencia instantánea para cada muestra, en círculo verde se indica la frecuencia dominante utilizada para calcular la resolución vertical.

Finalmente se realizó el cálculo mediante la Ecuación 3 y se determinó que en la muestra 1 (la más somera), es posible distinguir capas y/o cuerpos desde 33.2 pies (10.1 metros) de espesor, mientras que en la muestra 4 (la más profunda) la resolución es de 64.4 pies (19.6 metros), de modo que a medida que la profundidad aumenta la resolución vertical disminuye.

$$RV(ft) = \frac{V}{4f}$$

**Ecuación 3.** Resolución vertical definida a partir de la velocidad y frecuencia de la

Tabla 2.

*Cálculo de la resolución vertical para cada intervalo interpretado.*

| Muestra | Velocidad<br>[ft/s] | Velocidad prom<br>[ft/s] | Frecuencia<br>Dominante [hz] | Resolución<br>vertical |        |
|---------|---------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------|--------|
| 1       | 5164                | 5314.5                   | 40                           | 33.2 ft                | 10.1 m |
| 2       | 5465                | 5753.5                   | 37.6                         | 38.3 ft                | 11.7 m |
| 3       | 6042                | 6316.5                   | 35.8                         | 44.1 ft                | 13.4 m |
| 4       | 6591                | 6771.5                   | 26.3                         | 64.4 ft                | 19.6 m |
|         | 6952                |                          |                              |                        |        |

### 4.3 Amarre sísmica-pozo

Con el fin de vincular los datos adquiridos en el pozo disponible cerca del cubo sísmico (marcadores bioestratigráficos, litoloestratigrafía) con los datos sísmicos y conocer la temporalidad de los eventos que serían interpretados se generó un sismograma sintético.

**4.3.1 Sismograma sintético** Para realizar el sismograma sintético se usó la información adquirida en un pozo ubicado al SE a 2 km a aproximadamente del cubo sísmico (Figura 8a) y una línea sísmica 2D que atraviesa el cubo en dirección SE-NW a la cual se amarro este pozo.

La impedancia acústica, calculada a partir del registro sónico, de densidad y un perfil sísmico vertical (VSP), permitió definir un coeficiente de reflexión, base del sismograma sintético que al final muestra su convolución con una ondícula extraída de la sísmica. El proceso se realizó en la aplicación Syntool de la plataforma Openworks®

A partir de la comparación del sismograma con la sísmica se define la correlación de altas amplitudes, como la observada a 1700 ms en la línea sísmica, con marcadores bioestratigráficos definidos en el pozo, en este caso con la base del Plioceno-N7. Los intervalos litológicos descritos en el pozo, también muestran correlación con la información sísmica, sobre todo las capas de arena que sobresalen en las litologías arcillosas predominantes (Figura 8b).

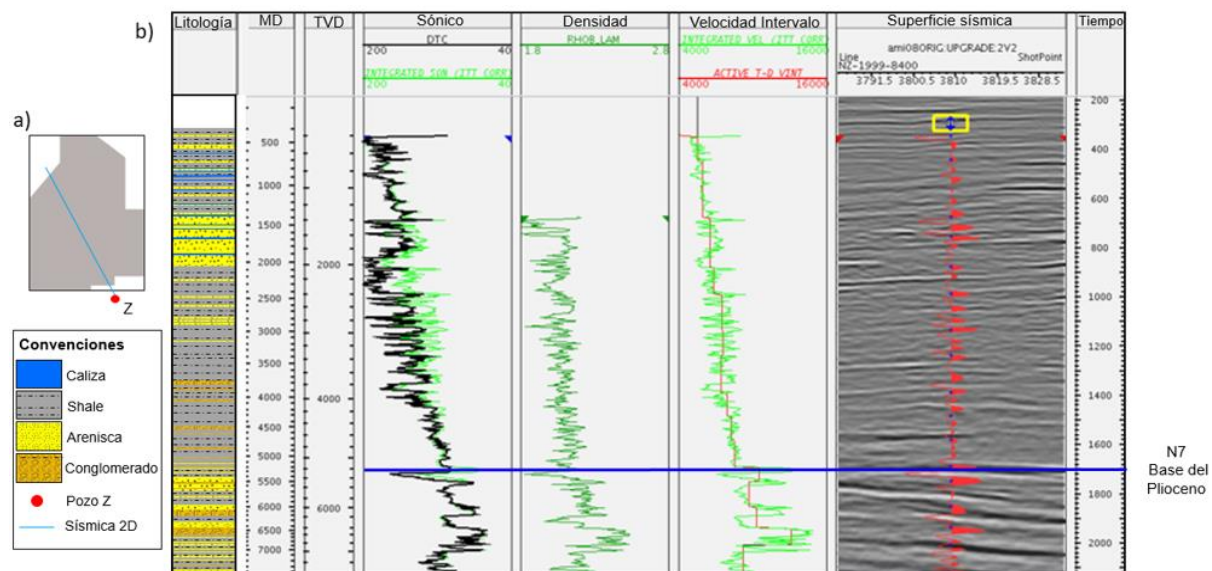


Figura 8. a) Ubicación del pozo Z respecto al cubo sísmico. b) Generación del sismograma sintético para el pozo Z. Nótese la correlación del tope de la secuencia arenosa con el reflector que define la base del Plioceno.

Por motivos de confidencialidad se estableció la base del Plioceno-N7 que corresponde en la sísmica a un reflector de alta amplitud y buena continuidad como la profundidad límite y la base del intervalo que sería interpretado y analizado en este trabajo.

Teniendo en cuenta la columna estratigráfica generalizada para la cuenca Guajira costa afuera, la temporalidad, los registros y litoestratigrafía del pozo Z, se estableció que el intervalo

seleccionado para la interpretación corresponde estratigráficamente a las Formaciones Castilletes y depósitos Cuaternarios.

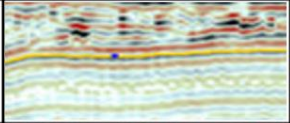
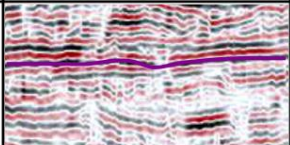
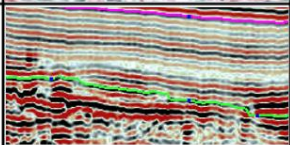
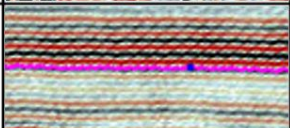
#### 4.4 Interpretación Sismoestratigráfica

A partir de la identificación de discontinuidades, terminaciones de reflectores, facies sísmicas y morfologías de reflectores representativos (Figura 2) se generó una interpretación sismoestratigráfica que permitió definir el sistema de deposición del área de estudio. Esta interpretación se llevó a cabo en el módulo de interpretación del software Decisión Space® usando la herramienta de “Auto dip” en las áreas donde los reflectores eran continuos y “point to point” en donde presentaban discontinuidad.

**4.4.1 Interpretación de horizontes** Se interpretaron cinco reflectores de amplitud positiva, numerados del más antiguo al más reciente como H1, H2, H3, H4 y H5 (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Estos reflectores fueron seleccionados debido a que permiten separar una secuencia sísmica de otra, es decir, paquetes sísmicos con características similares (continuidad, amplitud, frecuencia) y diferenciables de los paquetes adyacentes.

Tabla 3.

*Criterio de selección mediante el cual fueron elegidos los horizontes interpretados.*

| HORIZONTE | CRITERIO DE SELECCIÓN                                                                                                                                        | IMAGEN                                                                              |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| H1        | Reflector considerado como una discontinuidad local, que separa reflectores de baja amplitud y continuidad de reflectores de mayor continuidad y amplitud.   |  |
| H2        | Reflector de amplitud alta y continuidad a través del cubo sísmico.                                                                                          |  |
| H3        | Corresponde a una discontinuidad regional, identificada a partir del cambio en la continuidad, amplitud y frecuencia de los reflectores.                     |  |
| H4        | Reflector continuo a través de gran parte de la sísmica. La parte central de la sísmica separa reflectores de baja amplitud de reflectores de alta amplitud. |  |

La interpretación de estos horizontes en los perfiles sísmicos permitió definir las unidades tectonoestratigráficas A, B, C, D (Figura 9), las cuales se identifican en casi toda la extensión del cubo sísmico mostrando una variación de espesores y distribución hacia el norte, donde se interpreta un paleoalto. Aunque se identificaron varias fallas especialmente al sur del cubo sísmico, perpendiculares a la línea de costa, al interpretar los horizontes estas no se incluyeron en la interpretación debido a que el desplazamiento no es representativo.

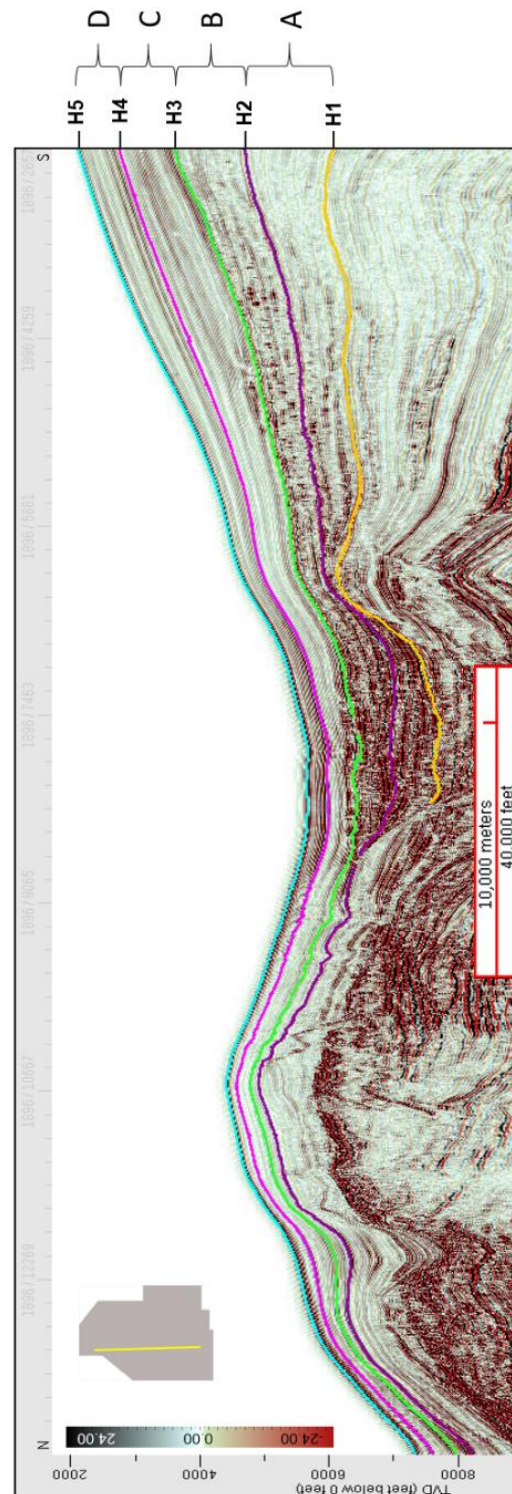


Figura 9. Sección sísmica en dirección N-S en la cual se interpretaron los horizontes numerados de forma ascendente del más profundo (H1) al más somero (H5), horizontes que definieron las unidades tectonoestratigráficas A, B, C y D.

