



**Análisis de atributos sísmicos para identificación de geoformas y ambientes
de depositación: Caso de estudio Caribe Colombiano**

MARCELO AMADO CALDERON NIEVES

Universidad de Pamplona
Facultad de Ciencias Básicas
Departamento de Física y Geología
Programa de Geología
18 de Junio 2018.

**Análisis de atributos sísmicos para identificación de geoformas y ambientes
de depositación: Caso de estudio Caribe Colombiano**

MARCELO AMADO CALDERON NIEVES

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:
GEÓLOGO

Director:

Ph.D Francisco Cabrera Zambrano

Codirector:

Ph.D Flor Alba Vivas

Universidad de Pamplona

Facultad de Ciencias Básicas

Departamento de Física y Geología

Programa de Geología

18 de Junio 2018.

Resumen

El objetivo principal de este trabajo consistió en investigar los atributos y parámetros más eficaces para lograr una mejor interpretación en los datos sísmicos, identificación de superficies, geofomas y ambientes, a partir de la revisión bibliográfica, metodologías propuesta por diversos trabajos y mediante la consulta a los expertos. Se partió de los datos obtenidos en el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) y utilizando el software libre Opendtect.

Se realizó una comparación entre los datos picados en la sísmica y la batimetría, se notó una mejor resolución en la sísmica. También se buscaron imágenes de radar, para realizar la comparación en el paleohorizonte H1, pero las imágenes de radar no resultaron eficientes para el propósito de la investigación.

Se analizó en la bibliografía recolectada sobre atributos sísmicos y en el software Opendtect se revisaron los atributos que contiene este programa, se probaron 25 atributos en los datos sísmicos obtenidos del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), se seleccionaron los atributos pertinentes para esta investigación.

Se realizaron identificaciones previas en los datos sísmicos para poder hacer una comparación con las identificaciones realizadas en los datos ya procesados con atributos sísmicos y se notan una mejoría en la identificación post procesado, también se resalta la identificación de anomalías estructurales y estratigráfica en los datos sísmicos.

*Marcelo A. Calderon Nieves
Universidad de Pamplona
Junio 2018*

Abstract

The main objective of this research work was to investigate the most effective attributes and parameters in order to reach a better interpretation in the seismic data, identification of surfaces, geofoms and environments, starting with the bibliographic review of methodologies proposed by different investigators and by consulting the experts. It was based on data obtained from the Colombian Petroleum Institute (ICP) and using the free software Opendtect.

A comparison bewteen chopped data in the seismic and the barimetry was done, and it showed a better resolution in the seismic. Also, it looked radar images for the purpose of do a comparision in the palehorizon H1, but these radar images weren't efficient for the goal of the investigation.

Seismic attributes' bibliography collected was analized; in Opendtect software the attributes contained on it were reviewed and 25 attributes were tested in the seismic data obtained from the Colombian Petroleum Institute (ICP), the relevant attributes were selected for this investigation.

Previous identifications in the seismic data were done in order to compare them in data already processed with seismic attributes. An improvement in post-processed identification is noticed and the identification of structural and stratigraphic anomalies in the seismic data is also highlighted.

Marcelo A. Calderon Nieves
University of Pamplona
June 2018

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	1
1 Objetivos	2
1.1 Objetivo General.....	2
1.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Planteamiento del problema.....	3
2 Justificación	4
3 Antecedentes	5
4 Marco Conceptual.....	6
4.1 Marco Contextual	6
4.2 Marco Teórico.....	7
4.2.1 Estratigrafía de secuencias.....	7
4.2.1.1 <i>Historia de la estratigrafía de secuencia</i>	8
4.2.1.2 <i>Conceptos básicos</i>	10
4.2.1.3 <i>Ambientes depositacionales</i>	16
4.2.1.4 <i>Ley de Walther</i>	20
4.2.2 Atributos sísmicos	23
4.2.2.1 <i>Energía</i>	26
4.2.2.2 <i>Filtro de frecuencia</i>	27
4.2.2.3 <i>Instantáneo</i>	28
4.2.2.4 <i>Similitud</i>	29
4.2.2.5 <i>Descomposición Espectral</i>	31
4.2.3 Zona de estudio, Cuenca Guajira costa afuera.....	32
4.2.3.1 <i>Geología Regional</i>	32
4.2.3.2 <i>Tectónica del caribe</i>	33
4.2.3.3 <i>Estratigrafía</i>	35
5 Metodología	41

5.1	Selección de área de estudio y recopilación de datos	41
5.2	Interpretación del fondo oceánico y validación con batimetría	42
5.3	Verificación de imágenes de radar en la zona	42
5.4	Interpretación de paleohorizontes	43
5.5	Implementación de atributos	44
5.5.1	Paleohorizonte H3	44
5.5.2	Paleohorizonte H4	45
5.6	Interpretación de paleohorizontes en atributos	47
6	Resultados y Discusión.....	48
6.1	Fondo oceánico o H1	48
6.2	Paleohorizontes H2 y H5	49
6.3	Paleohorizontes en atributos sísmicos	52
6.3.1	Paleohorizonte H3	52
6.3.1.1	<i>Superficie identificada en el atributo de energía.....</i>	<i>52</i>
6.3.1.2	<i>Superficie identificada en el atributo de descomposición espectral..</i>	<i>54</i>
6.3.1.3	<i>Superficie identificada en el atributo instantáneo de amplitud</i>	<i>55</i>
6.3.2	Paleohorizonte H4	56
6.3.2.1	<i>Superficie identificada en el atributo de filtro de frecuencia</i>	<i>56</i>
6.3.2.2	<i>Superficie identificada en el atributo de instantáneo de Hilbert</i>	<i>58</i>
6.4	Ambiente depositacional.....	60
6.5	Atributo de similaridad	60
7	Conclusiones	62
8	Recomendaciones	63
9	Referencias Bibliográficas	64
10	Referencias electrónicas.....	68

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio. Fuente: Tomado de ICP 2009; ANH 2010; IGAC 2012; SGC 2015.	6
Figura 2. Flujograma de las diferentes aplicaciones y componentes de la estratigrafía de secuencia. Fuente: modificado de (Catuneanu, 2006).	8
Figura 3. Definiciones de la estratigrafía de secuencia en un sentido simple y cómo evolucionan en el transcurso del tiempo. Fuente: modificado de (Catuneanu, 2006).	10
Figura 4. Definición de los términos empleados para caracterizar cuencas en las diferentes escalas de observación y se presentan en el siguiente orden, sistemas de depositación, trectos de sistemas y secuencia. Fuente: modificado de Catuneanu (2006, p. 9).	11
Figura 5. Definición de los términos usado para caracterizar a detalle los sistemas de depositación y se presentan en orden jerárquico, facies, asociaciones de facies y modelos de facies. Fuente: modificado de Catuneanu (2006, p. 19)	12
Figura 6. Clasificación general de los ambientes depositacionales, los cuales se encuentran en 3 grandes grupos, continentales, costeros (o transicional) y marinos. Fuente: modificado de (Catuneanu, 2006).	17
<i>Figura 7.</i> Ilustración de los diferentes ambientes de depositación, resaltando los ambientes costeros donde la dirección del mar y del río son un agente importante y se refleja su movimiento en dos grandes flechas (R-regresivo; T-transgresivo); lo cual provoca la formación de deltas y prodeltas o estuarios. Fuente: modificado de (Catuneanu, 2006).	19
Figura 8. Perfil tomado de la Figura 7, donde se ilustra los tres principales ambientes de depositación y subambientes en donde ocurre la depositación. Fuente: modificado de (Catuneanu, 2006).	19
<i>Figura 9.</i> Modelo de eventos de secuencias en el cual se definen los límites de secuencia, los intervalos de cada tracto en función de los eventos depositacionales y los cuatro tractos de sistema, abreviados así: LST(lowstand systems tract)- tractos de sistemas de soporte bajo; TST (transgressive systems tract)-tractos de sistemas transgresivos; HST (highstand systems tract) - tractos de sistemas de soporte alto; FSST (falling stage systems tract)- tractos de sistemas de etapa descendente; RST (regressive systems tract)- tractos de sistemas regresivos.; T-R (transgressive-regressive)-transgresivo-regresivo; donde se resaltan los LST tardío que generan cuñas, Los LST temprano y HST tardío que generan abanicos. Fuente: modificado de (Catuneanu, 2006).	20
Figura 10. Evolución de la definición de la ley de Walther a través del tiempo. Fuente: modificado de (Catuneanu, 2006).	21
Figura 11. Comparación de resultados al interpretar datos de facies en estratigrafía de secuencia frente a litoestratigráficos. 1. Caracterización de facies y reconstrucción de paleo ambientes. 2. Correlación entre perfiles verticales, siendo las facies buenos marcadores crono estratigráficos, con la excepción de la superficie transgresiva ya que es poco diacrónica. 3. Interpretación de los datos anteriores desde el punto de vista de la estratigrafía de secuencia, códigos de facies: sistema de meandro; Sistema trenzado B; Complejo de boca del estuario C; estuario central D; Planicie de delta E; delta frontal superior F; delta frontal o prodelta G. 4. Interpretación de los datos anteriores desde el punto de vista litoestratigráficos, A-una unidad dominada por arenisca; B y C - unidades dominadas por mudstone, con intersticios limosos y arenosos. Fuente: modificado de (Catuneanu, 2006).	23
Figura 12. Creación y desarrollo de los atributos sísmicos a través del tiempo. Fuente: Modificado de (Chopra & Marfurt, 2007).	25

<i>Figura 13.</i> Aplicación del atributo sísmico de energía. A. sección sísmica sin ningún tipo de atributo sísmico. B. En la sección se resalta la zona amarilla como la zona de mayor energía o amplitud. Fuente: Modificado de (DGB, 2002).....	26
<i>Figura 14.</i> A. Datos sísmicos B. Aplicación del atributo filtro de frecuencia con TRF de baja frecuencia 20 Hz. Fuente: Autor.	28
<i>Figura 15.</i> Aplicación del atributo similitud, resaltando la estructura de fallas: (a) Sísmica filtrada dirigida por inmersión, (b) Similitud mínima no dirigida, (c) Similitud mínima dirigida. La similitud mínima orientada (c) destaca las definiciones de fallas precisas en comparación con el resultado de la similitud mínima no guiada (b). Fuente: Modificado de (DGB, 2002).....	30
<i>Figura 16.</i> A) Marco Tectónico actual del norte de Suramérica y el Caribe, indicando las placas tectónicas presentes y los principales rasgos tectónicos formados por la interacción de estas placas. B) Localización de las áreas de trabajo con los principales rasgos estructurales, y geográficos, Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), Serranía de Perijá (SP) y Península de la Guajira (PG) C) Comparacion de las declinaciones características jurásicas reportadas para la SNSM (Bayona <i>et al.</i> , 2010), Este de la SP (Gose, Perarnau, & Castillo, 2003). Fuente: Tomado de (Nova <i>et al.</i> , 2012).	33
<i>Figura 17.</i> Marco estructural de la zona de sur y centro américa, la zona se encuentra caracterizada por las placas Suramericana, Norteamérica, Cocos, Nazca y Caribe; también por estructuras de gran tamaño como las Fallas de Oca, Bucaramanga-Santa Marta, Bocono y Cuiza, también se presentan los Arcos Volcánicos de Antillas menores y Centroamericano. Fuente: Modificado de (Correa, 2012).....	34
<i>Figura 18.</i> Localización del cubo sísmico, se hace referencia a la geología de la zona con el mapa geológico del 2015 del SGC. Fuente: Modificado de (ANH, 2010)	36
<i>Figura 19.</i> Secuencia estratigráfica de la sub-cuenca alta Guajira. Fuente: Modificado de (ANH, 2011).	39
<i>Figura 20.</i> Secuencia estratigráfica de la sub-cuenca baja Guajira. Fuente: Modificado de Modificado de (ANH, 2011).	40
<i>Figura 21.</i> Flujograma del trabajo de grado. Fuente: Autor.	41
<i>Figura 22.</i> A. Resolución en la batimetría del fondo oceánico. B. Resolución del picado del fondo oceánico o H1. Fuente: Autor.....	42
<i>Figura 23.</i> A. Imagen radar del satélite Sentinel1. B. Imagen radar del satélite Alos Palsar. Fuente: Alaska Satellite Facility.....	43
<i>Figura 24.</i> A. Identificación y picado de Paleohorizontes H2. B. Identificación y picado de Paleohorizontes H5. Fuente: Autor.	43
<i>Figura 25.</i> Resultado de la aplicación del atributo de energía, donde se resaltan dos paquetes de roca dura. Fuente: Autor.....	44
<i>Figura 26.</i> Resultado de la aplicación del atributo descomposición espectral a 20hz. Fuente: Autor...	45
<i>Figura 27.</i> Resultados de la aplicación del atributo instantáneo de amplitud. Fuente: Autor.....	45
<i>Figura 28.</i> A. Calidad de la sísmica sin ningún atributo. B. Calidad de la sísmica aplicando el atributo de filtro de frecuencia. Fuente: Autor.....	46
<i>Figura 29.</i> A. Calidad de la sísmica sin ningún atributo. B. Calidad de la sísmica aplicando el atributo de instantáneo de Hilbert. Fuente: Autor.....	46
<i>Figura 30.</i> Comparación entre los 5 resultados de los atributos. A. Energía. B. Descomposición espectral. C. Instantáneo de amplitud. D. Filtro de Frecuencia. E. Instantáneo de Hilbert. Fuente: Autor. ...	46
<i>Figura 31.</i> Comparación de las ubicaciones de los horizontes H1, paleohorizontes H2 y H5. También la ubicación de los paleohorizontes H3 con el atributo instantáneo de amplitud y Paleohorizonte H4 con el atributo instantáneo de Hilbert. Fuente: Autor.....	47
<i>Figura 32.</i> Superficie del fondo oceánico o H1. Fuente: Autor.....	48
<i>Figura 33.</i> Geformas identificadas en la superficie del fondo oceánico o H1. Fuente: Autor.	49
<i>Figura 34.</i> Superficie del paleohorizonte H2. Fuente: Autor.	50

Figura 35. Superficie del paleohorizonte H5. Fuente: Autor.	50
Figura 36. Geoformas identificadas en la superficie H2. Fuente: Autor.	51
Figura 37. Geoformas identificadas en la superficie H5. Fuente: Autor.	52
Figura 38. Superficie del paleohorizonte “S.E.” identificado en el atributo de energía. Fuente: Autor.	53
Figura 39. Geoformas identificadas en la superficie “S.E.”. Fuente: Autor.	53
Figura 40. Superficie del paleohorizonte “S.D.E.20Hz” identificado en el atributo de descomposición espectral. Fuente: Autor.	54
Figura 41. Geoformas identificadas en la superficie “S.D.E.20Hz”. Fuente: Autor.	55
Figura 42. Superficie del paleohorizonte “S.I.AMPL” identificado en el atributo instantáneo de amplitud. Fuente: Autor.	55
Figura 43. Geoformas identificadas en la superficie “S.I.AMPL”. Fuente: Autor.	56
Figura 44. Superficie del paleohorizonte “S.F.F.B.” identificado en el atributo de filtro de frecuencia. Fuente: Autor.	57
Figura 45. Geoformas identificadas en la superficie “S.F.F.B.”. Fuente: Autor.	58
Figura 46. Superficie del paleohorizonte “S.I.HILBERT” identificado en el atributo instantáneo de Hilbert. Fuente: Autor.	59
Figura 47. Geoformas identificadas en la superficie “S.I.HILBERT”. Fuente: Autor.	60
Figura 48. En las dos imágenes se resalta con la letra D la discontinuidad presente. A. Datos de sísmica original. B. Datos con el atributo de similaridad aplicado. Fuente: Autor.	61

Introducción

El estudio de los atributos sísmicos se ha abordado de diferentes maneras por la comunidad científica. Desde la década de los 70 se tiene información de los primeros avances para tratamientos de datos sísmicos 2D, en este tiempo se quería tener conocimiento de cómo ayudarían en el descubrimiento de nuevos pozos petroleros. En la década de los 70-80 surgieron los primeros datos sísmicos 3D los cuales ofrecían una mejor interpretación y un mayor porcentaje de éxito para encontrar nuevos pozos, pero fue hasta la década de los 90 que se presentaron los primeros atributos 3D los cuales ayudaron en una fácil interpretación de la variación estructural y estratigráfica.

En la presente investigación se aborda el tema de los atributos sísmicos para la identificación de geoformas y ambientes depositacionales empleando el software libre de interpretación Opendtect, donde se parte del análisis de los datos sísmicos obtenidos por parte del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), en el marco del convenio entre la Universidad de Pamplona, Ecopetrol y Colciencias del año 2014.

Se realizó un análisis de las diferentes resoluciones entre picado en datos sísmicos, batimetría e imágenes de radar, se analizaron todos los atributos de Opendtect para identificar cuál de estos es pertinente para la investigación y se realizaron identificación de superficies antes y después de implementar los atributos.

Se identificaron geoformas según la metodología usada en trabajos anteriores realizados en esta área de investigación, para la caracterización de los ambientes de depositación se utilizó la metodología de Catuneanu (2006).