Los horizontes fueron interpretados cada 100 Xlines y 50 Inlines, dando como resultado una malla que posteriormente fue interpolada mediante el método de Kriging con el fin de generar las respectivas superficies estructurales de cada horizonte (Figura 10). Una vez obtenidas las superficies se realizó control de calidad a las mismas, corrigiendo aquellas zonas donde la interpolación fuera brusca e incoherente.

Se obtuvieron cinco superficies estructurales que corresponden a cada uno de los horizontes interpretados. La profundidad de estas superficies varía entre 1.500 pies (457.2 m) y 10.818 pies (3297.3 m) que corresponden a las superficies de los horizontes H5 (el más somero) y H1 (el más profundo) respectivamente. Además, se observó que a mayor distancia de la línea de costa hacia el norte cada una de las superficies se hace más profunda.

Por otra parte, se observó que la superficie H1 es la de menor área, debido a que está limitada al noroeste por un paleoalto presente en esta zona, así mismo a pesar de que la superficie H2 alcanza a cubrir mayor área que la anterior, también está limitada por este paleoalto. En contraste, las superficies H3 y H4 siguen esta topografía casi hasta el tope, en donde los reflectores son bastante discontinuos y difíciles de interpretar debido a la deformación, lo que sugiere que hubo deformación posterior a la deposición de estas unidades. Finalmente, la superficie H5 fue interpretada en todo el cubo sísmico, dejando en evidencia un cañón submarino que corta el lecho marino actual, ubicado al oriente de paleoalto. La superficie H4 se muestra cortada al noreste, debido a que los reflectores de esta superficie están siendo truncados por la superficie del fondo marino (cañón submarino).

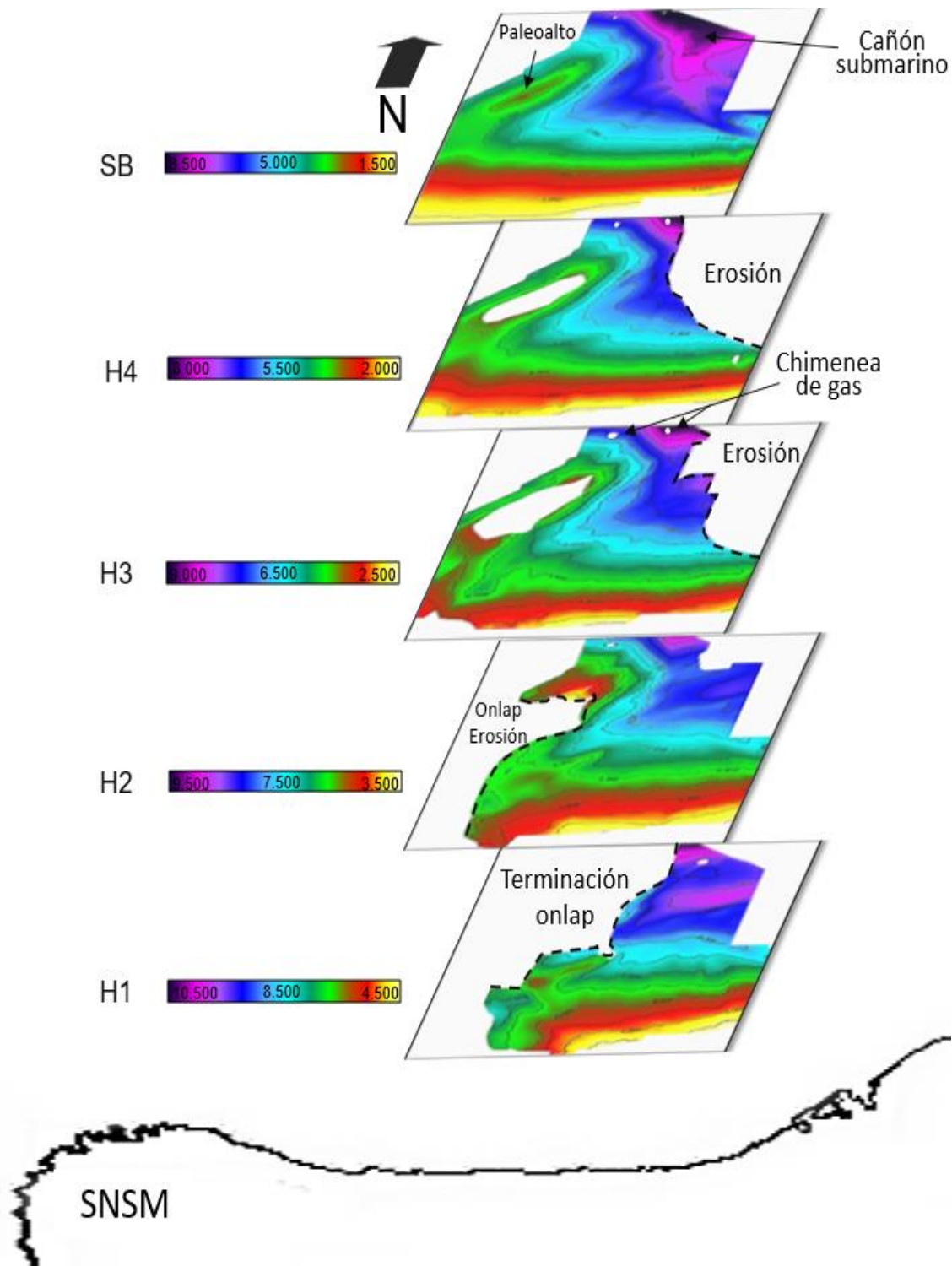


Figura 10. Mapas estructurales de cada uno de los horizontes interpretados. Los colores cálidos corresponden a las zonas más someras, mientras que los colores fríos corresponden a zonas de mayor profundidad. Cabe aclarar que la escala de colores no es la misma para todos los horizontes.

**4.4.2 Mapas Isópacos** Un mapa isópaco es un mapa que muestra las variaciones de espesor real de una secuencia estratigráfica por medio de líneas de contorno que conectan puntos de igual espesor. Estos mapas ayudan a entender la estructura, tamaño y extensión de una unidad (Bishop, 1960).

En este proyecto se calculó un mapa isópaco para cada una de las secuencias definidas (A, B, C y D). Estos mapas permitieron determinar que en todas las secuencias el espesor disminuye gradualmente hacia el norte, principalmente al noroeste, en donde se encuentra el paleoalto. Por otra parte, el mayor espesor en cada secuencia se presenta en la zona suroeste que limita con la línea de costa (Figura 13a, 14a, 15a y 16a).

### Facies Sísmicas

El análisis de facies sísmicas examina las reflexiones dentro de las secuencias identificadas, dado que pueden ayudar en la interpretación regional de la litología, ambiente deposicional y paleobatimetría (Mitchum, 1977).

Los parámetros sísmicos más útiles para distinguir una facie de otra son:

1. Las terminaciones de la reflexión con respecto a las superficies discordantes que limitan las secuencias (p. ej. onlap, downlap, truncación erosional, toplap, entre otros, las cuales puede ser asociadas a eventos geológicos (Figura 11 y Tabla 4).

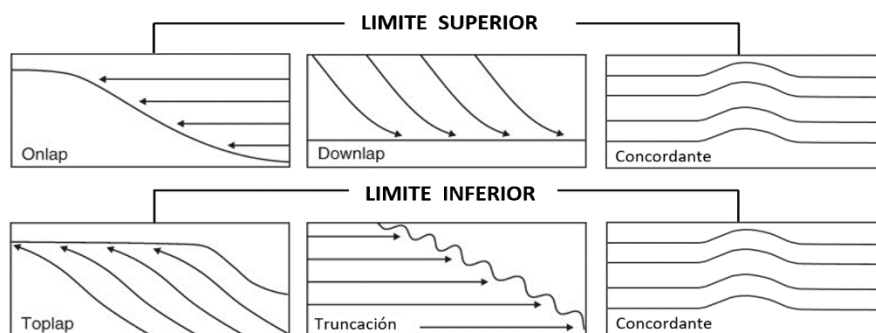


Figura 11. Terminaciones de reflexiones sísmicas al tope y la base de una secuencia.

Tabla 4.

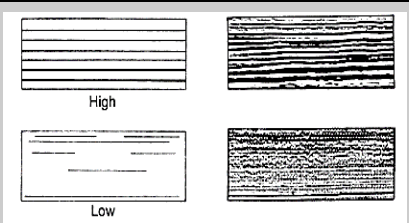
*Significado geológico de las terminaciones sísmicas.*

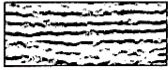
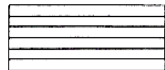
| TERMINACIÓN       | SIGNIFICADO GEOLÓGICO                       |
|-------------------|---------------------------------------------|
| <b>Onlap</b>      | Agradación<br>Transgresión                  |
| <b>Downlap</b>    | Progradación                                |
| <b>Toplap</b>     | Erosión<br>Tectónica                        |
| <b>Truncación</b> | Hiato sedimentario<br>Progradación deltaica |

2. Forma interna de las reflexiones sísmicas definida a partir de las características de los reflectores: continuidad, amplitud y frecuencia; las cuales pueden ser asociadas con determinados rasgos geológicos que permiten diferenciar una unidad de las unidades adyacentes (Tabla 5).

Tabla 5.

*Interpretación geológica de las características de una reflexión sísmica (Sangree & Windmier, 1977).*

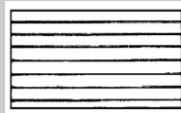
| Característica del reflector | Interpretación geológica                                                                                                                                                            | Representación                                                                       |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Amplitud                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Contraste de impedancia (velocidad-densidad)</li> <li>• Espesor de la capa</li> <li>• Contenido de fluido</li> <li>• Litofacies</li> </ul> |  |

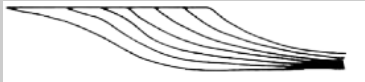
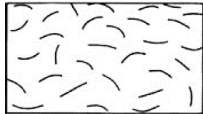
| Característica del reflector | Interpretación geológica                                                                                          | Representación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Frecuencia                   | <ul style="list-style-type: none"><li>• Contenido de fluido</li><li>• Espesor de la capa</li></ul>                | <div><br/>High</div> <div><br/>Low</div> <div></div> <div></div>                 |
| Continuidad                  | <ul style="list-style-type: none"><li>• Continuidad lateral de la capa</li><li>• Procesos de deposición</li></ul> | <div><br/>Discontinuous</div> <div><br/>Continuous</div> <div></div> <div></div> |

3. Configuración interna de la reflexión

Se reconocen las siguientes configuraciones internas de una reflexión. Cada una de ellas se interpreta en términos del ambiente deposicional y distribución de litofacies (Tabla 6).