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Identificar geoformas marinas mediante el uso de atributos sísmicos para describir los ambientes depositacionales en la cuenca Guajira offshore.

1.2 Objetivos Específicos

- Aplicar los conceptos de estratigrafía de secuencias para interpretar en el cubo sísmico las superficies estratigráficas delimitadoras (conformables o discordantes) que marcan cambios en el régimen de sedimentación.
- Analizar los atributos sísmicos aplicables para la identificación de las geoformas.
- Aplicar los atributos sísmicos seleccionados para la identificación de geoformas en un cubo sísmico
- Definir ambientes depositacionales de la zona de estudio a partir de las geoformas identificadas.

1.3 Planteamiento del problema

Los ambientes de depositación son ubicaciones geográficas donde se acumulan sedimentos, cada ubicación se caracteriza por una combinación de procesos geológicos (sedimentarios) y condiciones ambientales (físicas, biológicas y químicas); estos ambientes se agrupan en 3 categorías: Continental, transicional y marino.

Actualmente la cuenca Caribe costa afuera (offshore) en Colombia tiene una alta relevancia económica, dada por los más recientes descubrimientos de gas en aguas profundas y la producción histórica de gas en áreas costeras. Existe un interés por parte de la comunidad científica de conocer el rol de los flujos de turbidez, su distribución y localización en los diferentes periodos de depositación.

La estratigrafía de secuencias es una aproximación para entender la evolución del sistema depositacional a través del tiempo, debido a que se tienen presente conceptos de sedimentología, estratigrafía, geomorfología, geoquímica, análisis de cuencas y sísmica, donde se correlaciona el sistema sedimentario en una sección sísmica vertical (estratigrafía) con la vista en planta (geomorfología) obtenida de horizontes.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente surgen las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Qué Atributos sísmicos ayudan en la identificación de geoformas?
- ¿Qué ambientes de depositación generaron las geoformas encontradas en el área de estudio seleccionada: Cuenca Guajira offshore?

2 Justificación

El desarrollo de la tecnología en el área de la geofísica ha tenido avances importantes en los últimos años, dando como resultado mejoramientos en la resolución sísmica, así como también un relevante desarrollo en las herramientas de interpretación, entre otros.

En Colombia se ha incrementado la exploración de hidrocarburos usando la sísmica costa afuera (offshore), generando un elevado número de datos (cubo sísmico) y mejorando la resolución de la misma; lo cual se puede utilizar para realizar otros estudios y entender mejor la geodinámica de estos sistemas.

Con los datos actuales se pueden adquirir conocimientos nuevos como el que se propone en este proyecto, donde se estudia el modelamiento geomorfológico de la cuenca Guajira offshore. Este sería un primer paso para entender cómo funcionan los agentes moldeadores en el área de estudio y así mismo generar un modelo del fondo marino en la zona de estudio.

Esta investigación desde una óptica académica aportaría en un mejor entendimiento de las geoformas marinas, su identificación mediante la aplicación de los atributos sísmicos y así mismo obtener un mejor entendimiento de la dinámica de la zona de estudio.

3 Antecedentes

En la actualidad se cuentan principalmente con dos estudios; el primero a nivel internacional, es el de los geocientíficos Kramer y Shedd (2017); cuyo objetivo principal de su trabajo fue realizar un nuevo mapa batimétrico de una área aproximada de 350.000 km² del golfo de México; donde se integran los levantamientos sísmicos realizados desde comienzos de la década de los noventa hasta la actualidad; y así obtener una morfología detallada del fondo marino donde se destacan los cuerpos salinos

El segundo, a nivel nacional se tiene el estudio realizado por el Instituto de investigaciones marinas y costeras por parte de los geocientíficos Morales *et al.* (2017); Cuyo objetivo principal de su trabajo fue realizar un mapa geomorfológico marino donde se analizó la relevancia de estas geoformas para que se puedan desarrollar hábitat marinos

4 Marco Conceptual

4.1 Marco Contextual

La Zona de estudio está localizada en la cuenca costa afuera de la Guajira, en el sistema de grillas o planchas del Instituto Agustín Codazzi (IGAC) se localiza en las planchas 227MAR, 228MAR y 4, geográficamente la zona se encuentra al norte de la sierra nevada, al noroeste de la serranía del Perijá y al oeste de la península de la guajira ver Figura 1.

La sísmica fue suministrada por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), la capa de cuencas fue suministrado por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), las grillas fueron proporcionadas por el Instituto Agustín Codazzi (IGAC), la capa de geología suministrada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC).

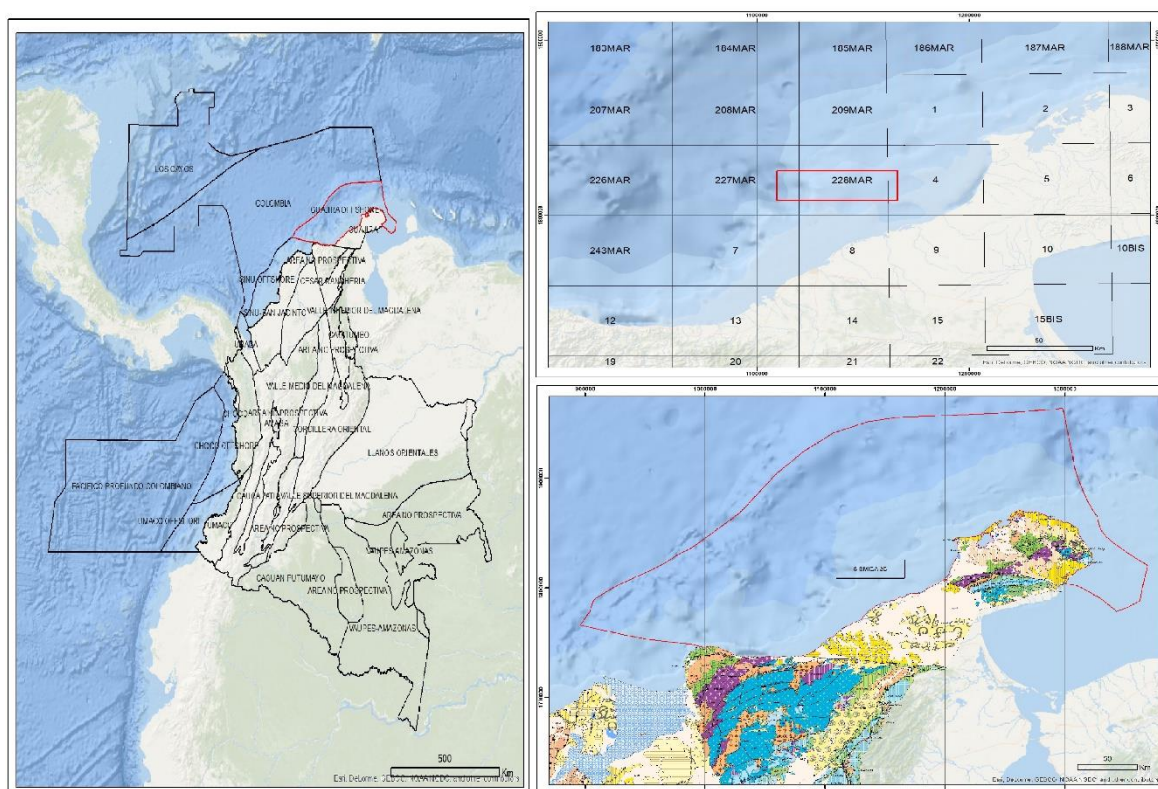


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio. Fuente: Tomado de ICP 2009; ANH 2010; IGAC 2012; SGC 2015.

4.2 Marco Teórico

4.2.1 Estratigrafía de secuencias

Las raíces de la estratigrafía de secuencias se remontan a los principios clásicos de la geología sedimentaria, que estableció las directrices fundamentales de los análisis sedimentológicos y estratigráficos. Estos 'primeros principios', como los mencionados por (Posamentier & Allen, 1999), establecen las reglas básicas para la física del flujo y movimiento de sedimentos, y los procesos de acumulación de sedimentos, derivación o erosión en relación con un equilibrio cambiante entre los cambios relativos del nivel del mar, el suministro de sedimentos y la energía de transporte. Estos principios aún representan el trasfondo científico de la estratigrafía de secuencias, que permite que los conceptos antiguos y modernos se combinen con una nueva forma en evolución de observar el registro de rocas sedimentarias (Catuneanu, 2006).

Por lo tanto, se reconoce que la estratigrafía de secuencias es un enfoque nuevo para el análisis de las sucesiones sedimentarias en lugar de un nuevo método por sí mismo. No se puede hacer suficiente hincapié en que un estudio estratigráfico de secuencias exitoso, requiere la integración de varios conjuntos de datos y métodos de análisis en un sistema interdisciplinario unificado (Figura 2). Esto no quiere decir que la estratigrafía de secuencias simplemente revende conceptos viejos en un nuevo paquete; de hecho, el enfoque estratigráfico de secuencias permite nuevos conocimientos sobre la génesis y la arquitectura de rellenos de cuencas sedimentarias, que no fueron posibles antes de la introducción del concepto de sísmica en la estratigrafía. Los problemas de formación de facies y previsibilidad en las cuencas de exploración de hidrocarburos tanto maduros como fronterizos son buenos ejemplos de los nuevos conocimientos que fueron posibles gracias al enfoque de la estratigrafía de secuencias, y que son altamente significativos tanto desde el punto de vista académico como económico (Posamentier & Allen, 1999).

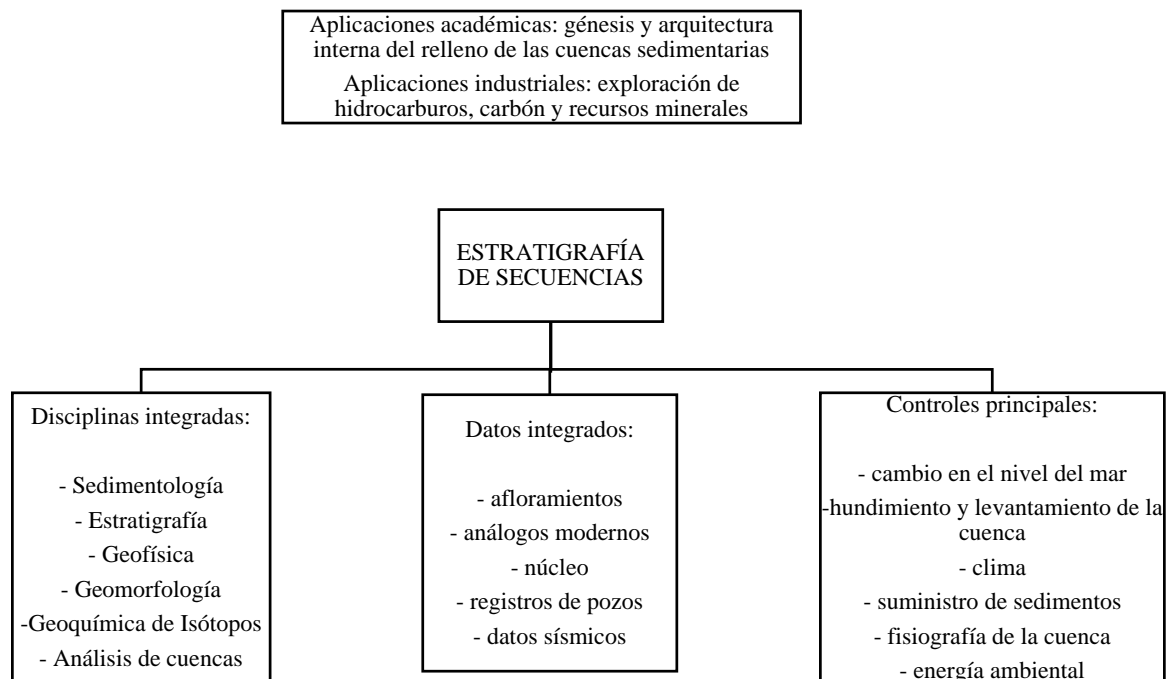


Figura 2. Flujoograma de las diferentes aplicaciones y componentes de la estratigrafía de secuencia.
Fuente: modificado de (Catuneanu, 2006).

4.2.1.1 Historia de la estratigrafía de secuencia

La estratigrafía de secuencias es la tercera, en una serie de revoluciones mayores en la geología sedimentaria (Miall, 1995). Cada una de estas dio como resultado un paradigma que cambió la forma en que los geocientíficos interpretaban los estratos sedimentarios. El primer avance fue marcado por el desarrollo de los conceptos y procesos asociados al régimen de flujo / respondiendo a los modelos de facies a finales de los 50 y finales de los 60 (Harms & Fahnestock, 1965), (Simons *et al.*, 1965). Esta primera revolución proporcionó una teoría unificada para explicar, desde una perspectiva hidrodinámica, la génesis de las estructuras sedimentarias y sus asociaciones predecibles dentro del contexto de los sistemas de depositación. A partir de los años 60, la incorporación de la tectónica de placas y los conceptos geodinámicos en el análisis de procesos sedimentarios a escalas regionales marcó la segunda revolución en la geología sedimentaria (Posamentier *et al.*, 1988).

En última instancia, estos dos primeros descubrimientos conceptuales o revoluciones llevaron al desarrollo del Análisis de Cuenca a finales de los años setenta, que proporcionó el

marco científico para el estudio de los orígenes y las historias de las cuencas sedimentarias. La estratigrafía de secuencias marca la tercera y más reciente revolución en la geología sedimentaria, comenzando a finales de los 70 con la publicación de AAPG Memoir 26. La estratigrafía de secuencias se desarrolló como un método interdisciplinario que mezcló procesos tanto autogénicos (dentro del sistema) como alogénicos (fuera del sistema) en un modelo unificado para explicar la evolución y la arquitectura estratigráfica de las cuencas sedimentarias (Miall, 1995). La definición de la estratigrafía de secuencia ha variado a lo largo de los años desde su primera definición en 1988 por Posamentier (Figura 3) (Payton, 1977).

El éxito y la popularidad de la estratigrafía de secuencias se debe a su amplia aplicación en las cuencas de exploración de hidrocarburos maduras y áreas de fronteras, donde se pueden formular predicciones basadas en datos y modelos de cambios de facies laterales y verticales, respectivamente. Estos modelos predictivos han demostrado ser particularmente eficaces para reducir el riesgo de predicción de litología para la exploración de hidrocarburos, aunque existe una creciente demanda de emplear el método de estratigrafía de secuencias para la exploración de recursos minerales y de carbón (Catuneanu, 2006).

Estratigrafía de secuencia (Posamentier *et al.*, 1988; Wagoner, 1995): el estudio de las relaciones de roca dentro de un marco temporal-estratigráfico de estratos repetitivos, genéticamente relacionados, delimitados por superficies de erosión o no deposición, o sus conformidades correlativas.

Estratigrafía de secuencia (Galloway, 1989): el análisis de unidades depositacionales repetitivas relacionadas genéticamente limitadas en parte por superficies de no deposición o no erosión.

Estratigrafía de secuencia (Posamentier & Allen, 1999): el análisis de los patrones de sedimentación cíclica que están presentes en las sucesiones estratigráficas, ya que se desarrollan en respuesta a las variaciones en el suministro de sedimentos y el espacio disponible para que se acumule el sedimento.

Estratigrafía de secuencias (Embry, 2001^a): reconocimiento y correlación de superficies estratigráficas que representan cambios en las tendencias depositacionales en rocas sedimentarias. Tales cambios fueron generados por la interacción de la sedimentación, la erosión y el nivel de base oscilante y ahora están determinados por el análisis sedimentológico y las relaciones geométricas.

Figura 3. Definiciones de la estratigrafía de secuencia en un sentido simple y cómo evolucionan en el transcurso del tiempo. Fuente: modificado de (Catuneanu, 2006).

4.2.1.2 Conceptos básicos

Las raíces de la estratigrafía de secuencias se remontan a los principios clásicos de la geología sedimentaria, que estableció las directrices fundamentales de los análisis sedimentológicos y estratigráficos. Estos 'primeros principios', como los mencionados por (Posamentier & Allen, 1999), establecen las reglas básicas para la física del flujo y movimiento de sedimentos, y los procesos de acumulación de sedimentos, derivación y erosión en relación con un equilibrio cambiante entre los cambios relativos del nivel del mar; el suministro de sedimentos y la energía del agente de transporte (Figura 4). Estos principios aún representan el trasfondo científico de la estratigrafía de secuencias, que permite que los conceptos antiguos y modernos se combinen con una nueva forma en evolución de observar el registro de rocas sedimentarias, estos conceptos son: sistemas de depositación, trastos de sistemas, secuencia y facies (Catuneanu, 2006).

Un sistema de depositación es el producto de la sedimentación en un entorno depositacional particular; por lo tanto, incluye el ensamblaje tridimensional de estratos cuya geometría y facies conducen a la interpretación de un paleo-deposito específico. Los sistemas de depositación forman los bloques de construcción de los trastos de los sistemas, representando este último un concepto esencial para la correlación estratigráfica y la interpretación genética del relleno de la cuenca sedimentaria. El estudio de los sistemas depositacionales está íntimamente relacionado con los conceptos de facies, asociaciones de facies y modelos de facies, que se definen en la Figura 5 (Galloway, 1989).