Tabla 6.  
*Configuración interna de la reflexión y su respectiva interpretación geológica y representación sísmica (Sangree & Windmier, 1977).*

| Configuración de la reflexión | Interpretación geológica                                                                                                                                 | Representación                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Paralelo                      | <ul style="list-style-type: none"><li>• Deposición en un ambiente amplio y uniforme.</li><li>• Sedimentación constante, acomodación constante.</li></ul> | <div></div> <div></div> |
| Paralelo discontinuo          | <ul style="list-style-type: none"><li>• Sedimentación constante con energía variable.</li></ul>                                                          |                                                                                                             |

| Configuración de la reflexión | Interpretación geológica                                                                                                                                                                            | Representación                                                                        |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Oblicuo                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Progradación desde los márgenes de la cuenca.</li> <li>• Acreción lateral hasta formar pendientes suaves.</li> </ul>                                       |     |
| Divergente                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Engrosamiento hacia la cuenca</li> <li>• Variación lateral de las tasas de sedimentación</li> <li>• Basculamiento sin-deposicional de la cuenca</li> </ul> |    |
| Sigmoidal (clinoformas)       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Propagación desde los márgenes de la cuenca.</li> <li>• Acreción lateral hasta formar pendientes suaves.</li> <li>• Tasa de aporte importante.</li> </ul>  |                                                                                       |
| Caótico                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin estructura</li> <li>• Deformación sin-sedimentaria</li> <li>• Deposition en ambientes de alta energía.</li> </ul>                                      |  |

La interpretación de facies sísmicas en este trabajo se realizó utilizando el método de mapeo e interpretación propuesto por Ramsayer (1979), el cual analiza y clasifica las facies sísmicas en cada secuencia a partir de tres criterios: la terminación de los reflectores al tope (A) y la base (B) de la secuencia, y su configuración interna (C).

En este trabajo se incluyó la amplitud de la onda sísmica como cuarto criterio (D), con el fin de realizar un análisis más detallado y hacer una mejor discriminación de las facies sísmicas. La

nomenclatura para nombrar las facies sísmicas en este trabajo está definida por la siguiente configuración.

$$\text{Facies sísmicas: } \frac{A - B}{C - D}$$

Con el fin de simplificar esta nomenclatura se abreviaron cada uno de los parámetros utilizados en el análisis de facies en la Figura 7.

Tabla 7.

*Nomenclatura de mapeo de facies sísmicas. Tomado y modificado de Ramsayer, 1979.*

| Criterio                          | Forma                | Convencion |
|-----------------------------------|----------------------|------------|
| Tope (A)                          | Toplap               | Tl         |
|                                   | Truncación           | Tr         |
|                                   | Concordante          | C          |
| Base (B)                          | Downlap              | Dl         |
|                                   | Onlap                | Ol         |
|                                   | Concordante          | C          |
| Configuración de la reflexión (C) | Paralelo             | P          |
|                                   | Paralelo discontinuo | Pd         |
|                                   | Sigmoidal            | S          |
|                                   | Oblicuo              | O          |
|                                   | Divergente           | Dv         |
|                                   | Caótico              | Ch         |
|                                   | Mounded              | Md         |
| Amplitud (D)                      | Variable             | V          |
|                                   | Alta                 | H          |
|                                   | Baja                 | L          |

Teniendo en cuenta el método de mapeo se realizó la interpretación y clasificación de facies sísmicas dentro de cada secuencia (Figura 9), identificando principalmente en las secuencias más profundas A y B (Figura 13b y 14b) facies paralelas discontinuas-caóticas de amplitud baja-variable, que contrastan con las facies paralelas continuas de amplitud baja-variable de las secuencias más someras C y D (Figura 15b y 16b).

**4.4.3 Atributos sísmicos** Son mediciones, características o propiedades derivadas de los datos sísmicos. Pueden ser medidos en un instante de tiempo o a través de una ventana de tiempo; y pueden medirse en una sola traza, en una serie de trazas, una superficie o un volumen extraído de los datos sísmicos (Aarre & Astratti, 2012). El principal objetivo del cálculo de atributos es proporcionar observaciones precisas y detalladas de diferentes rasgos geológicos no evidentes a simple vista (M. Turhan Taner, 1992), permitiéndole al intérprete asociar la amplitud sísmica con eventos geológicos, delinear fallas y revelar patrones relacionados con los ambientes de sedimentación.

A partir de las superficies estructurales e isópacos de cada horizonte interpretado (Figura 10, 13a, 14a, 15a, 16a), se generaron mapas de amplitud RMS y amplitud instantánea. A partir de los mapas de estos atributos se identificaron zonas de impedancia acústica anómalas que fueron asociadas a facies sísmicas e interpretados como cambios litológicos, con el fin de caracterizar sísmicamente la unidad de interés (Formación Castilletes) y definir sus elementos de deposición.

**4.4.3.1 Amplitud RMS** La amplitud RMS está definida como la suma de las amplitudes al cuadrado ( $a^2$ ), divididas por el número de trazas ( $N$ ) dentro de una ventana de análisis específica que define el tamaño a analizar del volumen sísmico (Ecuación 4).

Es comúnmente utilizado para identificar la reflectividad asociada a los aspectos estratigráficos de la formación o ventana de interés a partir de anomalías de amplitud. Así mismo permite inferir el tipo de litología de la ventana analizada, a partir de la definición de que altos valores de amplitud RMS son comúnmente relacionados con arenas de buena porosidad (Pereira, Azevedo, Pinheiro, & Abbassi, 2009).

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a^2}$$

**Ecuación 4.** Cálculo del Root Mean Square (RMS).

La extracción de amplitudes RMS se realizó en el software Geoprobe®, seleccionando una ventana de análisis para cada una de las superficies (Figura 12), teniendo en cuenta el espesor de cada secuencia (definido a través de los mapas isópacos), puesto que, si la ventana de análisis era de mayor espesor que el mínimo espesor de cada secuencia, el resultado de la extracción no correspondería con la secuencia seleccionada, debido a que tomaría datos pertenecientes a la secuencia suprayacente. Se calculó un mapa de amplitud RMS para cada secuencia (Figura 13c, 14c, 15c y 16c) en los que se identificaron zonas con amplitudes anómalas, también conocidas como “puntos brillantes”. Al correlacionar los puntos brillantes con las facies sísmicas interpretadas se pudo delimitar las geometrías y morfologías presentes en cada secuencia.

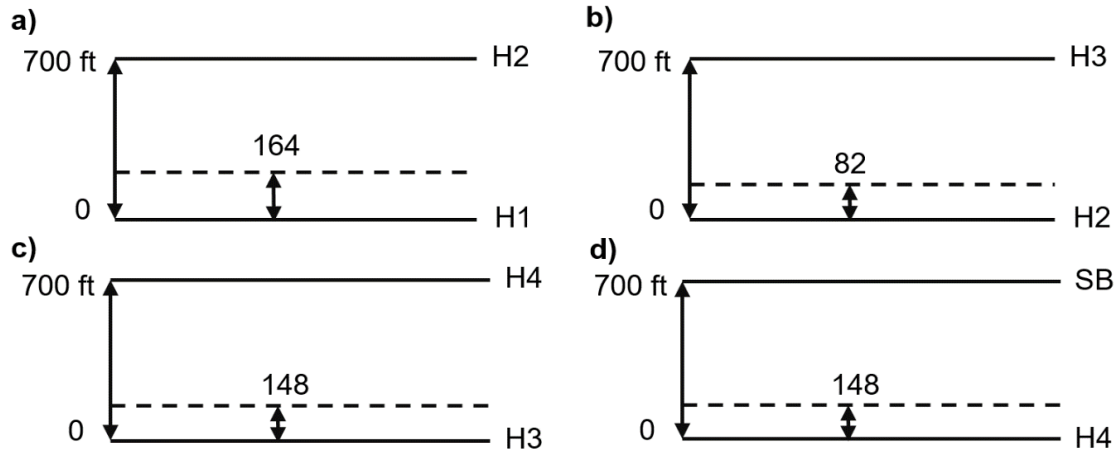


Figura 12. a) Boceto que muestra la ventana de análisis en la cual se extrajo la amplitud RMS para cada una de las superficies interpretadas. a) Intervalo de análisis para la secuencia A (50 m). b) intervalo de análisis para la secuencia B (25 m). c) Intervalo de análisis para la secuencia C (45.1 m). d) Intervalo de análisis para la secuencia D (45.1 m).

**4.4.3.2 Amplitud Instantánea** La amplitud instantánea mide la intensidad de la reflexión, es también llamada envolvente y su calcula a partir de la transformada de Hilbert.

$$Envol(t) = \sqrt{|h^2(t)| + |k^2(t)|}$$

**Ecuación 5.** Cálculo de la envolvente o amplitud

En donde la  $h(t)$  es la parte real que corresponde con los datos sísmicos registrados y  $k(t)$ , la parte imaginaria de la traza compleja, por lo que la envolvente es el módulo de la función compleja y se expresa como la Ecuación 5.

Donde la envolvente muestra la energía total instantánea y su magnitud es del mismo orden que la traza de entrada. Este atributo proporciona información relacionada con contrastes de impedancia acústica.

Este atributo fue extraído directamente sobre las superficies interpretadas, con el fin de identificar amplitudes anómalas. Las zonas anómalas corresponden generalmente con elementos de carácter erosivo o caótico.

Los mapas que muestran la extracción de la amplitud instantánea (Figura 13d, 14d, 15d y 16d) fueron editados haciendo que las amplitudes más positivas representadas por el color azul fueran transparentes, permitiendo resaltar las amplitudes negativas representadas por colores cálidos.

## 5. Interpretación y resultados

### 5.1 Secuencias Tectonoestratigráficas

**5.1.1 Secuencia A** Corresponde a la secuencia más antigua interpretada en este proyecto (Figura 10). Está limitada en la base por el horizonte H1 y en el tope por el horizonte H2, dos reflectores de amplitud positiva que representan discontinuidades erosionales. El mapa isópaco de esta secuencia muestra que su espesor varía entre 10 ft y 1800 ft (3.05 m y 548.6 m), disminuyendo gradualmente en sentido SW-NE, no obstante, el menor espesor se presenta al NW en donde se encuentra un paleoalto, correspondiente con un anticlinal (Figura 13a).