El análisis de facies es un método esencial para la reconstrucción de paleo-depositos, así como para la comprensión de los cambios climáticos y el historial de hundimientos de las cuencas sedimentarias. La comprensión de las facies y sus asociaciones también es esencial para

la interpretación correcta de las superficies estratigráficas. El análisis de facies es por lo tanto un requisito previo para cualquier secuencia de estudios estratigráficos (Walker, 1992).

Sistemas de depositación (Galloway, 1989): Conjuntos tridimensionales de facies relacionadas con el proceso que registran los principales elementos paleogeomórficos.

Sistemas de depositación (Fisher & McGowen, 1967; Wagoner, 1995): Conjuntos tridimensionales de litofacies, genéticamente unidos por procesos activos (modernos) o procesos y entornos inferidos (antiguos).

- Los sistemas de depositación representan el producto sedimentario de los ambientes asociados. Se clasifican lateralmente en sistemas coetáneos, formando asociaciones lógicas de elementos paleogeomórficos (cf., tratos de sistemas).

Tratos de sistemas (System tracts) (Brown & Fisher, 1977): Un enlace de sistemas depositacionales contemporáneos, que forman la subdivisión de una secuencia.

- Los tratos de sistemas incluyen todos los estratos acumulados a lo largo de la cuenca durante una etapa particular de los desplazamientos costeros.
- Los tratos de los sistemas se interpretan en función de los patrones de apilamiento de los estratos, la posición dentro de la secuencia y los tipos de superficies delimitadoras. El tiempo de los tratos de los sistemas se infiere con relación a una curva que describe las fluctuaciones de nivel base en la línea costera.

Secuencia (Mitchum, 1977): Una sucesión relativamente conformable de estratos genéticamente relacionados delimitados por discordancias o sus conformidades correlativas.

- Las secuencias y los tratos de sistemas están delimitados por superficies estratigráficas claves, que significan eventos específicos en la historia depositacional de la cuenca. Tales superficies pueden ser conformables o discordantes, y marcar cambios en el régimen de sedimentación a través del límite.
- Las secuencias corresponden a ciclos estratigráficos completos de tendencias depositacionales cambiantes. El carácter conformable o discordante de las superficies límite no es un problema en el proceso de delineación de secuencia, ni el grado de conservación de la secuencia.

Figura 4. Definición de los términos empleados para caracterizar cuencas en las diferentes escalas de observación y se presentan en el siguiente orden, sistemas de depositación, tratos de sistemas y secuencia. Fuente: modificado de Catuneanu (2006, p. 9).

Facies (Bates & Jackson, 1987): El aspecto, la apariencia y las características de una unidad de roca, que generalmente reflejan las condiciones de su origen; esp. como diferenciar la unidad de unidades adyacentes o asociadas.

Facies (Wagoner, 1995; Walker, 1992): Una combinación particular de atributos litológicos, estructurales y texturales que definen características diferentes de otros cuerpos rocosos.

- Las facies están controladas por procesos sedimentarios que operan en áreas particulares de los ambientes depositacionales. Por lo tanto, la observación de facies ayuda con la interpretación de los procesos de syndepositional (evento que ocurre al mismo tiempo que la depositación)

Asociación de Facies (Collinson, 1969): Grupos de facies genéticamente relacionadas entre sí y que tienen cierta importancia ambiental.

- La comprensión de las asociaciones de facies es un elemento crítico para la reconstrucción de entornos paleo-depositacional. A su vez, tales reconstrucciones son una de las claves para la interpretación de las superficies estratigráficas de secuencia.

Modelo de Facies (Walker, 1992): Un resumen general de un sistema depositacional particular, que involucra muchos ejemplos individuales de sedimentos recientes y rocas antiguas.

- Un modelo de facies asume predictibilidad en la morfología y evolución de un entorno depositacional, deduciendo perfiles verticales "estándar" y cambios laterales de facies. Dada la variabilidad natural de los procesos alocíclicos y autocíclicos, una aplicación dogmática de esta idealización introduce un potencial de error en la interpretación.

Figura 5. Definición de los términos usado para caracterizar a detalle los sistemas de depositación y se presentan en orden jerárquico, facies, asociaciones de facies y modelos de facies. Fuente: modificado de Catuneanu (2006, p. 19)

Otros conceptos importantes en la estratigrafía de secuencia son:

4.2.1.2.1 Espacio de acomodación

Los procesos tectónicos y eustáticos se combinan para causar cambios relativos del nivel del mar, que controlan el espacio de acomodación disponible para los sedimentos, las condiciones que controlan la cantidad y los tipos de sedimentos depositados que llenan estas zonas, cuando el aporte de sedimento es menor que este se presenta una trasgresión, en cambio cuando el aporte de sedimento es mayor y se llena se presenta una regresión o si este es nulo los sedimentos se remueven y se trasportan a nuevas zonas (Mitchum, 1977).

4.2.1.2.2 Máxima superficie de inundación (maximum flooding surface, MFS)

Es la superficie de inundación marina que se forma con el evento de transgresión máxima. Constituye la cima del Tracto de sistemas transgresivos (transgressive systems tract, TST) y separa las parasecuencias de escalonamiento inferiores, de las progradacionales superiores., comúnmente muestra evidencias de condensación de sedimentos o de depositación lenta, también acompañado por la presencia de abundantes excavaduras, terrenos firmes, mineralización y acumulaciones fósiles (Mitchum, 1977).

4.2.1.2.3 Nivel base

Es un nivel de equilibrio del sistema donde no se encuentra erosión ni sedimentación, el nivel de base se define como la menor elevación a la cual una corriente puede profundizar su cauce. En esencia, es el nivel al cual una corriente desemboca en el océano, un lago u otra corriente (Mitchum, 1977).

4.2.1.2.4 Tractos de sistemas de soporte bajo (lowstand systems tract, LST)

El LST tiene como límites en su base la discontinuidad subaérea o su concordancia correlativa marina, en su tope la superficie de máximo de regresión. Se constituye durante la etapa precoz de subida del nivel de base, cuando la tasa de subida está compensada por la tasa de sedimentación; estamos en contexto de regresión normal, los depósitos de bajo nivel consisten en sedimentos no-marino (relleno de valles incisos, canales) y en depósitos marinos y costeros. El patrón de acumulación es progradante y, en el tope, agrándate cuando la tasa de sedimentación equilibra la subida del nivel de base (Walker, 1992).

4.2.1.2.5 Tractos de sistemas transgresivos (transgressive systems tract, TST)

Comienza a depositarse cuando la velocidad de subida del nivel de base sobrepasa la tasa de sedimentación. Así que, en su base, este cortejo tiene como límite la superficie de máximo de regresión (MRS) y, en su tope, la superficie de máximo de inundación (MFS). El cortejo transgresivo se identifica por su patrón de acumulación retrogradante (es decir granodecreciente) tanto en las series marinas como en las continentales (Walker, 1992).

La parte marina de los tractos de sistemas transgresivo se desarrolla en primer lugar en las zonas de poca profundidad, cerca de la línea de costa. Son los depósitos que se acumulan en onlap en la zona de shoreface. Más hacia el offshore se encuentran las series condensadas correlativas de los depósitos del shoreface, los depósitos gravitacionales y los sedimentos pelágicos (Walker, 1992).

4.2.1.2.6 Tractos de sistemas de soporte alto (highstand systems tract, HST)

El tracto de soporte alto tiene como límites, en su base la superficie de máximo de inundación y, al tope, una superficie compuesta que incluye la discontinuidad subaérea, la superficie regresiva de erosión marina y la superficie basal de regresión forzada. Este tracto representa la etapa tardía de la subida del nivel de base, cuando la tasa de subida del nivel es inferior a la tasa de sedimentación, ocasionando una regresión normal de la línea de costa (Walker, 1992).

4.2.1.2.7 Tractos de sistemas de etapa descendente (falling stage systems tract, FSST)

El tracto en etapa descendente del nivel de base está compuesto por todos los sedimentos que se acumulan en la parte marina de la cuenca durante la caída del nivel de base. En el mismo tiempo, la parte emergida del sistema está sometida a la erosión subaérea, formándose la discontinuidad subaérea. Los depósitos de mar somero muestran un patrón progradante y un offlapping característicos de este tipo de cortejo. Estos sedimentos de mar somero son los equivalentes cronológicos de los abanicos de mar profundo (Walker, 1992).

4.2.1.2.8 Tractos de sistemas regresivos (regressive systems tract, RST)

El tracto regresivo es un cuerpo sedimentario compuesto constituido por los tractos de Alto nivel (HST), de Caída del nivel de base (FSST) y de Bajo nivel (LST). El tracto regresivo se usa cuando hay imposibilidad de diferenciar los diferentes cortejos regresivos en los documentos de subsuelo. El RST está limitado, en su base, por la superficie de máximo de inundación y, al tope, por la superficie de máximo de regresión; el RST se caracteriza por un patrón de acumulación progradante, tanto en sus partes continentales como marinas (Walker, 1992).

4.2.1.2.9 Transgresivo-regresivo (transgressive-regressive,T-R)

Las secuencias T-R está limitada por superficies compuestas que pueden comprender discontinuidades subaéreas y/o superficies de ravinement (Erosión por olas) con sus superficies correlativas de máximo de regresión. La superficie de máximo de inundación separa la secuencia T-R en un cortejo transgresivo inferior y otro regresivo superior (Walker, 1992).

4.2.1.2.10 Transgresión

Es la migración hacia el continente de la línea de costa, dicha migración provoca un movimiento de las facies hacia el continente, y una profundización del mar en la proximidad de la línea de costa. La retrogradación (migración de las facies hacia el continente) es el patrón característico de la transgresión. La transgresiones se producen cuando la creación de espacio disponible es superior a la colmatación sedimentaria, de esto resulta una retrogradación de las facies, la superficie de erosión re trabajada por las olas durante la transgresión de la línea de costa se encuentra cubierta por los depósitos de frente de playa (Wagoner, 1995).

4.2.1.2.11 Regresión

Es producida por una migración de la línea de costa hacia el mar y, por consiguiente, la migración de las facies hacia el mar. La progradación es el patrón característico de la regresión. Las regresiones normales se producen en las etapas tempranas y tardías de subida del nivel de base, cuando la tasa de sedimentación sobrepasa la débil tasa de subida del nivel de base; en este caso el espacio disponible creado es completamente contrarrestado por la acumulación sedimentaria. El patrón de acumulación de los sedimentos es, a la vez, una agradación vertical y una progradación de las facies hacia las zonas distales (Wagoner, 1995).

4.2.1.2.12 Regresión Forzada

se producen durante los períodos de baja del nivel de base, cuando la línea de costa tiene que regresar cualquier que sea el aporte sedimentario. Esto provoca un proceso de erosión, tanto en dominio continental como en las zonas de poca profundidad del mar adyacente a la línea de costa (Wagoner, 1995).

4.2.1.3 Ambientes depositacionales

Se pueden clasificarse en tres grandes categorías, como se muestra a continuación (Figura 6): No marinas (fuera del alcance de las inundaciones marinas), costeras (inundadas intermitentemente por agua marina) y marinas (cubiertas permanentemente por aguas marinas). En la Figura 7 se presenta una ilustración de los subambientes que abarcan la transición de ambientes continentales a totalmente marinos. En las zonas costeras, los entornos de la boca del río (es decir, los puntos de entrada de sedimentos a la cuenca marina) están separados por tractos de costa abierta donde se desarrolla el entorno de la playa. El entorno glacial no está incluido en el esquema de clasificación de la Figura 6 porque está controlado climáticamente y puede superponerse en cualquier entorno continental, costero o marino. Dentro de la porción no marina de la cuenca, se puede hacer una distinción entre la llanura aluvial de pendiente más abrupta, que captura los tractos aguas arriba de los sistemas fluviales, y la llanura costera de suave pendiente que puede desarrollarse dentro de los tractos aguas abajo del ambiente fluvial (Figura 8) (Bates & Jackson, 1987).

'Llanura costera' es un término geomorfológico que se refiere a un área relativamente plana de lecho marino programado o emergido, bordeando una línea costera y extendiéndose tierra adentro hasta la tierra elevada más cercana. La Figura 8, ilustra la situación en la que la llanura costera se forma por procesos de progradación del lecho marino. En este caso, los sedimentos que se acumulan en la llanura costera durante la progradación de la línea costera son parte del denominado "prisma costero", que incluye depósitos de aguas fluviales a aguas poco profundas. El prisma costero tiene forma de cuña y se expande hacia tierra desde el entorno costero mediante la superposición de la topografía preexistente en dirección ascendente. El límite hacia tierra del prisma costero fue denominado "línea de la bahía" por (Posamentier *et al.*, 1992), y puede desplazarse río arriba cuando la progradación de la línea costera va acompañada de agradación (Posamentier *et al.*, 1992).

Los ambientes costeros son críticos para la estratigrafía de secuencias, ya que registran la historia y son más sensibles al proporcionar las pistas para la reconstrucción de los cambios cíclicos en las tendencias depositacionales. De hecho, el desarrollo de los conceptos estratigráficos de secuencia comenzó en primer lugar con el estudio de la zona de transición entre ambientes marinos y continentales, donde la relación de las facies y las superficies

estratigráficas es más fácil de observar. Desde la línea costera, la aplicación de la estratigrafía de secuencias se expandió gradualmente tanto hacia tierra como hacia el mar, hasta que finalmente se estableció un modelo coherente a nivel de cuenca que incluye los patrones de apilamiento esperados en sucesiones completamente fluviales y marinas profundas. La importancia del litoral, como el vínculo entre las partes marinas y no marinas, también se refleja en el hecho de que la curva de referencia de los cambios de nivel de base se utiliza para definir los cuatro eventos principales de un ciclo estratigráfico, e implícitamente el momento de todos los tractos de los sistemas y las superficies estratigráficas se centra en las fluctuaciones del alojamiento en la costa; esta cuestión, que es la clave para comprender los principios estratigráficos de la secuencia (Catuneanu, 2006).

- | |
|--|
| <p>1. Ambientes Continentales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Coluviales y conos de deyección • Ambientes fluviales • Ambientes lacustres • Ambientes eólicos <p>2. Ambientes costeros (marinos marginales)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ambientes de boca de río <ul style="list-style-type: none"> ✓ Bocas de río regresivas: Deltas ✓ desembocaduras transgresoras: estuarios • Entornos abiertos en la costa <ul style="list-style-type: none"> ✓ Playa ✓ Trasplaya <p>3. Ambientes marinos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ambientes marinos someros <ul style="list-style-type: none"> ✓ Costa ✓ Plataforma Interna y externa • Ambientes marinos profundos <ul style="list-style-type: none"> ✓ pendiente continental ✓ llanura abisal (piso de la cuenca) |
|--|

Figura 6. Clasificación general de los ambientes depositacionales, los cuales se encuentran en 3 grandes grupos, continentales, costeros (o transicional) y marinos. Fuente: modificado de (Catuneanu, 2006).

Una realidad que comúnmente se pasa por alto es que las costas pueden cambiar su carácter transgresivo frente a regresivo a lo largo del rumbo, en función de las fluctuaciones en los índices de hundimiento y sedimentación (Figura 7). Esto significa que la arquitectura predecible y las relaciones de edad de los sistemas depositacionales y los trectos de sistemas presentados en secciones bidimensionales a lo largo de inmersión pueden alterarse en una vista 3D, debido a la alta variabilidad que puede imponerse a los límites de trectos de sistemas hundimientos y sedimentación. Por lo tanto, se debe tener la mente abierta al tratar de extrapolar la realidad de un perfil orientado a la inmersión a otras ubicaciones a lo largo de la cuenca. Los cambios autocíclicos en la distribución de energía y sedimentos dentro de los ambientes depositacionales, que podrían afectar a todos los ajustes en la Figura 7, son otra razón por la cual las variaciones en la geometría estratigráfica deberían esperarse a lo largo de un perfil orientado a la inmersión a otro (Catuneanu, 2006).

Los diversos modelos de secuencia que se usan actualmente difieren entre sí principalmente en el estilo de empaque conceptual del registro estratigráfico, utilizando diferentes tiempos para los trectos de los sistemas (ver 4.2.1.2) y los límites de secuencia en relación con un ciclo de referencia de los cambios de nivel base (Figura 9). Ningún modelo es universalmente preferible, o aplicable a toda la gama de estudios (Posamentier *et al.*, 1992).