Teniendo en cuenta la clasificación e interpretación de facies sísmicas en esta secuencia (Tabla 8, Figura 13b), se identificaron 7 facies sísmicas, siendo las facies de reflectores paralelos discontinuos con terminaciones concordantes y amplitud variable-baja (CC/PdV y CC/PdL) las facies de mayor extensión. Estas facies están siendo cortadas por reflectores truncados al tope,

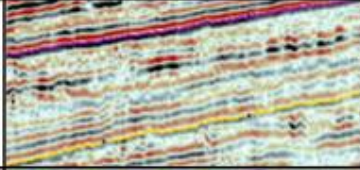
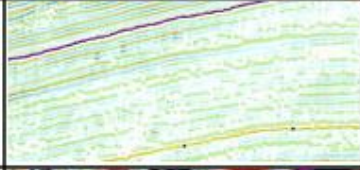
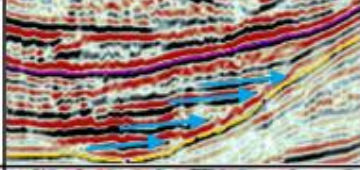
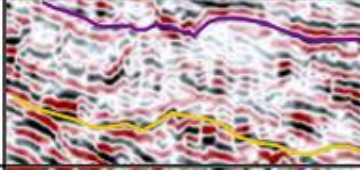
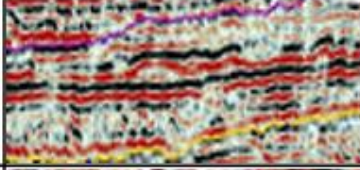
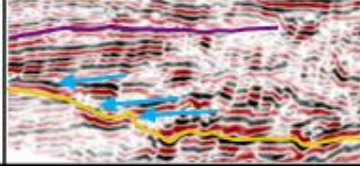
paralelos discontinuos y de amplitud variable (TrC/PdV) que se extienden predominantemente en sentido SE-NW. Esta última facie también fue interpretada teniendo en cuenta los mapas de extracción de atributos sísmicos, en los que se observa que las amplitudes anómalas (Figura 13c y Figura 13d) siguen una geometría lineal-levemente sinuosa. A partir de esto se determinó que esta facie corresponde a paleocanales erosionales-agradacionales, en los que las anomalías representan depósitos de desborde de canal.

También se mapearon zonas que presentan configuración interna caótica, amplitud variable y terminación truncada (TrC/ChV), las cuales fueron asociadas a depósitos de transporte masivo (MTD).

Las demás facies sísmicas interpretadas (COI/PdV y TrOI/PdV) son aquellas que se encuentran en el oeste del área y son principalmente reflectores que terminan en onlap contra el paleoalto presente en esta zona y relacionan directamente con el depocentro marcado en el mapa isópaco. Estas facies están relacionadas con las anomalías de amplitud RMS (colores cálidos), las cuales se producen debido a efectos de sintonía (efecto tuning) producto de la suma de amplitudes generada por las terminaciones en onlap.

Tabla 8.

*Clasificación de facies en el intervalo A. Nomenclatura= AB/CD, donde A – terminación al tope, B – terminación a la base, C – configuración interna, D – amplitud.*

| <b>CLASIFICACIÓN DE FACIES PARA SECUENCIA A (H1 – H2)</b> |                                                                                     |                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nomenclatura</b>                                       | <b>Imagen</b>                                                                       | <b>Descripción</b><br>a – configuración de la reflexión, b – amplitud, c – continuidad, d - frecuencia |
| <b>CC/PdV</b>                                             |    | a. Paralelo discontinuo<br>b. Variable<br>c. Discontinuo<br>d. Baja                                    |
| <b>CC/PdL</b>                                             |    | a. Paralelo discontinuo<br>b. Baja<br>c. Discontinuo<br>d. Baja                                        |
| <b>CC/PH</b>                                              |   | a. Paralelo<br>b. Alta<br>c. Continuo<br>d. Alta                                                       |
| <b>COI/PdV</b>                                            |  | a. Paralelo discontinuo<br>b. Variable<br>c. Discontinuo<br>d. Baja                                    |
| <b>TrC/ChV</b>                                            |  | a. Caótico<br>b. Variable<br>c. Discontinuo<br>d. Baja                                                 |
| <b>TrC/PdV</b>                                            |  | a. Paralelo discontinuo<br>b. Variable<br>c. Discontinuo<br>d. Baja                                    |
| <b>TrOI/PdV</b>                                           |  | a. Paralelo discontinuo<br>b. Variable<br>c. Discontinuo<br>d. Baja                                    |

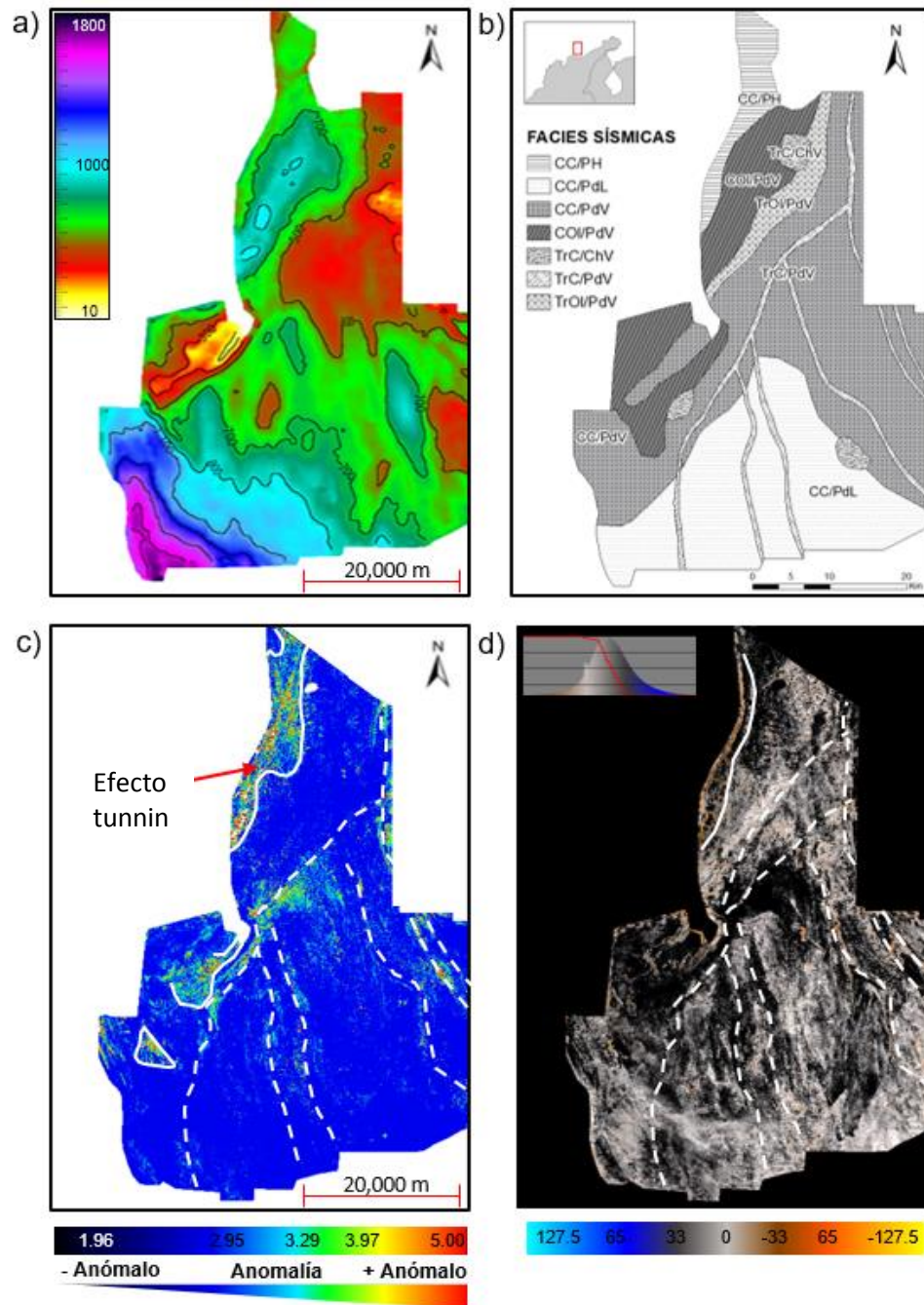


Figura 13. Mapas correspondientes a la secuencia A. a) Mapa isópaco con escala de colores en pies. b) Mapa de facies. c) Mapa de amplitud RMS, en el cual los colores cálidos representan anomalías de amplitud que pueden ser causadas por cambios litológicos (p. ej. arena vs lodo) asociados con sedimentos que transportaban antiguos canales. La zona anómala al noroeste es producto de efecto tunnning. d) Mapa de amplitud instantánea. Las líneas blancas sugieren rasgos continuos de anomalías interpretadas como paleocanales.

**5.1.2 Secuencia B** Esta secuencia suprayace la secuencia A y está limitada por los horizontes H2 y H3 a la base y tope respectivamente (Figura 9 y 10). A partir del mapa isópaco se interpretó que esta secuencia tiene mayor espesor que la secuencia A, puesto que su espesor varía entre 20 ft y 2000 ft (6.01 m y 609.6 m), es decir, aproximadamente 200 ft (60.96 m) más que la secuencia infrayacente (Figura 14a). El mayor espesor al igual que en la secuencia A se presenta hacia el suroeste, cerca de la línea de costa, mientras que a medida que se profundizan los horizontes el espesor disminuye, no obstante, el menor espesor se presenta en el área en donde se presenta el paleoalto.

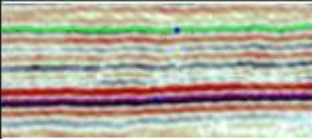
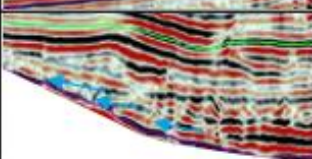
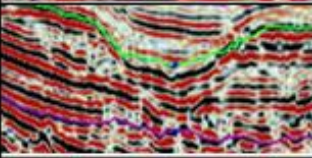
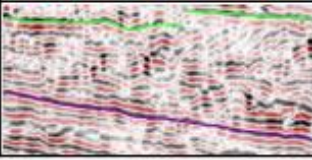
El mapeo y clasificación de facies (Tabla 9 y Figura 14b) refleja que esta secuencia es facialmente similar a la secuencia A, es decir, está compuesta principalmente por reflectores paralelos discontinuos con terminación concordante al tope y base (CC/PdV y CC/PdL), sin embargo en esta secuencia los reflectores muestran una amplitud diferente. Además, presenta la facie que consta de terminación truncada hacia el tope, con configuración paralelo discontinua y amplitud variable (TrC/PdV), la cual es interpretada como la respuesta sísmica a la acción erosiva producida por paleocanales que van depositando sedimentos a lo largo de su cauce generando depósitos de desborde de canal, identificados a partir de amplitudes anómalas gracias a los atributos sísmicos calculados (Figura 14c y 14d). Estas anomalías se generan debido a que las amplitudes en estas zonas contrastan con las demás amplitudes, y por ende se muestran como “puntos brillantes”. También se interpretaron depósitos de transporte masivo (MTD) a partir de los reflectores con configuración caótica, truncados al tope y de amplitud variable (TrC/ChV). A diferencia de la secuencia A, en esta secuencia se observa que la progradación de sedimentos alcanzó a cubrir una parte del paleoalto presente. Las facies (CC/PL y CC/PV) que cubren este paleoalto se caracterizan por ser paralelas continuas, lo que permite interpretar que en esta zona

los sedimentos se depositaron en un medio de menor perturbación sedimentológica con respecto a la zona en donde los reflectores son discontinuos.