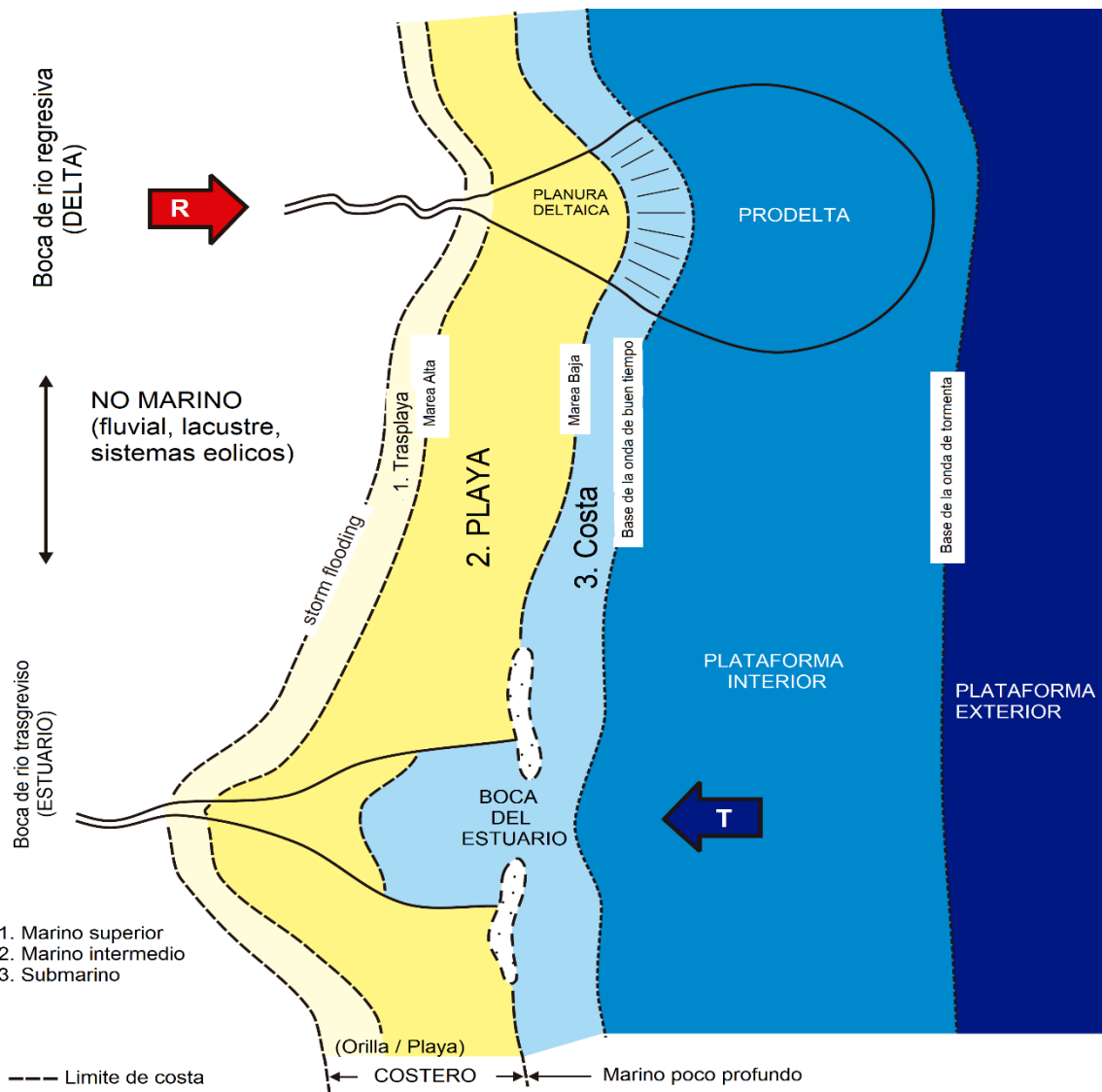


Figura 7. Ilustración de los diferentes ambientes de deposición, resaltando los ambientes costeros donde la dirección del mar y del río son un agente importante y se refleja su movimiento en dos grandes flechas (R-regresivo; T-transgresivo); lo cual provoca la formación de deltas y prodeltas o estuarios. Fuente: modificado de (Catuneanu, 2006).

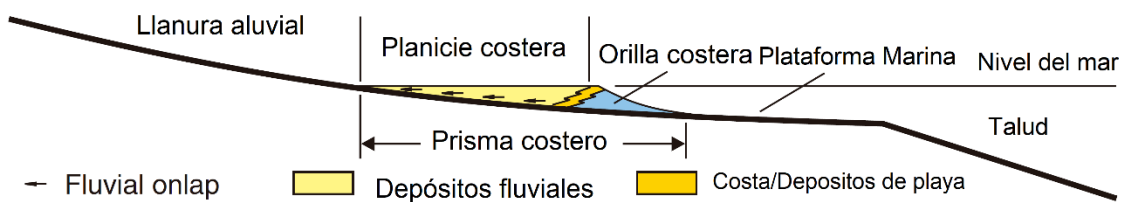


Figura 8. Perfil tomado de la Figura 7, donde se ilustra los tres principales ambientes de deposición y subambientes en donde ocurre la deposición. Fuente: modificado de (Catuneanu, 2006).

Modelo de Secuencia / Evento	Depositional Secuencia II	Depositional Secuencia III	Depositional Secuencia IV	Genetic Secuencia	T-R Secuencia
Final de la transgresión	HST	HST temprana	HST	HST	RST
Final de la regresión	TST	TST	TST	TST	TST
Final de la base - nivel de la falla	LST tardia (cuña)	LST	LST	LST tardia (cuña)	RST
Inicio de la base - nivel de la falla	LST temprana (abanico)	HST tardio (abanico)	FSST	LST temprana (abanico)	
	HST	HST temprana (wedge)	HST	HST	

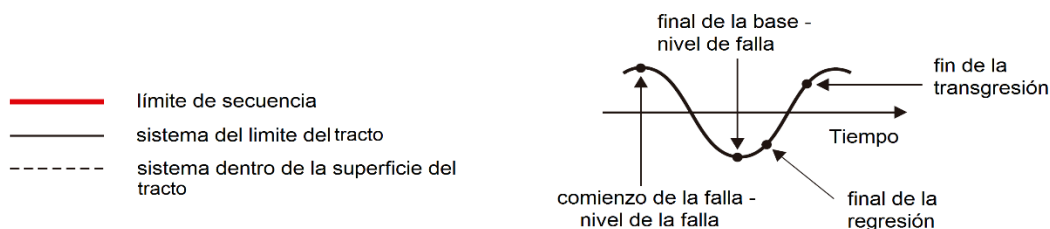


Figura 9. Modelo de eventos de secuencias en el cual se definen los límites de secuencia, los intervalos de cada tracto en función de los eventos depositacionales y los cuatro trectos de sistema, abreviados así: LST (lowstand systems tract)- trectos de sistemas de soporte bajo; TST (transgressive systems tract)-tractos de sistemas transgresivos; HST (highstand systems tract) - trectos de sistemas de soporte alto; FSST (falling stage systems tract)- trectos de sistemas de etapa descendente; RST (regressive systems tract)- trectos de sistemas regresivos.; T-R (transgressive-regressive)- transgresivo-regresivo; donde se resaltan los LST tardío que generan cuñas, Los LST temprano y HST tardío que generan abanicos. Fuente: modificado de (Catuneanu, 2006).

4.2.1.4 Ley de Walther

La conexión entre los cambios verticales y laterales de las facies observadas en el afloramiento y el subsuelo se realiza mediante la Ley de Walther (Figura 10). Este es un principio fundamental de la estratigrafía, que permite al geólogo visualizar cambios laterales de facies predecibles basados en los perfiles verticales observados en secciones 1D, como pequeños afloramientos, núcleos o troncos de pozo. Como se discutió por (Miall, 1997), los cambios verticales en litofacies y biofacies se han utilizado durante mucho tiempo para

reconstruir la paleogeografía y los cambios temporales en entornos depositacionales y con la ayuda de la Ley de Walther, para interpretar los desplazamientos laterales de estos entornos. Sin embargo, tales interpretaciones solo son válidas dentro de sucesiones relativamente conformables de estratos genéticamente relacionados. Los cambios verticales a través de las discordancias de secuenciación potencialmente reflejan grandes cambios de facies entre sucesiones que no están relacionadas genéticamente, y por lo tanto dichos cambios no deberían utilizarse para reconstruir la paleogeografía de una porción de tiempo particular en el registro estratigráfico (Walther, 1894).

Ley de Walther (Middleton, 1973): En una sucesión conformable, las únicas facies que pueden ocurrir juntas en la sucesión vertical son aquellas que pueden ocurrir juntas en la naturaleza.

Ley de Walther (Bates & Jackson, 1987): Solo se pueden superponer esas facies y áreas de facies que se pueden observar una junto a la otra en este momento.

Ley de Walther (Posamentier & Allen, 1999): La misma sucesión que está presente verticalmente también está presente horizontalmente a menos que haya una ruptura en la sedimentación.

- En otras palabras, un cambio vertical de facies implica un desplazamiento lateral correspondiente de facies dentro de una sucesión relativamente conformable de estratos genéticamente relacionados.

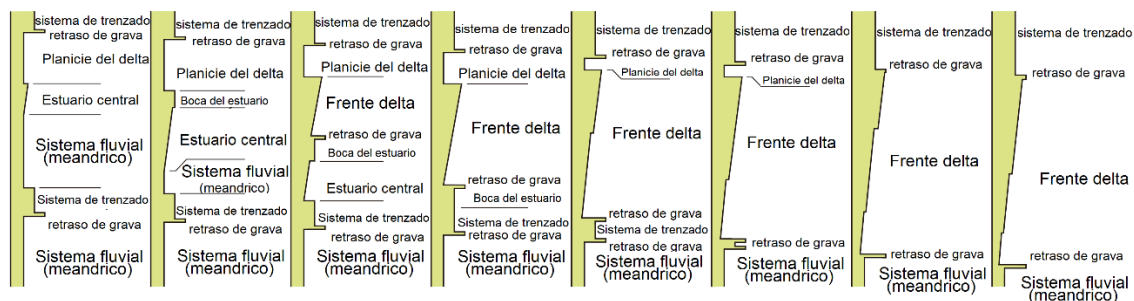
Figura 10. Evolución de la definición de la ley de Walther a través del tiempo. Fuente: modificado de (Catuneanu, 2006).

Un delta progradacional es una buena ilustración del concepto de ley de Walther. El sistema deltaico depositacional incluye prodelta, frente delta, y facies de llanura del deltaica, 'que se producen de lado a lado en ese orden y los productos de que se producen juntos en el mismo orden en sucesión vertical. El uso del concepto del sistema depositacional permite hacer predicciones sobre la estratigrafía a escalas mayores, ya que permite interpretaciones de las rocas en términos de amplias reconstrucciones paleoambientales y paleogeográficas. Esta técnica ahora se ha convertido en parte de la estratigrafía de secuencias, donde las secuencias son paquetes de estratos regionales correlacionables que registran los cambios locales o regionales en el nivel base (Miall, 1990).

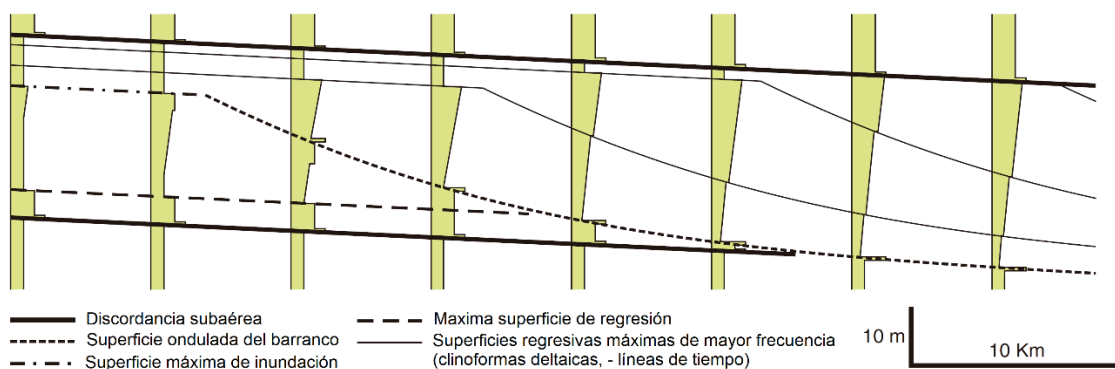
Más allá de la escala de un sistema depositacional, la Ley de Walther es igualmente valiosa cuando se aplica a trectos de sistemas, ya que la arquitectura interna de cada tracto de sistema implica

cambios progradales o retrogradacionales de facies que se traducen en cambios de facies correspondientes a lo largo de perfiles verticales. La Figura 11 proporciona ejemplos de cómo los perfiles verticales se integran y ayudan a reconstruir las relaciones de facies laterales a lo largo de las secciones orientadas a la inmersión (Catuneanu, 2006).

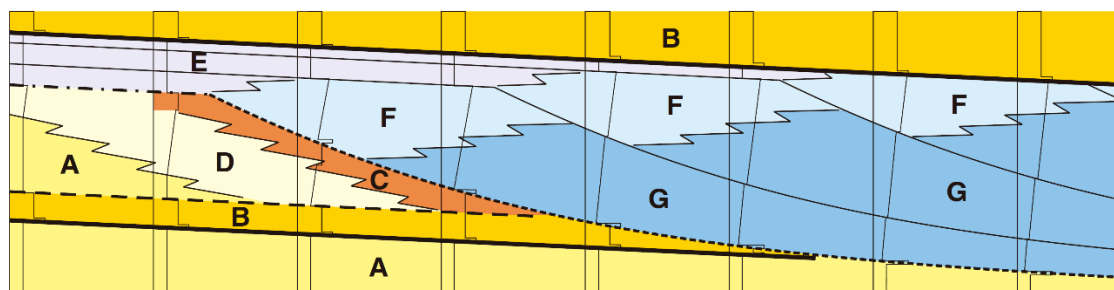
1. Datos: perfiles verticales y paleoambientes



2. Secuencia de marco estratigráfico



3. Estructura estratigráfica de secuencia, contactos de facies y entornos paleodepositacionales



4. Sección transversal que enfatiza unidades litoestratigráficas

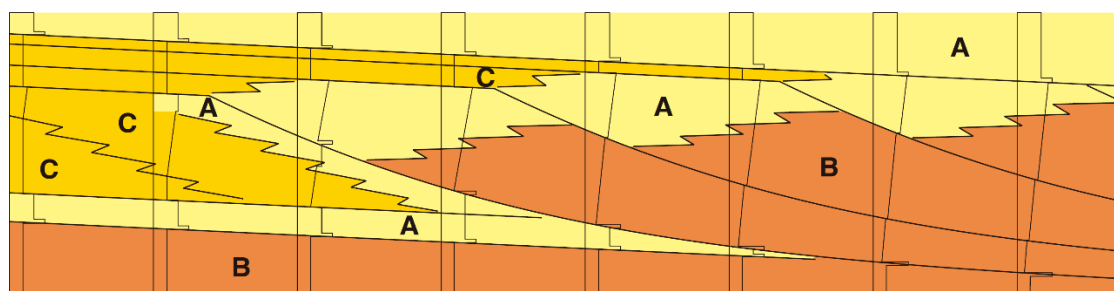


Figura 11. Comparación de resultados al interpretar datos de facies en estratigrafía de secuencia frente a litoestratigráficos. 1. Caracterización de facies y reconstrucción de paleo ambientes. 2. Correlación entre perfiles verticales, siendo las facies buenos marcadores crono estratigráficos, con la excepción de la superficie transgresiva ya que es poco diacrónica. 3. Interpretación de los datos anteriores desde el punto de vista de la estratigrafía de secuencia, códigos de facies: sistema de meandro; Sistema trezado B; Complejo de boca del estuario C; estuario central D; Planicie de delta E; delta frontal superior F; delta frontal o prodelta G. 4. Interpretación de los datos anteriores desde el punto de vista litoestratigráficos, A-una unidad dominada por arenisca; B y C - unidades dominadas por mudstone, con intersticios limosos y arenosos. Fuente: modificado de (Catuneanu, 2006).

4.2.2 Atributos sísmicos

Un atributo es cualquier medida de datos sísmicos que nos ayuda a mejorar o cuantificar visualmente las características de interés de la interpretación. Un buen atributo es directamente sensible a la característica geológica deseada o a la propiedad del yacimiento de interés, o permite definir el entorno estructural o depositacional y, por lo tanto, permite inferir algunas características o propiedades de interés. Introducido por primera vez a principios de la década de 1970, los atributos sísmicos ahora se usan ampliamente para la predicción litológica y petrofísica de las propiedades del yacimiento (Chopra & Marfurt, 2007).

Uno de los objetivos de los atributos sísmicos es capturar la experiencia de reconocimiento de patrones del intérprete mediante la cuantificación de la amplitud y las características morfológicas observadas en los datos, utilizando un conjunto de cálculos determinísticos realizados en una computadora. Por ejemplo, el atributo de coherencia desarrollado a mediados de la década de 1990 captura las mismas discontinuidades observadas en los datos sísmicos e interpretado como fallas por (Rummerfeld, 1954).

En el sentido más general, los atributos abarcan todas las cantidades derivadas de datos sísmicos. Por lo tanto, se consideran que los atributos incluyen cantidades tales como velocidad de intervalo, inversión de impedancia acústica, predicción de presión de poro, terminaciones de reflector, así como atributos de rastro complejo y Amplitud frente a desplazamientos (amplitud versus offset, AVO). Al asignar el atributo de nombre a una cantidad basada en cálculos muy sofisticados, como la inversión de impedancia y la predicción de presión de poro, reconocemos que esas estimaciones están contaminadas de algún modo por errores y por lo tanto son

susceptibles de calibración a datos de pozo mediante geoestadística y otros datos (Chopra & Marfurt, 2007).

Los atributos sísmicos permiten que el geocientífico interprete fallas y canales, reconozca el entorno depositacional y desenrede la historia de deformación estructural más rápidamente. Al combinar información de muestras y trazas sísmicas adyacentes utilizando un modelo físico (como dip y azimut, similitud de forma de onda o contenido de frecuencia), los atributos sísmicos a menudo organizan características sutiles en pantallas que proporcionan imágenes mejoradas para un intérprete humano o para geoestadística moderna o análisis por computadora de redes neuronales (Chopra & Marfurt, 2007).

La Figura 12 muestra una línea de tiempo de cuando los atributos sísmicos específicos se desarrollaron y relaciona cada uno de los avances clave en la tecnología de exploración sísmica (Chopra & Marfurt, 2007).



Figura 12. Creación y desarrollo de los atributos sísmicos a través del tiempo. Fuente: Modificado de (Chopra & Marfurt, 2007).

Opendtect es un sistema de software que trabajan en la interpretación y visualización de datos sísmicos de diferentes volúmenes y un conjunto de herramientas que permiten mejorar la interpretación y al usuario hacer modificaciones a estas herramientas. A continuación, se habla de los diferentes atributos sísmicos que se utilizaron en este trabajo:

4.2.2.1 Energía

Este atributo caracteriza las propiedades acústicas de la roca y el espesor del lecho (Figura 13); ayuda en la identificación de sísmica con continuidad lateral, por ejemplo, chimeneas, paquetes de rocas duro, entre otros (DGB, 2002). Este atributo calcula la suma al cuadrado de los valores de muestra en una ventana de tiempo especificada dividida por el número de muestras en la ventana, cuanto mayor es la energía, mayor es la amplitud, se define su fórmula de la siguiente manera:

$$Energia = \frac{(m1 + m2 \dots + mn)^2}{n^{\circ} \text{ de muestras}}$$

- m: es el valor de la muestra (traza).

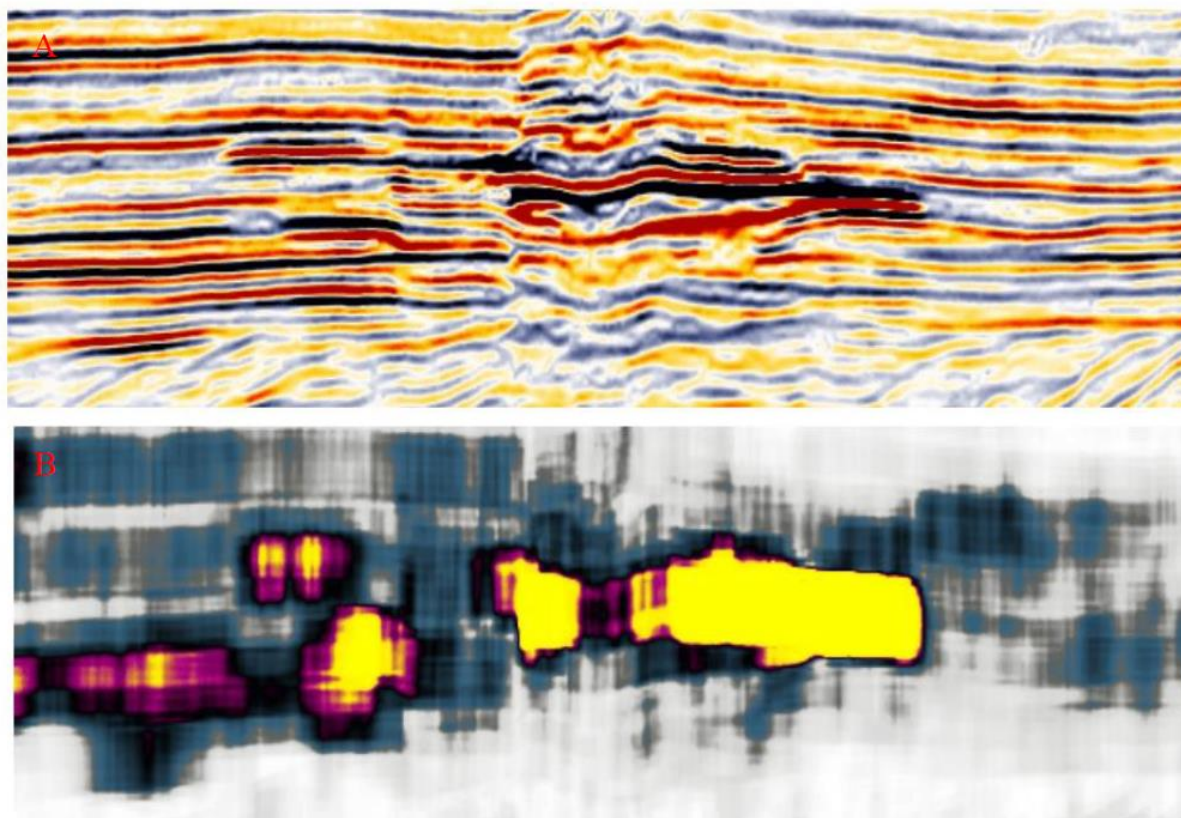


Figura 13. Aplicación del atributo sísmico de energía. A. sección sísmica sin ningún tipo de atributo sísmico. B. En la sección se resalta la zona amarilla como la zona de mayor energía o amplitud.

Fuente: Modificado de (DGB, 2002).

4.2.2.2 Filtro de frecuencia

Este atributo se basa en el uso de dos filtros, la transformada rápida de Fourier (TRF) (Figura 14) o Butterworth, los dos filtros pueden usarse para frecuencias bajas, medias y altas (Lowpass, Bandpass y Highpass); la diferencia radica en que la TRF se considera la traza completa, mientras que para Butterworth se considera un segmento pequeño dependiendo de la cantidad de polos seleccionados y que el filtro de Butterworth puede producir pequeños cambios en estos segmentos de la sísmica (DGB, 2002).

La transformada rápida de Fourier es un algoritmo eficiente que permite calcular la forma discreta y su forma inversa. La forma discreta se define de la siguiente manera:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi k \frac{n}{N}} \quad k = 0, \dots, N - 1.$$

- X_k : Es el resultado de la descomposición de una traza, Frecuencia
- X_n : Es el número de Trazas
- $e^{-i2\pi k \frac{n}{N}}$: Se refiere a funciones periódicas:
- $2\pi k$: Es igual a frecuencia angular (\emptyset)
- $\frac{n}{N}$: Dependiendo de la trigonometría puede ser Seno o Coseno.

La Forma inversa se define de la siguiente manera:

$$x_n = \text{IDFT}\{X_k\} = \frac{1}{N} (\text{DFT}\{X_k^*\})^*$$

Esta ecuación es análoga a la Transformada discreta de Fourier (DTF), donde se toman los resultados de X_k y se multiplican por un factor $\frac{1}{N}$ y se obtiene los datos originales x_n .

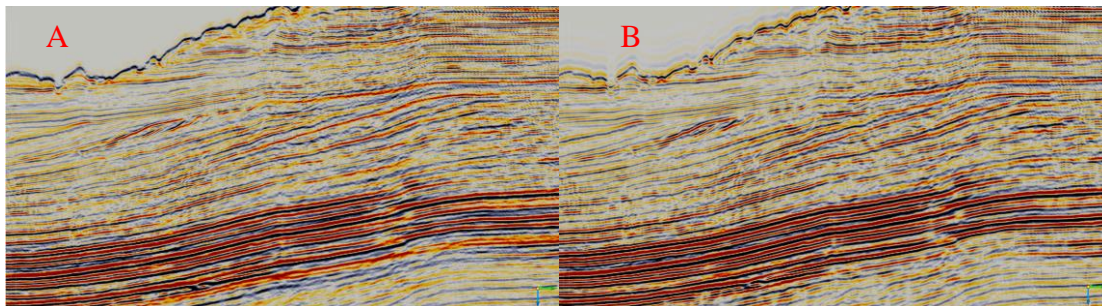


Figura 14. A. Datos sísmicos B. Aplicación del atributo filtro de frecuencia con TRF de baja frecuencia 20 Hz. Fuente: Autor.

4.2.2.3 Instantáneo

Los atributos instantáneos se computan muestra por muestra y representan variaciones de varios parámetros. Los valores instantáneos de atributos tales como la traza de la envolvente, sus derivadas, frecuencia y fase se pueden determinar a partir de trazas complejas (DGB, 2002).

- **Amplitud instantánea**

Se envía el volumen de datos seleccionado en la ubicación de la muestra y se usa como un discriminador efectivo, donde representa el contraste de impedancia acústica, por lo tanto, reflectividad (DGB, 2002).

- **Transformada de Hilbert**

La cuadratura es la parte imaginaria de la traza sísmica y se puede calcular a partir de la traza real a través de la transformada de Hilbert. Tanto la traza real como su contraparte en cuadratura comparten el mismo espectro de amplitud; sin embargo, la cuadratura tiene una rotación de fase de 90 grados. Los cruces cero en la traza real se transforman en picos y valles en la traza de cuadratura y los picos y valles en la traza real se transforman en cruces por cero en la traza de cuadratura. La cuadratura se usa en varias combinaciones matemáticas para calcular otros atributos de trazas complejas como la fase instantánea y la frecuencia instantánea. es sensible a la energía, frecuencia y fase, la definición de la transformada de Hilbert es la siguiente:

$$\hat{s}(t) = \mathcal{H}\{s\}(t) = (h * s)(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau.$$

- $s(t)$: Es la función real de la traza sísmica
- H : Es la transformada de Hilbert
- La transformada de Hilbert se obtiene mediante la multiplicación de $\frac{1}{\pi t}$ donde t es el tiempo de la señal o del dato sísmico en este caso, se calcula mediante la integral $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau$.

4.2.2.4 Similitud

La similitud es una forma de "coherencia" que expresa cuánto se parecen dos o más segmentos traza (Figura 15). Una similitud de 1 significa que los segmentos de rastreo son completamente idénticos en forma de onda y amplitud. Una similitud de 0 significa que son completamente diferentes. Los segmentos de traza se definen por la compuerta de tiempo en ms y las posiciones especificadas en coordenadas relativas (DGB, 2002). El parámetro Extensión determina cuántos pares de trazas se utilizan en el cálculo, a continuación, se explican las posibles combinaciones de los segmentos:

- Ninguno: Solo se calcula la similitud entre el par de trazas definido en posiciones de seguimiento.
- Espejo 90 grados: Se calculan dos similitudes, una para el par de trazas definido y otra para el par obtenido por rotación de 90 grados. No disponible para datos 2D.
- Espejo 180 grados: Se calculan dos similitudes, una para el par de trazas definido y otra para el par obtenido por una rotación de 180 grados.
- Bloque completo: Se calculan las similitudes entre todos los pares de trazas posibles en el rectángulo definido por el paso a paso.
- Cruz: Se calculan las similitudes entre todos los posibles pares de trazas en la forma '+' definida por el paso a paso.
- Diagonal: Se calculan las similitudes entre todos los posibles pares de trazas en la forma 'x' definida por el paso a paso.

- Todas las instrucciones: Se calculan las similitudes entre todos los posibles pares de trazas en la forma " definida por el paso a paso. Esta es la extensión que se considera más útil: proporciona un grado de precisión casi igual al de "Bloqueo completo" pero con un tiempo de procesamiento significativamente menor.

Se consideran los segmentos de rastreo como vectores en el hiperespacio. La similitud se define entonces como uno menos la distancia euclidiana entre los vectores, normalizada a lo largo de las longitudes del vector:

Donde dos vectores X, Y de longitud $N = 15$ muestras:

- $X_i, i: 1,15$
- $Y_i, i: 1,15$

La similitud es 1 menos la distancia euclidiana entre los vectores dividida por la suma de la longitud de cada vector. Tenga en cuenta que la longitud de un vector es su norma L2, también llamada valor RMS:

$$sim = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N X_i^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^N Y_i^2}}$$

$$sim = 1 - \frac{\sqrt{\sum x}}{\sqrt{y}}$$

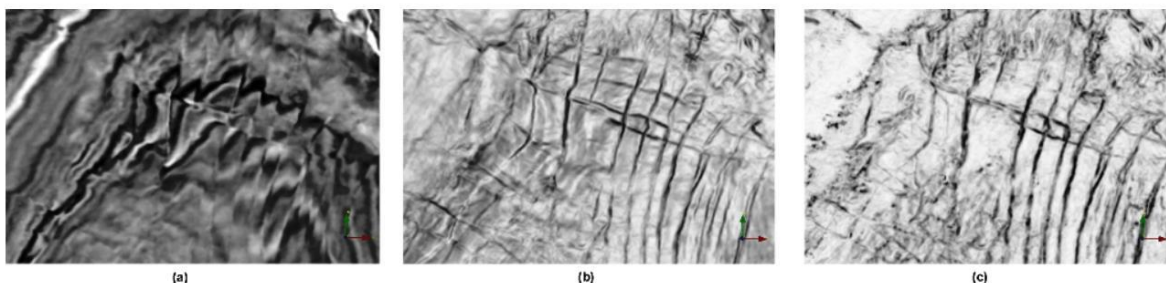


Figura 15. Aplicación del atributo similitud, resaltando la estructura de fallas: (a) Sísmica filtrada dirigida por inmersión, (b) Similitud mínima no dirigida, (c) Similitud mínima dirigida. La

similitud mínima orientada (c) destaca las definiciones de fallas precisas en comparación con el resultado de la similitud mínima no guiada (b). Fuente: Modificado de (DGB, 2002).

4.2.2.5 Descomposición Espectral

La Descomposición Espectral desenreda la señal sísmica en sus frecuencias constituyentes, lo que permite al usuario ver la fase y la amplitud ajustadas a longitudes de onda específicas. El componente de amplitud se destaca en la cuantificación de la variabilidad del espesor y la detección de discontinuidades laterales, mientras que el componente de fase detecta discontinuidades laterales (DGB, 2002).

Es una herramienta útil para la interpretación sísmica a "baja resolución", la estimación del espesor de arena y la mejora de las estructuras de los canales (DGB, 2002).

- **Parámetros de entrada**

El usuario puede elegir entre dos tipos de transformación (DGB, 2002):

- ✓ FFT la Transformada Rápida de Fourier. La FFT requiere una ventana corta (compuerta de tiempo) y un tamaño de paso entre las frecuencias analizadas. Este paso puede interpretarse como la resolución de frecuencia.
- ✓ CWT la Transformada Wavelet Continua. El CWT requiere un tipo de wavelet.

Al elegir CWT, puede configurar el tipo de wavelet (DGB, 2002):

- ✓ Morlet
- ✓ Gaussiano
- ✓ Sombrero Mexicano

En FFT solamente, la señal dentro de la ventana de tiempo se transformará en dominio de frecuencia. El paso dado determina la resolución de salida; si es necesario, se agregarán ceros para adquirir esta resolución. El espectro de amplitud se calcula para la frecuencia solicitada. La ventana de tiempo se desliza de arriba a abajo para cubrir la señal completa. En una situación ideal, la ventana de tiempo abarca un evento sísmico, que puede ser una superposición de múltiples eventos geológicos que interfieren en la traza sísmica (DGB, 2002).

El CWT se define como la suma sobre la señal multiplicada por una wavelet escalada y desplazada. La ondícula se desplaza a lo largo de la señal y en cada posición se calcula la correlación de la ondícula con la señal. El resultado se llama coeficiente de wavelet. La

frecuencia dada corresponde a la frecuencia de wavelet central. El paso determina la resolución de salida, que es especialmente interesante cuando se evalúa este atributo (DGB, 2002).

4.2.3 Zona de estudio, Cuenca Guajira costa afuera

4.2.3.1 Geología Regional

El noroccidente de Suramérica está integrado por un conjunto de terrenos de afinidad oceánica acrecionados desde el Cretácico al oeste de la paleo sutura de Romeral (Cediel *et al.*, 2003); sin embargo, la composición y origen de los terrenos geológicos de corteza continental al este de Romeral son aún desconocidos. La evolución de estos tienen afinidad continental que ha sido tratada en varias hipótesis; una de ellas descrita por (Cediel *et al.*, 2003), la cual considera un origen autóctono para las rocas formadas entre el Paleozoico y el Cretácico medio a través del desarrollo de un aulacógeno (Nova *et al.*, 2012).