Los atributos sísmicos en esta secuencia permiten definir con mayor precisión la geometría y sentido de la facie TrC/PdV, ya que tanto en la extracción de la amplitud RMS (Figura 14c) como en la de amplitud instantánea (Figura 14d) se observan amplitudes anómalas en dirección N-S. En el mapa de amplitud RMS se observó al igual que en la secuencia A un área con amplitudes anómalas que sería producto de efecto tuning, debido parte de los reflectores de esta secuencia terminan en onlap contra el paleoalto presente al noroeste.

Tabla 9.

*Clasificación de facies en el intervalo B. Nomenclatura= AB/CD, donde A – terminación al tope, B – terminación a la base, C – configuración interna, D – amplitud.*

| <b>CLASIFICACIÓN DE FACIES PARA INTERVALO B (H2 – H3)</b> |                                                                                     |                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nomenclatura</b>                                       | <b>Imagen</b>                                                                       | <b>Descripción</b><br>a – configuración de la reflexión,<br>b – amplitud, c – continuidad, d – frecuencia. |
| <b>CC/PL</b>                                              |    | a. Paralelo<br>b. Baja<br>c. Continuo<br>d. Alta                                                           |
| <b>CC/PV</b>                                              |    | a. Paralelo<br>b. Variable<br>c. Continuo<br>d. Alta                                                       |
| <b>CC/PdL</b>                                             |    | a. Paralelo discontinuo<br>b. Baja<br>c. Discontinuo<br>d. Baja                                            |
| <b>CC/PdV</b>                                             |   | a. Paralelo discontinuo<br>b. Variable<br>c. Discontinuo<br>d. Baja                                        |
| <b>COI/PdV</b>                                            |  | a. Paralelo discontinuo<br>b. Variable<br>c. Discontinuo<br>d. Baja                                        |
| <b>TrC/PdV</b>                                            |  | a. Paralelo discontinuo<br>b. Variable<br>c. Discontinuo<br>d. Baja                                        |
| <b>TrOI/PdV</b>                                           |  | a. Paralelo discontinuo<br>b. Variable<br>c. Discontinuo<br>d. Baja                                        |
| <b>TrC/ChV</b>                                            |  | a. Caótica<br>b. Variable<br>c. Discontinuo<br>d. Baja                                                     |



**5.1.3 Secuencia C** La secuencia C está delimitada por el horizonte H3 en la base y el horizonte H4 en el tope. En esta secuencia el espesor varía entre 100 ft y 1700 ft (30.5 m y 518.2 m). De igual manera que las secuencias anteriores el mayor espesor se presenta hacia el sur, cerca de la línea de costa, mientras que el menor espesor se encuentra en el tope del paleoalto, en donde los reflectores terminan en onlap debido a que el levantamiento progresivo del paleoalto es un poco más rápido que la deposición de sedimentos (Figura 15a).

Las facies sísmicas de esta secuencia (Tabla 10 y Figura 15b) se caracterizan principalmente por reflectores paralelos continuos, lo que la diferencia de las secuencias A y B, y permite interpretar que el sistema de deposición cambió significativamente con respecto al sistema en el que se depositaron las secuencias infrayacentes, lo cual se refleja en la distribución de las facies sísmicas, en el espesor de la secuencia y en los mapas que muestran las anomalías de amplitudes sísmicas.

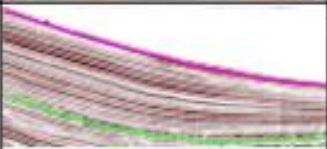
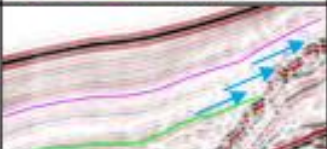
Se identificaron facies con geometría sigmoidal (CC/SPV) y reflectores con terminaciones en downlap (CDI/PV), que representan geológicamente la progradación de los sedimentos hacia la cuenca. Estas facies están siendo cortadas por las facies TrC/PdV y TrC/PV, que se extienden hacia el noreste, y corresponden a paleocanales y cárcavas submarinas respetivamente. Sísmicamente caracterizadas por la continuidad de los reflectores y por las amplitudes anómalas que acompañan la facie TrC/PdV, se puede sugerir que estos paleocanales erosionan, transportan y depositan sedimentos, mientras que las cárcavas submarinas, que se definen como elementos formados por la acción erosiva de las corrientes submarinas transportan sedimentos finos. Estos paleocanales se diferencian de los de las secuencias anteriores por tener la geometría característica canal-dique (levee).

Las facies interpretadas al noroeste (TrOl/PL, COl/PL y CC/PV) corresponden a los depósitos que cubren el paleoalto encontrado en esta zona, cuyo tope está representado por el polígono blanco, ya que no fue posible interpretarlo debido a la deformación que presenta. Finalmente, la facie que muestra terminación truncada en el tope y alta amplitud (TrC/PH), se interpreta como la respuesta sísmica generada por la acción erosiva que está realizando el cañón que se encuentra actualmente activo y que se observa en la superficie más somera que corresponde con el fondo marino actual.

Las anomalías de amplitud RMS (Figura 15c) y amplitud instantánea (Figura 15d) representadas por los colores cálidos, se distribuyen linealmente hacia el noreste y están asociadas a los paleocanales identificados, por lo que corresponderían con depósitos de desborde de canal.

Tabla 10.

*Clasificación de facies en el intervalo C. Nomenclatura= AB/CD, donde A – terminación al tope, B – terminación a la base, C – configuración interna, D – amplitud.*

| <b>CLASIFICACIÓN DE FACIES PARA INTERVALO C (H3 - H4)</b> |                                                                                     |                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nomenclatura</b>                                       | <b>Imagen</b>                                                                       | <b>Descripción</b><br>a – configuración de la reflexión, b – amplitud, c – continuidad, d – frecuencia. |
| <b>CC/PL</b>                                              |    | a. Paralelo<br>b. Baja<br>c. Continuo<br>d. Alta                                                        |
| <b>CC/PV</b>                                              |    | a. Paralelo<br>b. Alta<br>c. Continuo<br>d. Alta                                                        |
| <b>CC/SPH</b>                                             |   | a. Paralelo<br>b. Variable<br>c. Continuo<br>d. Alta                                                    |
| <b>COI/PL</b>                                             |  | a. Paralelo<br>b. Baja<br>c. Continuo<br>d. Alta                                                        |
| <b>CDI/PV</b>                                             |  | a. Paralelo<br>b. Variable<br>c. Continuo<br>d. Alta                                                    |
| <b>TrC/PdV</b>                                            |  | a. Paralelo<br>b. Variable<br>c. Discontinuo<br>d. Alta                                                 |
| <b>TrC/PV</b>                                             |  | a. Paralelo<br>b. Variable<br>c. Continuo<br>d. Alta                                                    |
| <b>TrC/PH</b>                                             |  | a. Paralelo<br>b. Alta<br>c. Continuo<br>d. Alta                                                        |
| <b>TrOI/PL</b>                                            |  | a. Paralelo<br>b. Baja<br>c. Continuo<br>d. Alta                                                        |

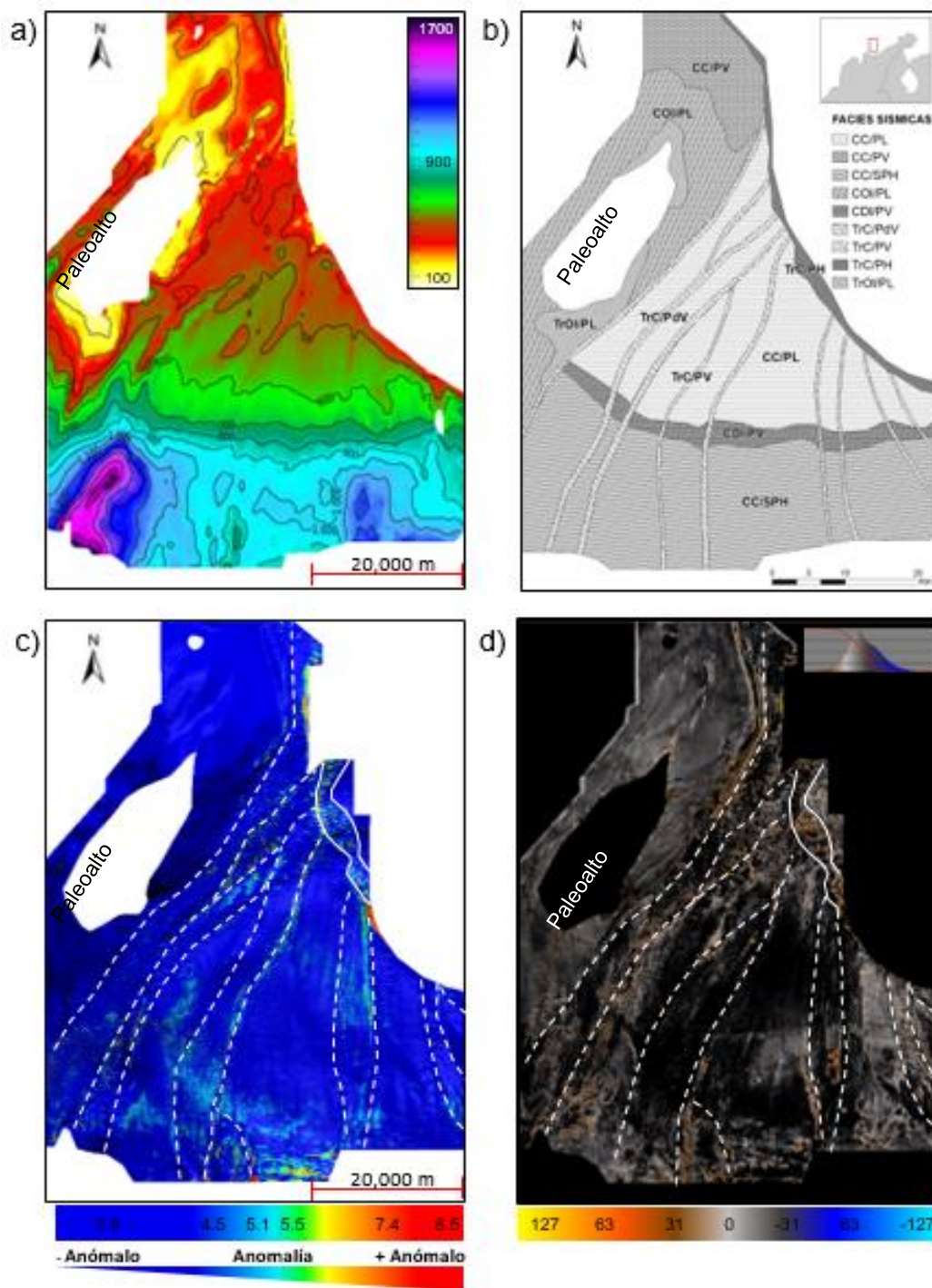


Figura 15. Mapas correspondientes a la secuencia C. a) Mapa isópaco con escala de colores en pies. b) Mapa de facies. c) Mapa de amplitud RMS en el cual los colores cálidos representan anomalías de amplitud que se distribuyen linealmente hacia el noreste, asociadas a paleocanales cárcavas submarinas. d) Mapa de amplitud instantánea.