Una segunda hipótesis sugiere que, durante el Triásico, los continentes de Suramérica y Norteamérica se ubicaban en el área occidental del súper continente Pangea (Sarmiento-Rojas, 2002). Luego durante el Jurásico temprano cuando Pangea comienza a fragmentarse, se inicia un periodo de rifting, el cual se extiende hasta el Jurásico tardío. Como consecuencia, Norteamérica se desplaza hacia el norte y el bloque Maya (Yucatán) gira 35° en sentido antihorario respecto a Norteamérica hace 161 M.a. y durante un lapso de 10 Ma (Godínez-Urban *et al.*, 2011). Simultáneamente en Suramérica y México se generan grandes sistemas de rifts, formando cuencas tanto en la margen sur (Venezuela, Colombia) como norte del Caribe (Georgia, Florida, Yucatán) (Nova *et al.*, 2012; Pindell & Kennan, 2009).

Una tercera hipótesis (Bayona *et al.*, 2010) muestra que si bien durante el Jurásico medio a tardío hasta el Cretácico temprano, terrenos como la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) se movieron hacia el norte; la dinámica de subducción favoreció la deformación extensional y/o transtensional al interior de la esquina noroccidental de la placa Suramericana, generando cuencas con depósitos continentales en los Andes de Mérida (AM) (Venezuela) y la Serranía del Perijá (SP) (Colombia) (Nova *et al.*, 2012)(Figura 16).

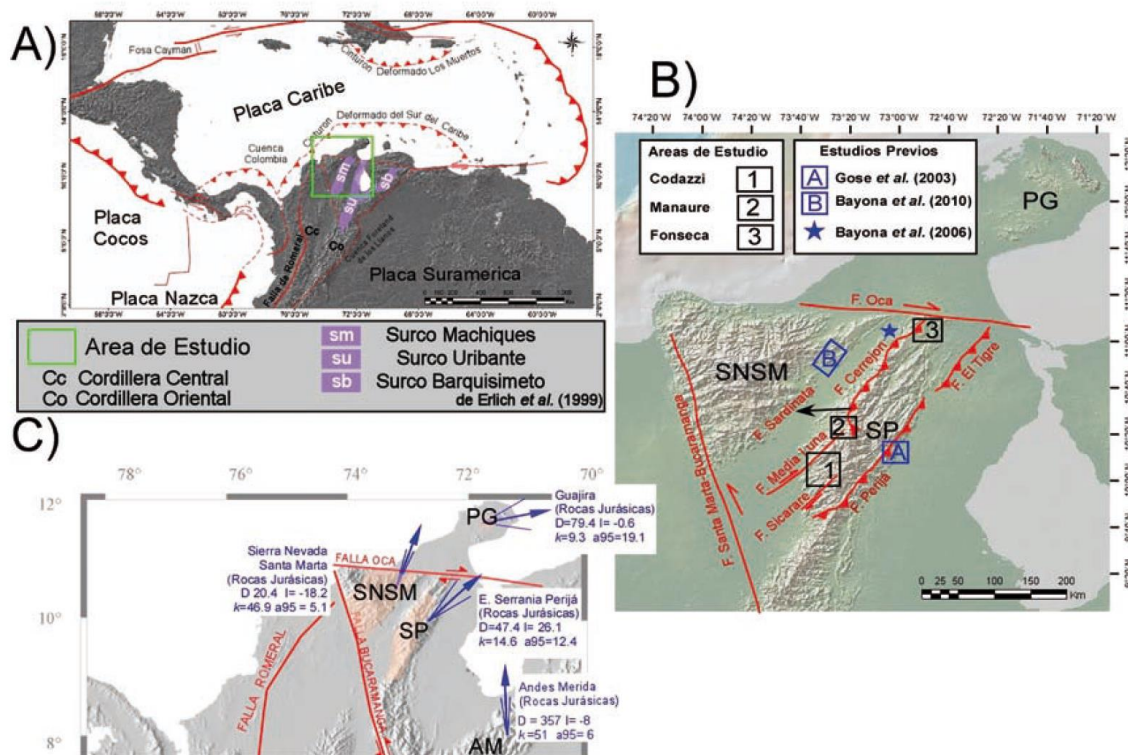


Figura 16. A) Marco Tectónico actual del norte de Suramérica y el Caribe, indicando las placas tectónicas presentes y los principales rasgos tectónicos formados por la interacción de estas placas. B) Localización de las áreas de trabajo con los principales rasgos estructurales, y geográficos, Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), Serranía de Perijá (SP) y Península de la Guajira (PG) C) Comparación de las declinaciones características jurásicas reportadas para la SNSM (Bayona *et al.*, 2010), Este de la SP (Gose, Perarnau, & Castillo, 2003). Fuente: Tomado de (Nova *et al.*, 2012).

4.2.3.2 Tectónica del caribe

La convergencia neógena y activa de las placas del Caribe y Sudamérica puede ser la principal responsable de la geometría del paisaje marino del sur del Caribe (Trenkamp *et al.*, 2002). De hecho, la morfología del fondo marino en esta área refleja la configuración espacial y el relieve del Frente de Deformación del Caribe Sur (Figura 17), donde se acomoda gran parte de la convergencia Caribe-Sudamérica de 2 cm / año (USGS, 2000). Este frente de deformación se extiende desde el Golfo de Urabá en el sur y continúa al noreste todo el camino a lo largo del margen continental, y se interrumpe únicamente por el abanico del Magdalena, identificable por un patrón de drenaje radial justo al norte de la falla Canoas (Figura 17)(Isabel *et al.*, 2010).

Como señaló (Shepard, 1973), el lecho marino de la costa caribeña de Colombia es peculiar debido a su plataforma continental estrecha, que prácticamente no existe en algunas áreas. Los gradientes de pendiente superior e inferiores en el margen activo del Magdalena son 2.8° y 1.56° respectivamente, significativamente más pronunciados que los 1.18° y 0.86° de los gradientes de pendiente superior e inferior en el margen continental pasivo del pacífico (Estrada *et al.*, 2005). Esta zona deformada se conoce localmente como el Cinturón plegado Sinú (Duque-Caro, 1984; Flinch, 2003), un cinturón de empuje costa afuera que acortó la cubierta sedimentaria del Neógeno y deformó el fondo marino. Al norte de esa falla, un patrón de drenaje conspicuo y radialmente divergente delinea los flancos del abanico holoceno del río Magdalena, de 1543 km de longitud, uno de los principales proveedores de sedimentos a la cuenca del Caribe (Ercilla *et al.*, 2002a; Ercilla *et al.*, 2002b; Mora & Martínez, 2005). El abanico del Magdalena representa el tracto erosivo no deformado del Sistema de Turbidita del Magdalena actualmente activo, caracterizado por un flujo de gravedad canalizado. La génesis de este abanico probablemente sea concomitante con el levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia, que comenzó en el Paleógeno y continúa en la actualidad (Isabel *et al.*, 2010).

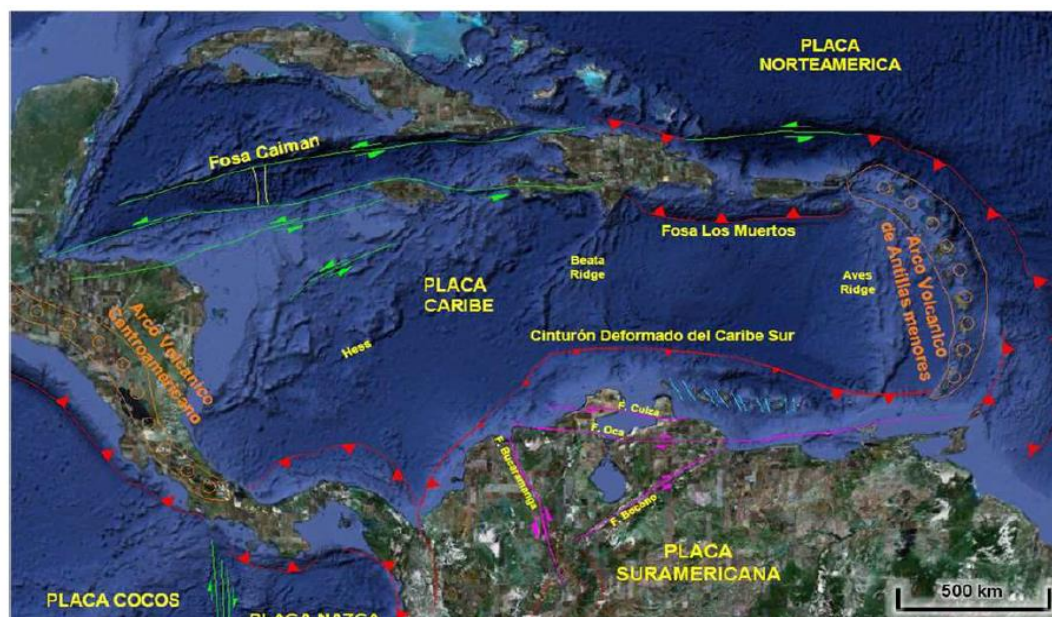


Figura 17. Marco estructural de la zona de sur y centro América, la zona se encuentra caracterizada por las placas Suramericana, Norteamérica, Cocos, Nazca y Caribe; también por estructuras de gran tamaño como las Fallas de Oca, Bucaramanga-Santa Marta, Bocono y Cuiza, también se presentan los Arcos Volcánicos de Antillas menores y Centroamericano. Fuente: Modificado de (Correa, 2012).

4.2.3.3 Estratigrafía

La zona de estudio, se encuentra en la cuenca guajira costa afuera (Figura 18), la estratigrafía de la zona se encuentra dividida en dos por la Falla de Cuiza, se conocen como sub-cuenca superior Guajira y sub-cuenca inferior Guajira. La zona de estudio se encuentra más asociada a las formaciones que se encuentran en la sub-cuenca inferior Guajira, pero se describe brevemente las dos cuencas (ANH, 2011).

4.2.3.3.1 *Sub-cuenca superior Guajira*

Las rocas que predominan la zona son pre Mesozoico, Mesozoico y Cenozoico están emergiendo en las sierras de Jarara, Macuira y Cocinas. Estas rocas están conformadas de litologías que varían desde rocas ígneas cretáceas maficas y ultra maficas hasta rocas sedimentarias y meta-sedimentarias del Jurásico y el Cretácico, que son intruidas por granitoides de la edad Eocena. Estos rangos separan las depresiones de Portete, Cocinas y Chimare, donde los registros subsuperficiales indican la existencia de unidades cenozoicas desde el Eoceno hasta recientes (Rubio y Ramírez, 2000).

La estratigrafía del Cenozoico en la Subcuenca del Alto Guajira incluye desde la base hasta la cima las formaciones Grupo Macuira, Grupo Cocina, Etpana, Jarara, Macarao, Siamaná, Uitpa, Jimol y Castilletes, con edades que abarcan desde el Eoceno hasta el Plioceno tardío que se definieron por (Renz, 1960), quien inicialmente lo interpretó como una unidad depositada durante el Paleoceno; sin embargo, estudios posteriores mostraron que basándose en asociaciones faunísticas, que su edad es el Eoceno Tardío (Fajardo & Rubiano, 1998).

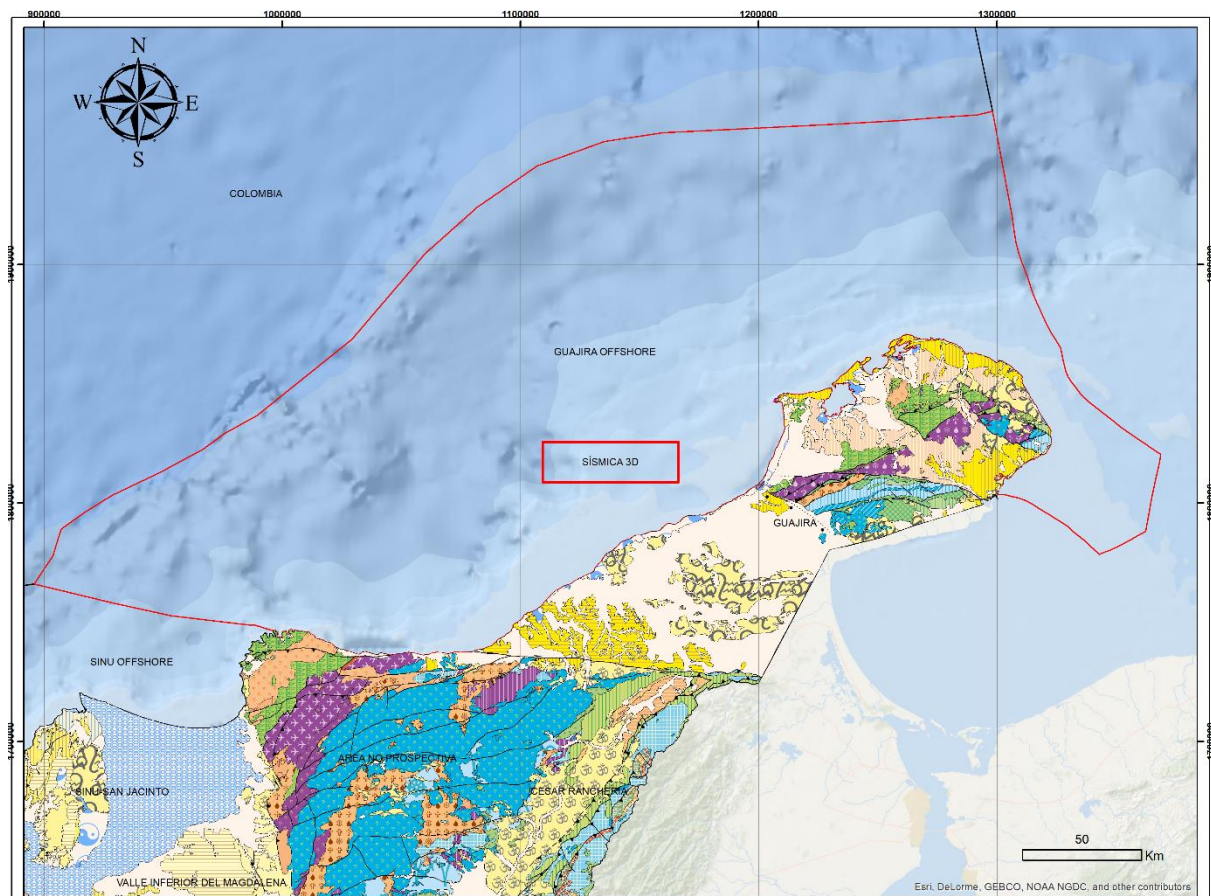


Figura 18. Localización del cubo sísmico, se hace referencia a la geología de la zona con el mapa geológico del 2015 del SGC. Fuente: Modificado de (ANH, 2010)

Litológicamente, esta sub-cuenca desde el Eoceno está compuesta de intercalaciones de areniscas, mudstone, lutitas calcáreas y calizas, con predominio en la base de mudstone y en la parte superior de areniscas, con intercalaciones delgadas de caliza en una sucesión gradual hacia abajo de depósitos plataforma-plataforma (Figura 19) (Duque & Reyes, 1999).

4.2.3.3.2 Sub-cuenca baja Guajira

Se caracteriza por la presencia de rocas desde el Paleoceno hasta la edad Cuaternaria. La base está compuesta por esquistos del Cretácico inferior al oeste, traquitas y espolitas del Cretácico inferior al este y granitos precámbricos. Una secuencia sedimentaria del Cretácico se

registra localmente en el sudeste, con rocas Jurásicas y Cretácicas que se extienden hacia el noreste en la Cordillera Cocinas (Figura 20)(Rubio y Ramírez, 2000).

- **Basamento:** (Vence, 2008) recopiló litologías de sótanos de 21 pozos perforados en la cuenca del Guajira y subdividió el Sótano en tres grupos principales: 1) un cinturón este-oeste de rocas máficas y ultramáficas que pueden formar una banda continua con forma de arco gabros, anfibolitas, serpentinitas, basaltos porfíricos y andesitas basálticas en la Península Guajira que se han fechado como 74 Ma usando K-Ar (Cardona *et al.*, 2007); 2) un área más extensa de rocas metamórficas del Cretácico de greenschist y facies de anfibolitas (McDonald et al, 1971), con edades comprendidas entre 110 y 128 Ma; estas rocas están presentes en la costa de la cuenca del Guajira (Gomez, 2001) y en el archipiélago de Los Monjes (Santamaria & Schubert, 1974) y 3) un cinturón de granito de tendencia noreste en la zona costera de Colombia y el macizo de Santa Marta. Los granitos tienen edades comprendidas entre 92 y 65 - 49 Ma de K-Ar edades en la esquina noroeste de la Sierra Nevada de Santa Marta (Cardona *et al.*, 2007; Tschanz *et al.*, 1974) a 47 Ma utilizando K-Ar para el stock Parashi en la Península Guajira (Cardona *et al.*, 2007).
- **Cretáceo no diferenciado:** En los pozos Guaitapa-1 y Los Manantiales-1 se ha perforado una sucesión cretácea indiferenciada. La base de esta secuencia descansa discordantemente en la base. Con base en los datos litológicos y de registro de pozos, esta unidad consta de mudstone con areniscas interestratificadas y calizas en el área del pozo Manantiales-1, depositadas en ambientes de plataforma (Rubiano, 1998). El espesor del Cretácico indiferenciado alcanza hasta 2270 pies en el pozo Los Manantiales-1 y 2036 pies en el pozo Guaitapa-1. De acuerdo con los escasos datos bioestratigráficos reportados por (Rubiano, 1998), la edad de esta unidad estratigráfica para el pozo Los Manantiales-1 es Maastrichtiano Temprano a Tardío (ANH, 2011).
- **Formación Uitpa:** Esta unidad consta de areniscas de grano grueso a fino, que contienen partículas subangulares a subcubiertas, con intercalaciones de lutitas y calizas biomicríticas (Gutierrez & Osorio, 1988; Rubiano, 1998), y se depositaron durante un evento transgresivo (Rubiano, 1998).
- **Formación Jimol:** Esta formación se compone de rocas calcáreas que van desde mudstone hasta wackestone. Se clasifican composicionalmente como rocas biomicríticas a biosparíticas depositadas en un ambiente de estantería exterior (Cerón *et al.*, 2009), con espesores que van desde 1311 (en el pozo Manaure-1) hasta 140 (en el pozo Ballena-7) pies (Rubiano, 1998).