**5.1.4 Secuencia D** Esta secuencia corresponde a la más somera, limitada en la base por el horizonte H4 y al tope por el horizonte H5. El mapa isópaco de esta secuencia (Figura 16a) permitió determinar que su espesor varía entre 50 ft y 950 ft (15.2 m y 289.6 m), siendo la secuencia de menor espesor.

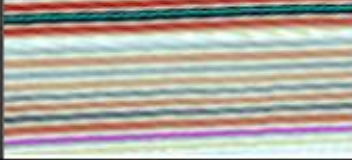
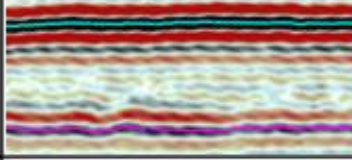
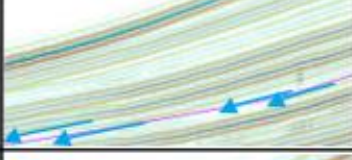
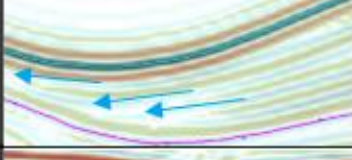
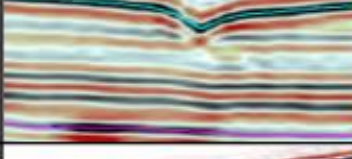
Las facies sísmicas interpretadas en esta unidad (Tabla 11 y Figura 16b), son similares a las interpretadas en la secuencia C, puesto que se observaron terminaciones en downlap (CDI/PV) y en forma sigmoidal (CC/SPV) que corresponden con la progradación de la secuencia hacia aguas profundas, así como reflectores con terminación truncada en la zona que limita con el cañón submarino actual.

El tope de esta secuencia (fondo marino actual) está siendo cortado por cárcavas submarinas (gullies), representadas por la facie con terminación truncada en el tope, concordante a la base, y amplitud variable (TrC/PV), e identificadas también a partir de la regla de la V en el mapa estructural de este horizonte y en el mapa isópaco de esta secuencia. Estas cárcavas son conductos que han sido formados por la acción de corrientes marinas, a través de los cuales se transporta sedimentos hacia el fondo de la cuenca.

En el mapa de amplitud RMS (Figura 16c) se observan amplitudes anómalas asociadas a las cárcavas submarinas principalmente al sur del área de estudio debido posiblemente a que en esta zona las cárcavas son menos profundas y por ende el material transportado tiende a depositarse de manera concordante en los costados de estas. Por otra parte, en el mapa de amplitud instantánea (Figura 16d) no se observan anomalías a lo largo de estos elementos, lo cual permite definir que los sedimentos que se transportan a través de estas cárcavas son predominantemente material de grano fino que se correlaciona con los depósitos Cuaternarios definidos por Rollins (1960).

Tabla 11.

*Clasificación de facies en el intervalo D. Nomenclatura= AB/CD, donde A – terminación al tope, B – terminación a la base, C – configuración interna, D – amplitud.*

| <b>CLASIFICACIÓN DE FACIES PARA INTERVALO D (H4 - H5)</b> |                                                                                     |                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nomenclatura</b>                                       | <b>Imagen</b>                                                                       | <b>Descripción</b><br>a – configuración de la reflexión, b – amplitud, c – continuidad, d – frecuencia. |
| <b>CC/PH</b>                                              |    | a. Paralelo<br>b. Alta<br>c. Continuo<br>d. Alta                                                        |
| <b>CC/PV</b>                                              |    | a. Paralelo<br>b. Variable<br>c. Continuo<br>d. Alta                                                    |
| <b>CC/PdV</b>                                             |   | a. Paralelo discontinuo<br>b. Variable<br>c. Discontinuo<br>d. Baja                                     |
| <b>CC/SPV</b>                                             |  | a. Paralelo<br>b. Alta<br>c. Continuo<br>d. Alta                                                        |
| <b>CDI/PL</b>                                             |  | a. Paralelo<br>b. Baja<br>c. Continuo<br>d. Alta                                                        |
| <b>COI/PL</b>                                             |  | a. Divergente<br>b. Baja<br>c. Continuo<br>d. Alta                                                      |
| <b>TrC/PV</b>                                             |  | a. Paralelo<br>b. Variable<br>c. Continuo<br>d. Alta                                                    |
| <b>TrC/PdH</b>                                            |  | a. Paralelo discontinuo<br>b. Variable<br>c. Discontinuo<br>d. Baja                                     |

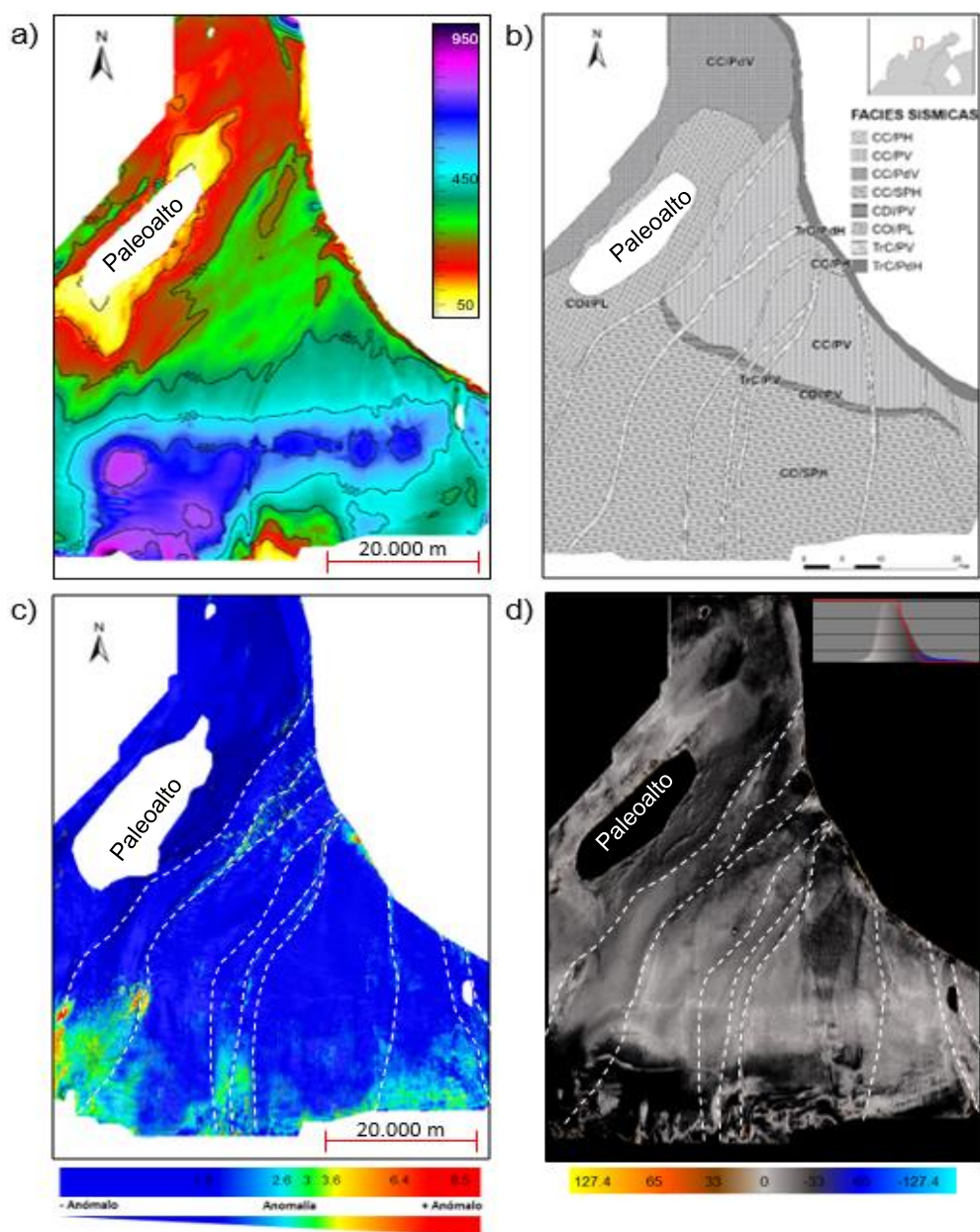


Figura 16. Mapas correspondientes a la secuencia D. a) Mapa isópaco, escala de colores en pies, muestra mayor espesor al sur que disminuye progresivamente hacia el sureste, sin embargo, el menor espesor se encuentra al tope del paleoalto. b) Mapa de facies. c) Mapa de amplitud RMS en el cual los colores cálidos representan anomalías que se distribuyen linealmente hacia el noreste, asociadas a paleocanales y una zona al suroeste producto de algunas fallas que cortan la secuencia. d) Mapa de amplitud instantánea en el cual no se observa ninguna clase de anomalía (colores cálidos) lo cual permite interpretar que esta secuencia es litológicamente homogénea. Las líneas blancas representan los paleocanales identificados.

## 5.2 Elementos Deposicionales

La deposición y acomodación de los sedimentos en el área de estudio están asociadas al paleoalto y el depocentro ubicados al oeste y sur de la zona de estudio respectivamente. Considerando lo anterior, la deposición de la unidad A esta limitada por el paleoalto que se encuentra levantado para el momento de la deposición de esta unidad. Por otra parte, en las unidades B, C y D la deposición de los sedimentos es coetánea con el levantamiento progresivo del paleoalto. Además, estas tres unidades están limitadas al este por acción erosiva del cañón submarino que actualmente se desarrolla en esta zona.

A partir del análisis de la morfología de las superficies, extracción de atributos sísmicos, interpretación de facies y asociación de estas, se identificaron diferentes elementos deposicionales (Figura 18) presentes en cada una de las secuencias analizadas, las cuales, según la correlación sísmica-pozo se han depositado desde principios del Plioceno hasta el presente.

Teniendo en cuenta los elementos deposicionales identificados en cada secuencia, se plantea que las secuencias A y B pueden haber sido depositadas bajo las mismas condiciones, debido a que están formadas principalmente por facies (CC/PdL y CC/PdV) que constituyen el relleno de una depresión de aproximadamente 30 km de ancho de orientación suroeste-noreste, formada antes del Plioceno. Se plantean dos hipótesis posibles para la formación de esta depresión: (1) corresponde a una cuenca piggy-back formada en el talud producto de la deformación causada por la colisión oblicua entre las placas del Caribe y Sudamérica, cuya evidencia es el paleoalto que se encuentra al noroeste del área de estudio. Esta cuenca se podría correlacionar con las cuencas piggy-back identificadas por Cadena et al., (2015) en las inmediaciones del abanico submarino del Magdalena, las cuales afectan el flujo continuo de los sedimentos hacia la planicie abisal. (2) un

antiguo cañón que erosionó el talud y que producto de la alta tasa de sedimentación fue rellenado a través del tiempo y que se correlaciona con lo descrito por Norman & Carlson (2003), quienes definen que los antiguos cañones pueden alcanzar más de 2.5 km de profundidad y 100 km de ancho.