- Formación de Castilletes: La Formación Castilletes se superpone a la Formación Jimol. Consiste en arcilitas intercaladas, limolitas y areniscas que se depositaron en entornos de estantes interiores y exteriores (Cerón *et al.*, 2009). La información bioestratigráfica indica que esta unidad se depositó durante el Mioceno tardío - Plioceno (Shell, 1998).

STRATIGRAPHIC COLUMN
UPPER GUAJIRA AREA

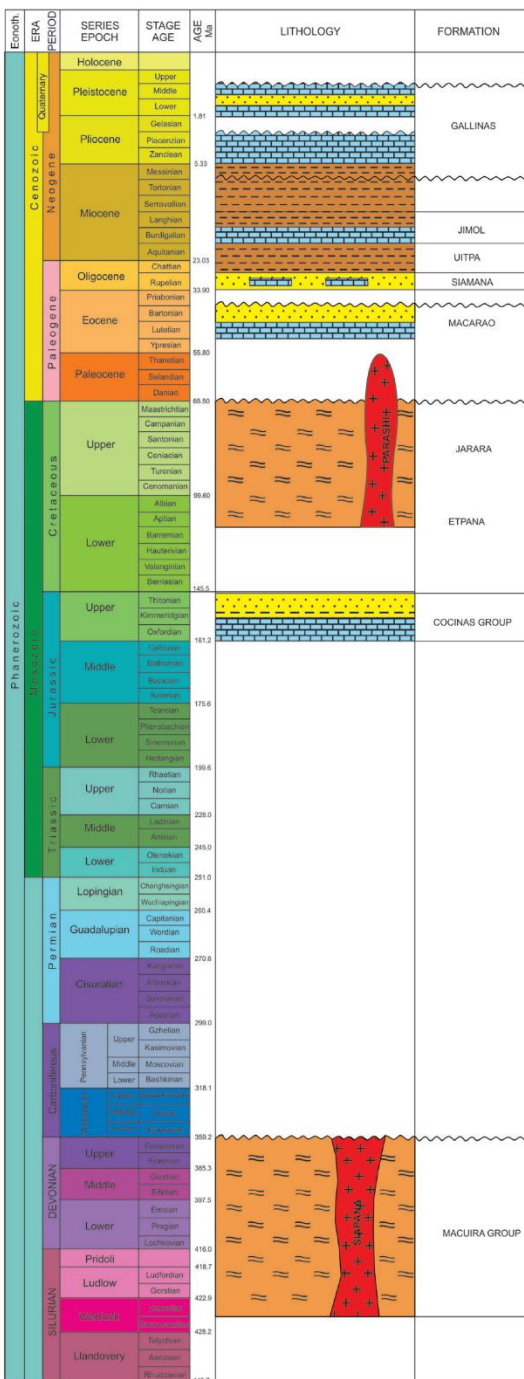


Figura 19. Secuencia estratigráfica de la sub-cuenca alta Guajira. Fuente: Modificado de (ANH, 2011).

STRATIGRAPHIC COLUMN LOWER GUAJIRA AREA

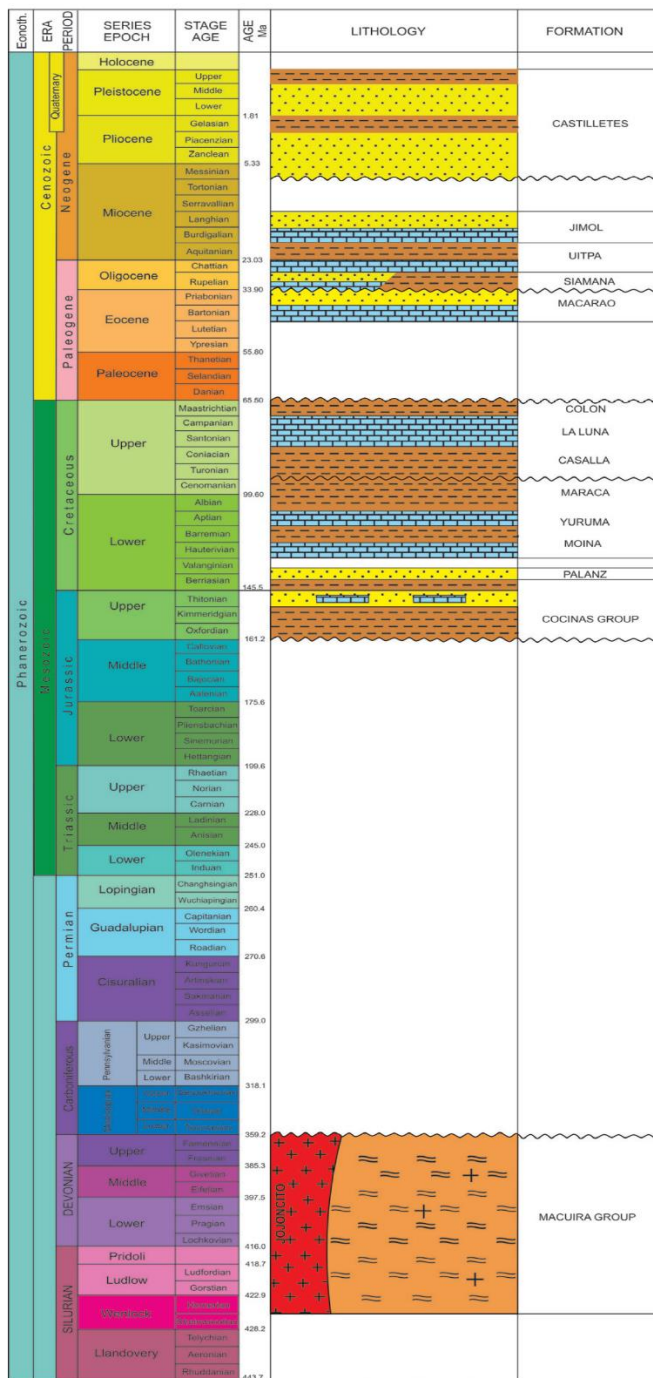


Figura 20. Secuencia estratigráfica de la sub-cuenca baja Guajira. Fuente: Modificado de Modificado de (ANH, 2011).

5 Metodología

Se plantea la metodología para análisis de atributos en la identificación de geoformas y ambientes depositacionales con las siguientes etapas (Figura 21):

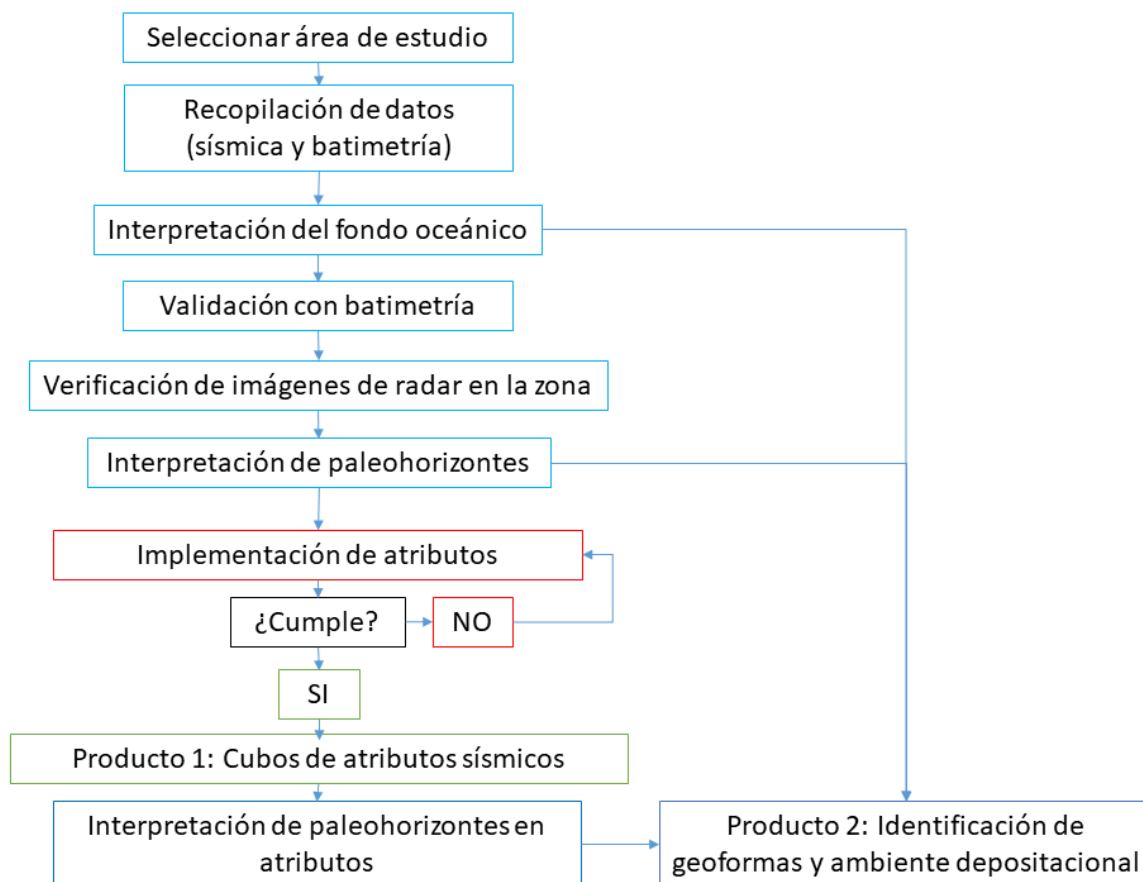


Figura 21. Flujograma del trabajo de grado. Fuente: Autor.

5.1 Selección de área de estudio y recopilación de datos

Se seleccionó un área de estudio en el caribe colombiano en la cuenca guajira offshore (ver sección 4.2.3), donde se disponía de información sísmica 3D, en un volumen apilado PSTM (“Pre stack Time Migration”) en el dominio temporal (tw).t).

- Descripción del volumen sísmico: El cubo sísmico se encuentra en el caribe colombiano. Contiene 745 perfiles inline y 4400 perfiles crossline, una longitud en twt de 4000ms con un muestreo temporal cada 4 ms, el datum del dato se encuentra en NAD83.

5.2 Interpretación del fondo oceánico y validación con batimetría

La interpretación del fondo oceánico o Horizonte H1 se realizó con la mayor calidad posible picado en cada uno de los 745 perfiles inline presentes en el cubo sísmico, procediendo a comparar el resultado de H1 y la batimetría. Como se puede ver en la Figura 22 la resolución de H1 es mayor que la batimetría del cubo sísmico.

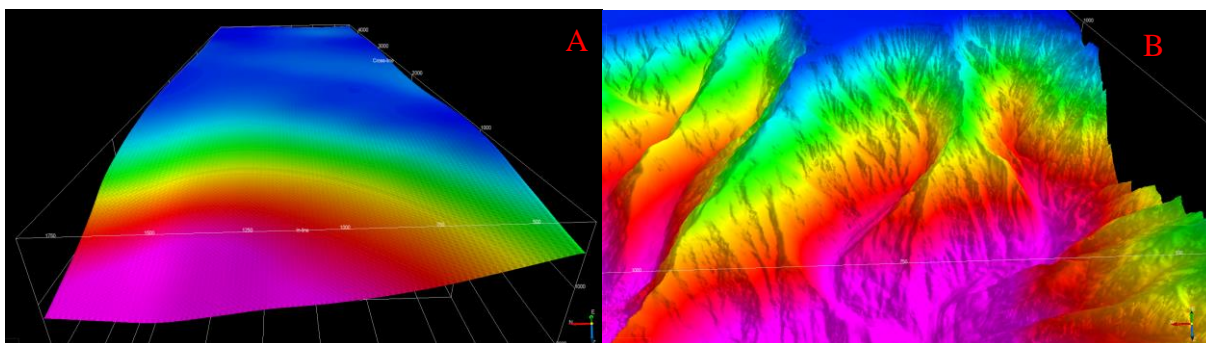


Figura 22. A. Resolución en la batimetría del fondo oceánico. B. Resolución del picado del fondo oceánico o H1. Fuente: Autor.

5.3 Verificación de imágenes de radar en la zona

En este ítem se comparó la resolución de las imágenes de radar captado por satélites y la resolución de H1, se descargaron y procesaron imágenes inSAR (radar). De los satélites Sentinel1 y Alos Palsar con resoluciones espaciales de 10 y 12.5m respectivamente (Figura 23). Las imágenes de radar solo representan la lámina de agua del océano y cambios en las características fisicoquímica del agua. Para el propósito de esta investigación no aporta información relacionada con la superficie del fondo oceánico.

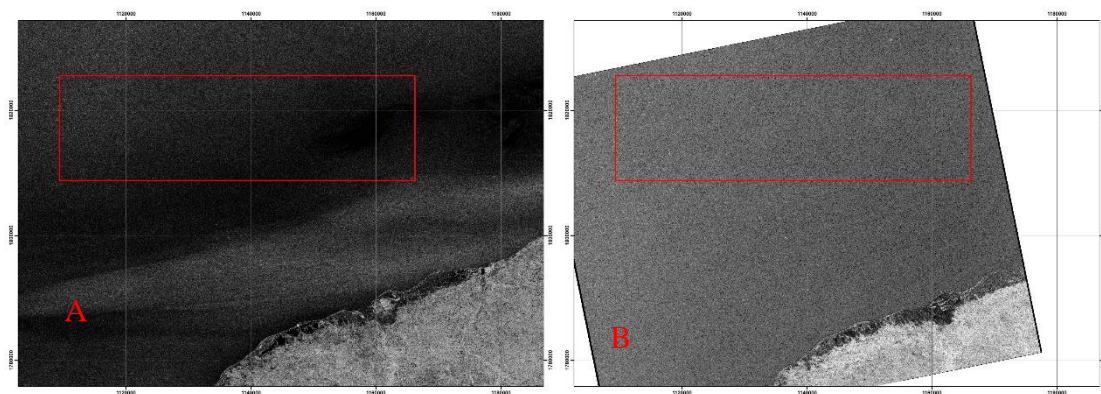


Figura 23. A. Imagen radar del satélite Sentinel1. B. Imagen radar del satélite Alos Palsar. Fuente: Alaska Satellite Facility.

5.4 Interpretación de paleohorizontes

En la interpretación de paleohorizontes se identificaron dos (H2 y H5, Figura 24), estos paleohorizontes se identificaron con el criterio de evaluación de continuidad lateral sobre todo el volumen sísmico, donde en estas superficies se realizaron picados menos denso que el realizado en H1. Se realizó el picado cada 5 inline donde se identificaron la superficie en 149 perfiles.

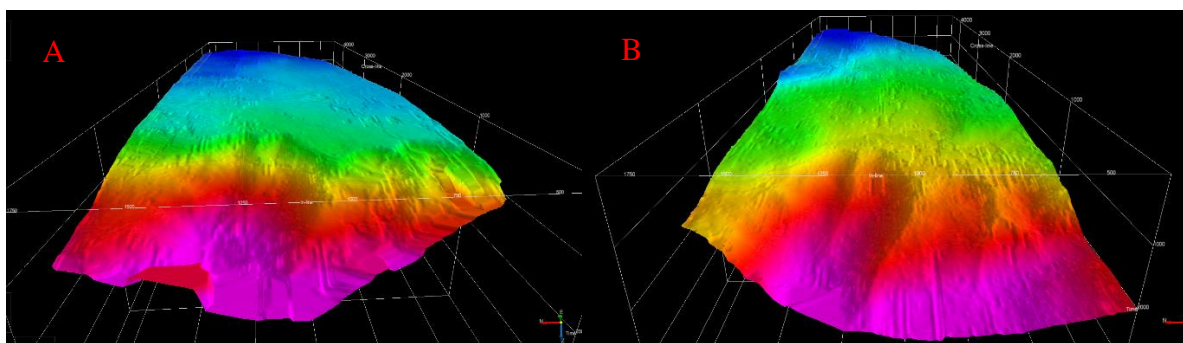


Figura 24. A. Identificación y picado de Paleohorizontes H2. B. Identificación y picado de Paleohorizontes H5. Fuente: Autor.