El relleno de esta depresión también está compuesto por depósitos de movimientos en masa (TrC/ChV), identificados principalmente por reflectores caóticos, lo que sugiere que se trata de deslizamientos rotacionales (Figura 2b), además de paleocanales de tipo erosional-agradacional identificados a partir de la facie TrC/PdV y de las amplitudes anómalas reconocidas en los mapas de atributos sísmicos. Estos “puntos brillantes” son asociados a los depósitos de desborde de estos canales, que pueden asociarse con los cuerpos de arena identificados en la parte superior de la Formación Castilletes (Cadena, 2010).

Este tipo de depósitos de relleno sugiere un régimen de media a alta energía para estas secuencias, que de acuerdo con los estudios realizados por Duque-Caro y Reyes (1999) hacia el suroeste del área de estudio, principalmente en el abanico del Magdalena se depositaron en un sistema marino profundo, posiblemente en el talud superior-medio.

Con base en los elementos deposicionales definidos en las secuencias C y D se determinó que estas dos secuencias también se depositaron en un mismo sistema deposicional. En este sistema se identificaron facies sísmicas con geometría sigmoidal y terminación en downlap (CC/SPH y CDl/PV), las cuales son la evidencia sísmica de la progradación de los sedimentos hacia la cuenca. En general las facies de estas secuencias contrastan con la de las secuencias infrayacentes debido a que presentan reflectores continuos paralelos de variable amplitud, lo que sugiere que los sedimentos que las componen fueron depositados en un sistema de baja energía. Cadena (2010)

relaciona estas facies sísmicas con sedimentos pelágicos-hemipelágicos compuestos por intercalaciones de lutitas clásticas y limolitas (Figura 17).

La diferencia entre estas dos secuencias es la presencia de paleocanales en la secuencia C. Estos paleocanales tienen geometría canal-dique (levee) y anomalías de amplitud sísmica en los mapas de amplitud RMS e instantánea, lo que indica que son de tipo erosional-gradacional. Estas anomalías podrían correlacionarse con los bancos de areniscas de grano medio a grueso identificados en los depósitos Cuaternarios definidos por Rollins (1960). Por otra parte, tanto la secuencia C como la D han sido cortadas por cárcavas submarinas (gullies), creadas por la acción erosiva de las corrientes submarinas, las cuales teniendo en cuenta los mapas de extracción de atributos actúan como conductos para el transporte de sedimentos finos, debido a que estos no evidencian anomalías de amplitudes que indiquen la presencia de sedimentos gruesos que contrasten con los sedimentos finos que conforman las secuencias.

Comparando la interpretación de estas secuencias con la realizada por Escalante (2006) y Cadena (2010) en la depresión Tayrona y el abanico del Magdalena respectivamente, las secuencias C y D fueron depositadas en sistema marino somero clástico, que varía entre talud superior y plataforma externa, lo cual podría indicar que hubo cambio brusco en la energía de deposición entre los sedimentos de las secuencias B y C.

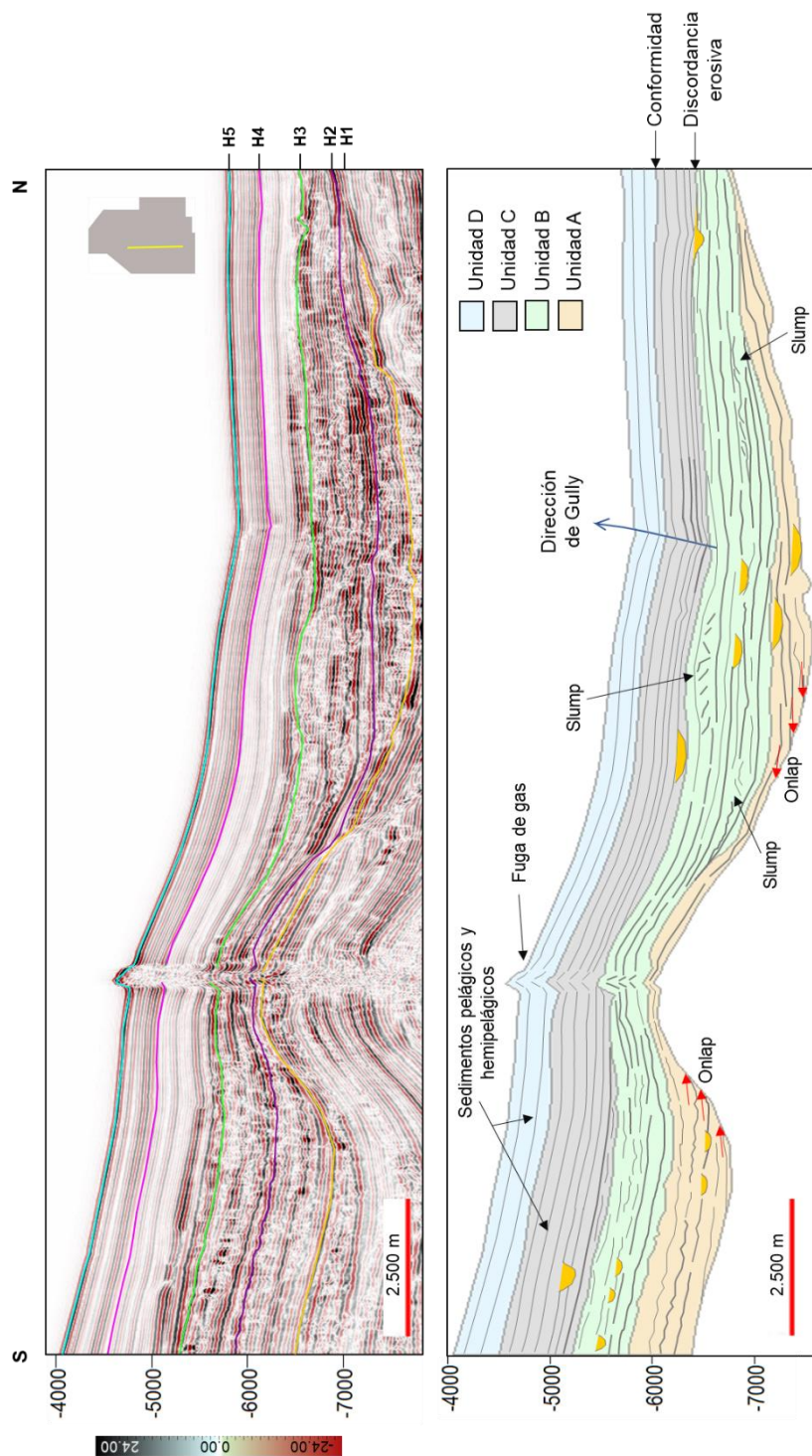


Figura 17. Sección sísmica en dirección sur-norte que muestra las cuatro secuencias tectonoestratigráficas interpretadas y los diferentes elementos deposicionales identificados. Se observa el contraste de la continuidad, amplitud y frecuencia de las reflexiones sísmicas entre las secuencias B y C.

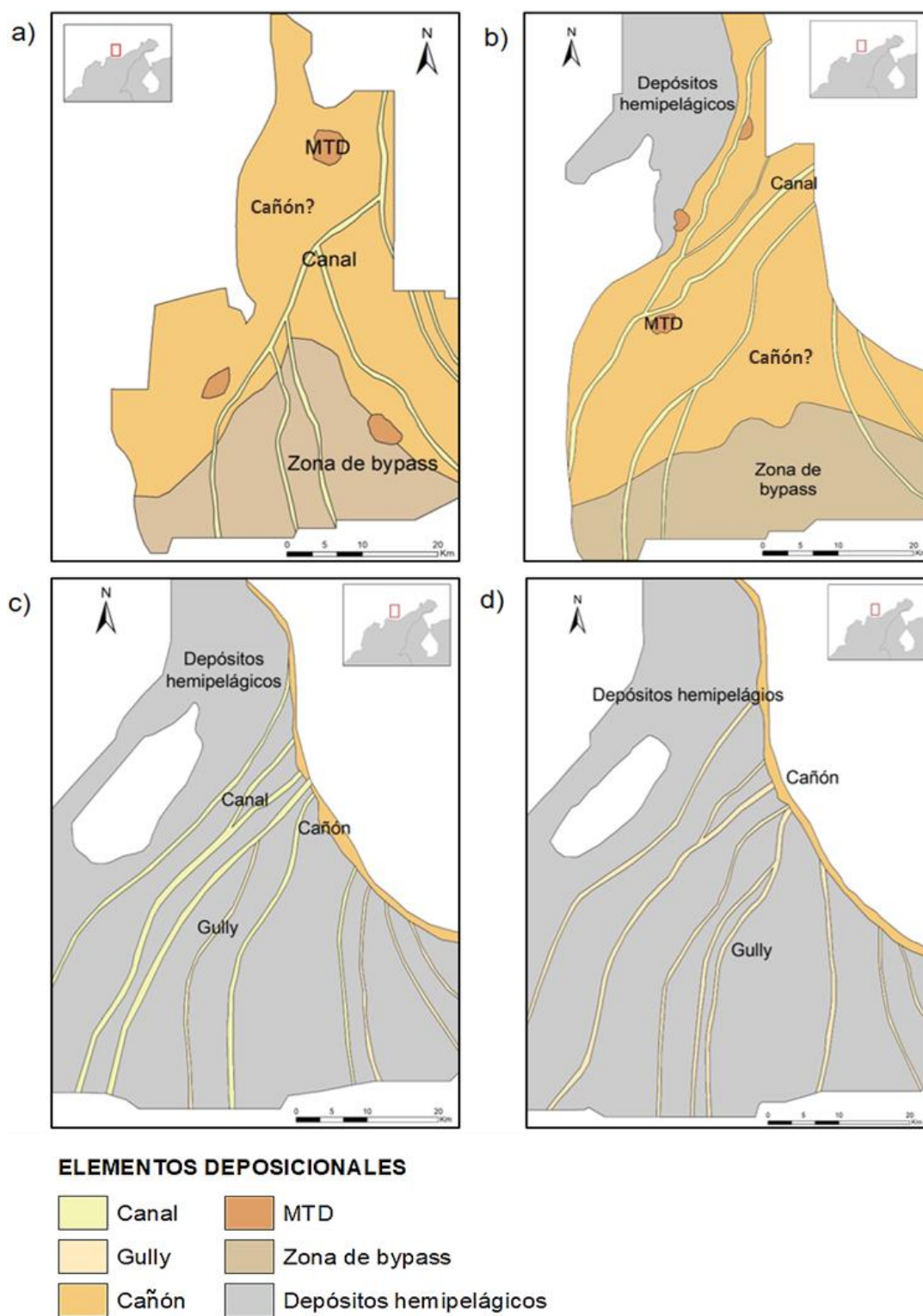


Figura 18. Elementos deposicionales interpretados en cada una de las secuencias analizadas. a) mapa de la secuencia A. b) Mapa de la secuencia B. c) Mapa de la secuencia C. d) Mapa de la secuencia D.

## 6. Conclusiones

- El amarre sísmica-pozo permitió correlacionar los marcadores bioestratigráficos del pozo ubicado al SE a 2 km aproximadamente del cubo sísmico con reflectores de alta amplitud. A partir de esto se definió que el intervalo de estudio está limitado entre el fondo marino actual y la discontinuidad que corresponde a la base del Plioceno.
- Estratigráficamente el intervalo estudiado se correlaciona con las Formación Castilletes y los depósitos Cuaternarios.
- En el intervalo definido se identificaron cuatro secuencias tectonoestratigráficas (A, B C y D) delimitadas por reflectores de alta amplitud que constituyen discontinuidades locales.
- Los mapas isópacos muestran que el mayor espesor en todas las secuencias se encuentra al sureste de la zona de estudio, mientras que el menor espesor se presenta hacia el tope del paleoalto, en donde debido a la deformación causado por el levantamiento progresivo los reflectores se solapan.
- A partir del análisis de la morfología de las superficies, extracción de atributos sísmicos e interpretación de facies, se identificaron en las secuencias analizadas diferentes elementos deposicionales como paleocanales, gullies, MTD's, depósitos hemipelágicos, un posible antiguo cañón y uno actual, que permitieron establecer dos sistemas deposicionales para este intervalo. Para las secuencias A y B se definió un sistema marino profundo, posiblemente talud superior-medio, mientras que las secuencias C y D se depositaron en un sistema marino somero clástico, que varía entre talud superior y plataforma externa. Lo

cual podría indicar que hubo cambio brusco en la energía de deposición entre los sedimentos de las secuencias B y C.

## 7. Recomendaciones

- Interpretar y analizar las facies utilizando métodos como la clasificación de facies jerárquico (multiatributo), el cual utiliza varios volúmenes de atributos sísmicos 3D como entrada y genera un solo volumen facies sísmicas 3D (Paradigm Company, 2007) o el método de redes neuronales también conocido como método de inteligencia artificial, el cual busca patrones recurrentes, agrupando el comportamiento de la traza sísmica, asignándoles una clase y un color (Asencio & Bowen, 2009), con el propósito de correlacionar las facies sísmicas con la estratigrafía de la zona.
- Realizar una correlación tectonoestratigráfica utilizando los pozos más cercanos al área de estudio con el fin de establecer de manera más precisa el carácter sedimentológico, petrofísico y geoquímico las facies identificadas y asociadas a los diferentes elementos deposicionales.
- Calcular otros atributos sísmicos en las diferentes superficies como descomposición espectral con el fin de definir y limitar aún mejor los elementos deposicionales y evidenciar otros rasgos geológicos que no sean claros a simple vista.

### Referencias Bibliográficas

- Aarre, V., & Astratti, D. (2012). Detección sísmica de fallas y fracturas sutiles. *Oilfield Review Schlumberger*, 24, 30-45.
- Arnott, W. R. (2010). Deep-marine sediments and sedimentary systems. En R. Dalrymple, & N. James, *Facies Model 4* (págs. 295-297). Ottawa: Geological Association of Canadá.
- Asencio, H., & Bowen, A. (2009). *Inteligencia artificial, redes neuronales y aplicaciones*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Audemard, F. (1996). Paleoseismicity studies on the Oca-Ancón fault system, northwestern Venezuela. *Tectonophysics*, 259, 67-80.
- Badley, M. E. (1985). *Practical Seismic Interpretation*.
- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., & Martínez, J. (2007). *Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a New Proposal*. Agencia Nacional de Hidrocarburos - ANH. Bogotá, Colombia: ANH and B&M Exploration Ltda.
- Bishop, M. S. (1960). *Surface mapping*. John Wiley. New York.
- Cadena, A., Romero, G., & Slatt, R. (2015). Application of Stratigraphic Grade Concepts to Understand Basin-fill Processes and Deposits in an Active Margin Setting, Magdalena Submarine Fan and Associated Fold-and-Thrust Belts, Offshore Colombia. (e. C. Bartolini and P. Mann, Ed.) *Petroleum geology and potential of the Colombian Caribbean Margin, AAPG Memoir 108*, págs. 323-344.
- Catuneanu, O. (2006). *Principles of Sequence Stratigraphy*. Alberta, Canadá: Elsevier B.V.

- Cediel, M., Almanza, O., & Montes, L. (2012). Análisis AVO en el yacimiento de alta impedancia del Campo Chuchupa. *Boletín de Geología*, 34(2), 139-148.
- Cerón et al. (2009). *Oportunidades Exploratorias en la Cuenca Guajira Costa Adentro*. ANH.
- Ceron, J. (2008). *Crustal Structure of the Colombian Caribbean Basin and Margins*. Tesis de Doctorado, University of South Carolina, Carolina del Sur.
- Covault, J. A. (2011). Submarine Fans and Canyon-Channel Systems: una revisión de procesos, productos y modelos. *Nature Education Knowledge*, 3.
- Duff, P. M., & Holmes, A. (1993). *Holmes' principles of physical geology*. Londres : Chapman & Hall.
- Escalante, C. (2006). *Seismic Stratigraphy of the Tayrona Depression-Offshore Baja Guajira Basin, Colombia*. Bogotá: ECOPETROL.
- García, M., Cruz, L., Mier, R., Vasquez, M., Jiménez, M., & Moreno, M. (2008). *Evolución Térmica de la subcuenca de la baja Guajira*. Grupo de Investigación en Geología de Hidrocarburos y Carbones.
- Herrera, C., & Díaz, C. (marzo de 2018). Evaluación geológica, geotécnica y ambiental de los fenómenos de volcanismo de lodos en la Costa Caribe Colombiana. *Scientia Et Technica*, 23(1), 104.
- Leslie, S. C., Mann, P., & Carvajal, L. C. (2015). Structure and petroleum potential of the south Caribbean deformed belt and Tayrona Basin, offshore northern Colombia. *Annual Meeting - American Association of Petroleum Geologists*, 2015.
- López, E. (2005). *Evolución tectónica de la región Caribe de Colombia*. Bogotá: INGEOMINAS.
- M. Turhan Taner. (1992). *Rock Solid*. Recuperado el 1 de febrero de 2018, de Attributes revisited: <http://www.rocksolidimages.com/attributes-revisited/>

- Mitchum, (1977). Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level Part 11: Glossary of terms used in seismic stratigraphy. *Seismic stratigraphy - Applications to Hydrocarbon Exploration: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 26*, 205-212.
- Nelson, H., Escutia, C., Damuth, J., & Twichell, D. (2011). Interplay of mass-transport and turbidite-system deposits in different active tectonic and passive continental margin settings: external and local controlling factors. *SEPM Special Publication No. 96*, 39-66.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy* (2 ed.). Nueva York: Wiley-Blackwell.
- Nielsen, G., & Sylvester, J. (1999). Strike Slip Faulting. The Leading Edge, Tulsa Ok.
- Normark, W. R., & Carlson, P. R. (2003). Giant submarine canyons: Is size any clue to their importance in the rock record? *Geological Society of America Special Paper*, 370, 175-190.
- Paradigm Company. (2007). Análisis de Atributos de Facies Sísmicas y de Atributos Sísmicos, como Valor Agregado a la Interpretación Sísmica.
- Pereira, Azevedo, L., Pinheiro, R., & Abbassi, H. (2009). *Seismic Attributes in Hydrocarbon Reservoirs Characterization*. Oporto, Portugal: Portugal Universidad de Aveiro Geosciences.
- Prelat, A., Pankhaina, S., & Hodgson, D. (2015). Slope gradient and lithology as controls on the initiation of submarine slope gullies; Insights from the North Carnarvon Basin, Offshore NW Australia. 12-17.
- Pulido, O., Castro, E., Lopez, G., & Cristancho, J. (1991). *Compilación y análisis de la información de la Subcuenca de la Baja Guajira*. Informe interno ECOPETROL.
- Ramirez, V. (2006). Geological Setting and Hydrocarbon Occurrences, Guajira Basin, Offshore Northern Colombia. AAPG.

- Rangel, N. (2008). *Evolución histórica y geomorfología de la línea de costa adyacente a la Sierra Nevada de Santa Marta entre el Cabo San Juan de Guía y el Río Cañas*. Tesis de Maestría, Universidad EAFIT, Medellín.
- Rangel-Buitrago, N., & Idárraga-García, J. (2010). Geología General, Morfología Submarina y Facies Sedimentarias en el Margen Continental y los Fondos Oceánicos del Mar Caribe Colombiano. En INVEMAR, *Biodiversidad del Margen Continental del Caribe Colombiano* (págs. 34-40). Serie de Publicaciones Especiales, Invemar.
- Renz, O. (1960). Geología de la parte sureste de la Península de La Guajira (República de Colombia). *Memorias del III Congreso Geológico Venezolano: Boletín Geológico*, 3:317-346.
- Restrepo, J., & Ordoñez, O. (2009). Terrenos, Complejos y Provincias en la Cordillera Central de Colombia. 49-56.
- Rollins, J. (1960). *Stratigraphy and structure of the Guajira Peninsula, northwestern Venezuela and northeastern Colombia*. Tesis Ph.D, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska.
- Rubio, R., Ramírez, V., Rubiano J, Garnica, M., Moreno, N., & Mantilla, M. (1998). *Evaluación regional, Cuenca de la Baja Guajira*. Interno ECOPETROL.
- Sangree, J., & Windmier, J. (1977). Seismic Interpretation of Clastic Depositional Facies. (P. C, Ed.) *Seismic Stratigraphy - Applications to Hydrocarbon Exploration*, 165-184.
- Selly, R. (1996). *Ancient Sedimentary Environments and Their Subsurface Diagnosis* (4 ed.). Springer US.
- Shepard, F. (1973). Sea floor of Magdalena delta and Santa Marta area, Colombia. *Geological Society of America*, 84.
- Sheriff. (1997). *Seismic Resolution a Key Element*. AAPG.
- Sheriff, R. E. (2002). *Encyclopedic dictionary of applied geophysics* (13 ed.). Society of Exploration Geophysicists, SEG .

- Tabares, N., Soltau, J., Díaz, J., & Landazabal, E. (2009). Características Geomorfológicas del Relieve Submarino en el Caribe colombiano. En Dimar-Cioh, *Geografía Submarina del Caribe colombiano* (Vol. 4, págs. 61-116). Cartagena de Indias, Colombia: Dirección General Marítima-Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe.
- Vernette, G., Mauffret, A., Bobier, C., Briceno, L., & Gayet, J. (1992). Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian Margin. *Tectonophysics*, 202, 335-349.
- Vernette, G; Mauffret, A; Bobier, C; Briceno, L; Gayet, J;. (1992). Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian Margin. *Tectonophysics*, 202, 335-349.
- Weimer, P. (2004). Deepwater Reservoir Elements: Channels and their Sedimentary Fill. Petroleum Systems of Deepwater Settings. En P. Weimer, & R. Slatt, *Petroleum Systems of Deepwater Settings* (págs. 4-15). Tulsa, USA: Society of Exploration Geophysicists .