5.5 Implementación de atributos

En el análisis se procesaron los diversos atributos disponibles (25 atributos) en la versión libre instalada del software Opendtect 6.0.7. De los 25 analizados se seleccionaron 4 con el criterio de evaluación de la continuidad lateral sobre todo el volumen sísmico. De los 4 seleccionados, se evaluó cuales representaban correctamente los horizontes, identificando que solamente los atributos de energía, descomposición espectral e instantáneo de amplitud aplicaban para el horizonte H3 y el instantáneo de Hilbert y el filtro de frecuencia identificaban el horizonte H4. Se describen los resultados para estos horizontes (H3 y H4) a continuación.

5.5.1 Paleohorizonte H3

El paleohorizonte H3 se identificó mediante el cálculo de los siguientes atributos:

- Energía: El atributo de energía ayudó a identificar continuidades laterales donde se presentan rocas duras, en la sísmica se resaltan dos paquetes de roca dura (Figura 25).

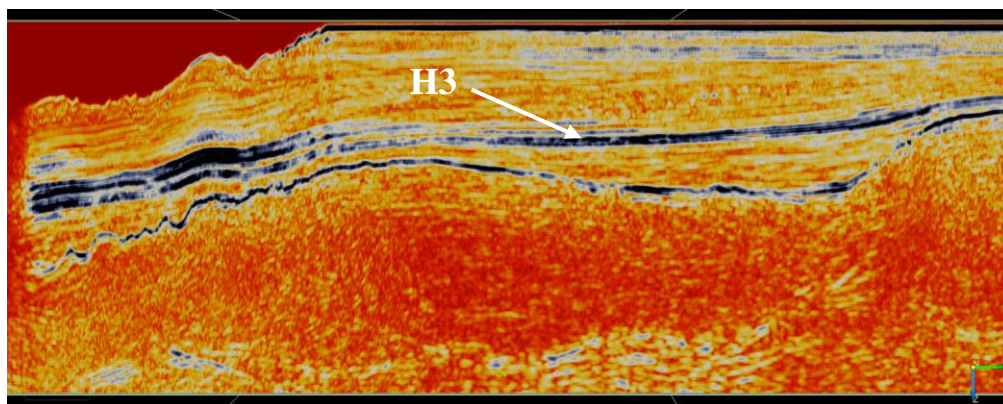


Figura 25. Resultado de la aplicación del atributo de energía, donde se resaltan dos paquetes de roca dura. Fuente: Autor.

- Descomposición espectral: El atributo de descomposición espectral ayudó a identificar continuidades laterales donde resaltaban mayores amplitudes (Figura 26), dando como resultado un espectro parecido a la aplicación del atributo energía.

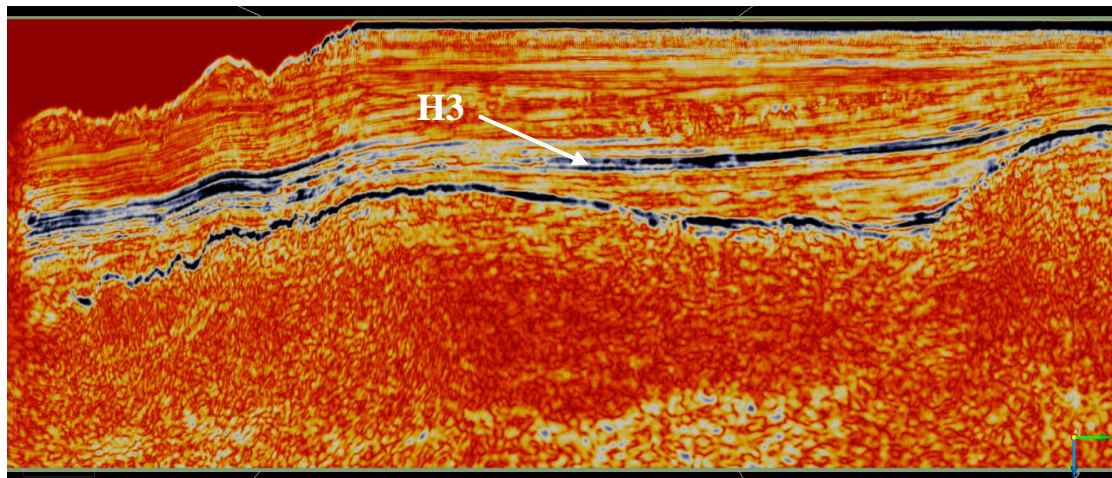


Figura 26. Resultado de la aplicación del atributo descomposición espectral a 20hz. Fuente: Autor.

- Instantáneo de amplitud: El atributo instantáneo de amplitud nos ayudó a identificar donde se presentaban las mayores amplitudes (Figura 27) y a identificar superficies.

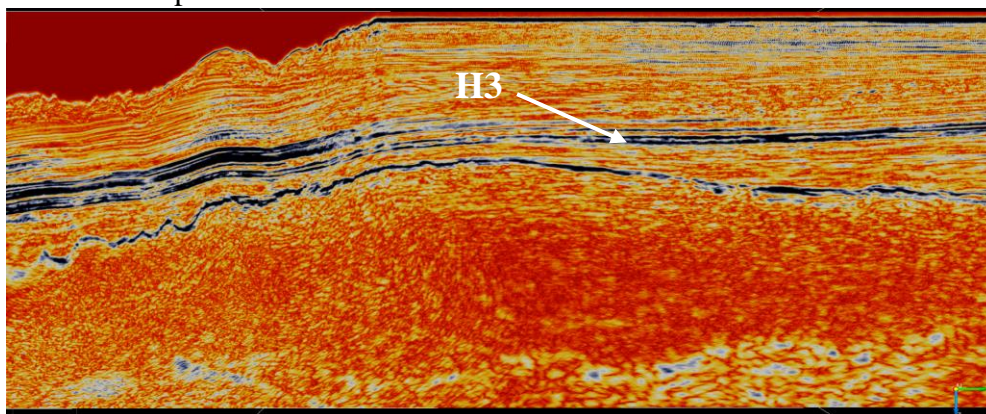


Figura 27. Resultados de la aplicación del atributo instantáneo de amplitud. Fuente: Autor.

5.5.2 Paleohorizonte H4

El paleohorizonte H4 se identificó mediante el cálculo de los siguientes atributos:

- Filtro de frecuencia: El atributo de filtro de frecuencia se realizó mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) para bajas frecuencias, lo cual mejoró la calidad y algunas de las continuidades sísmica (Figura 28) y permitió identificar un nuevo paleohorizonte.

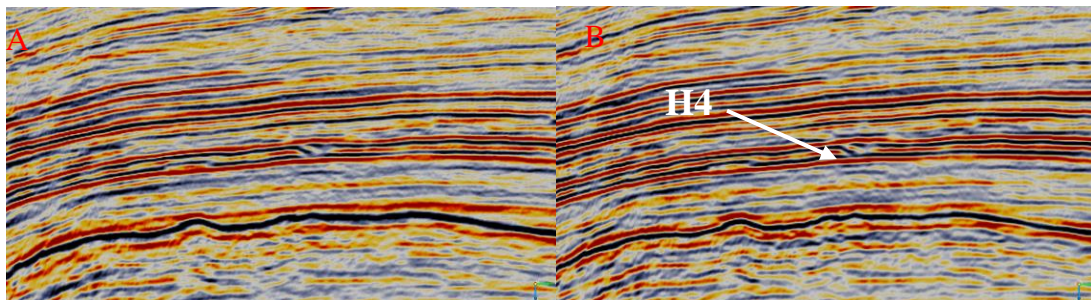


Figura 28. A. Calidad de la sísmica sin ningún atributo. B. Calidad de la sísmica aplicando el atributo de filtro de frecuencia. Fuente: Autor.

- Instantáneo de Hilbert: El atributo instantáneo de Hilbert mejora en gran medida las continuidades (Figura 29), todo esto por el cálculo de la cuadratura de la traza real y su contraparte.

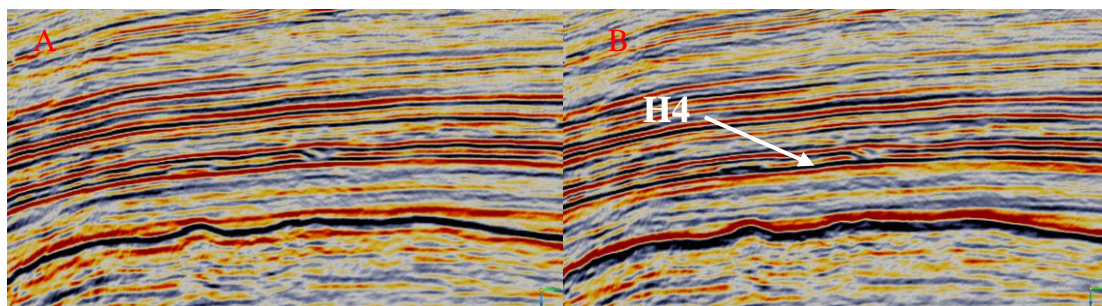


Figura 29. A. Calidad de la sísmica sin ningún atributo. B. Calidad de la sísmica aplicando el atributo de instantáneo de Hilbert. Fuente: Autor

Al finalizar esta etapa, se tiene como producto los cubos sísmicos de cada atributo que se utilizarán para realizar el picado de los horizontes (Figura 30).

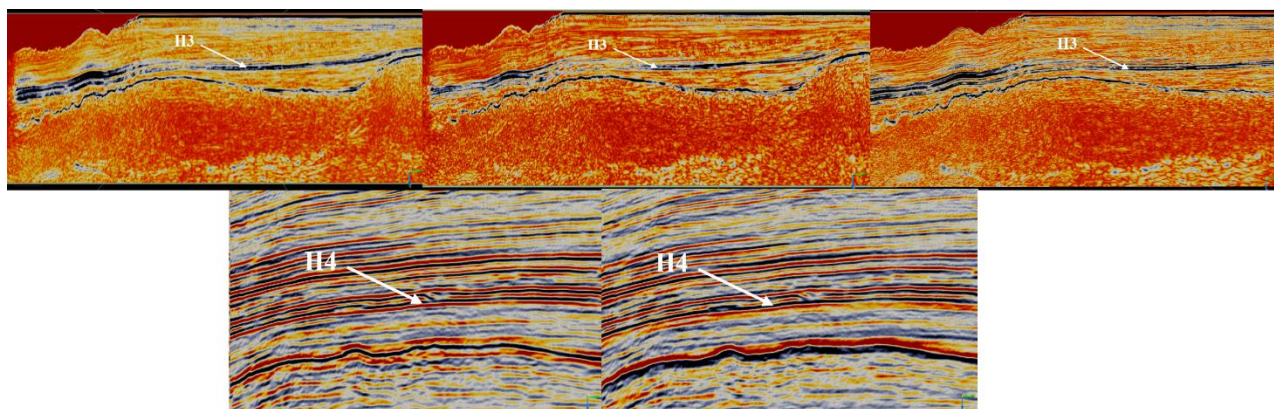


Figura 30. Comparación entre los 5 resultados de los atributos. A. Energía. B. Descomposición espectral. C. Instantáneo de amplitud. D. Filtro de Frecuencia. E. Instantáneo de Hilbert. Fuente: Autor.

5.6 Interpretación de paleohorizontes en atributos

En la interpretación se obtuvieron 5 nuevas superficies utilizando cada uno de los atributos mencionados anteriormente y se realizó la interpretación con la misma densidad de picado que en los paleohorizontes identificados en la sísmica sin atributo. también se muestra una imagen donde se compara la ubicación de cada horizonte y paleohorizonte Figura 31. Los resultados se presentan en la siguiente sección.

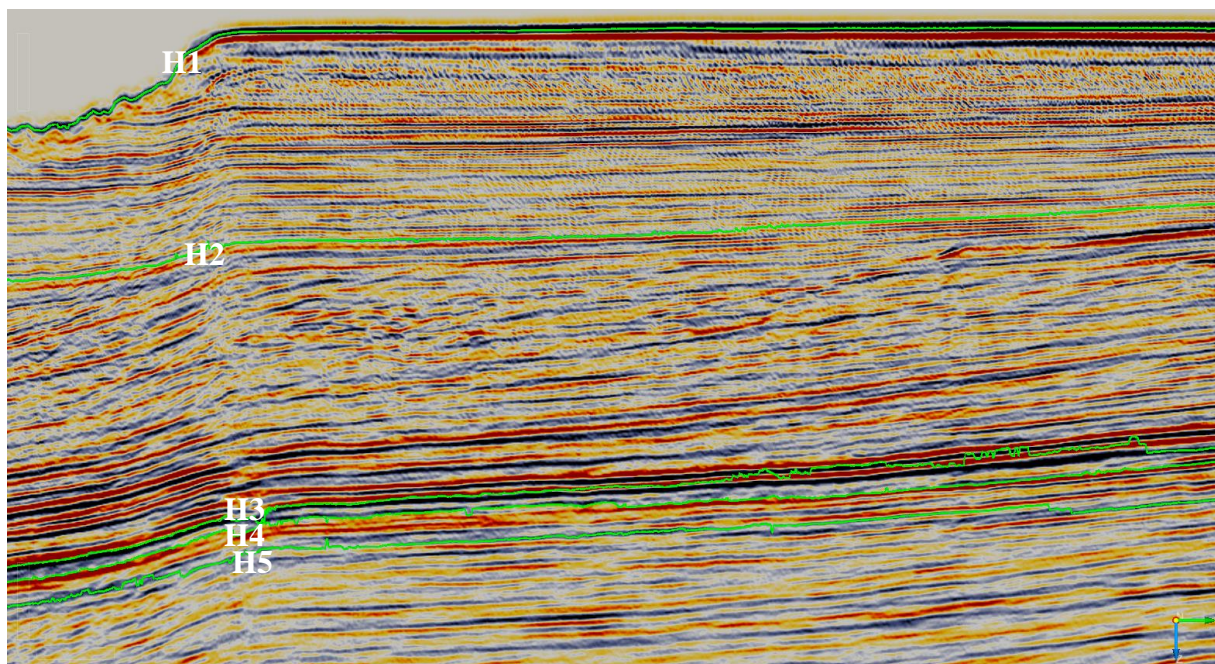


Figura 31. Comparación de las ubicaciones de los horizontes H1, paleohorizontes H2 y H5. También la ubicación de los paleohorizontes H3 con el atributo instantáneo de amplitud y Paleohorizonte H4 con el atributo instantáneo de Hilbert. Fuente: Autor.

6 Resultados y Discusión

Desarrollando la metodología anteriormente mencionada, la etapa final consiste en **la interpretación de paleohorizontes en atributos**. Los horizontes interpretados nos permitirán analizar las geoformas presentes y concluir que ambiente de depositación generó estas geoformas.

6.1 Fondo oceánico o H1

La interpretación del fondo oceánico es la de mayor densidad de picado de todas las superficies identificadas (Figura 32).

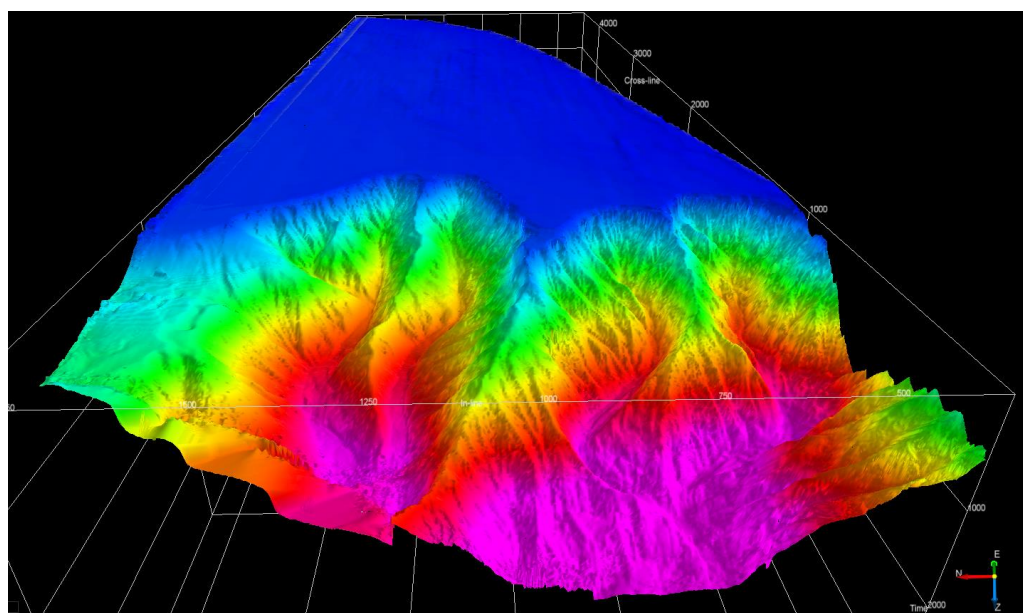


Figura 32. Superficie del fondo oceánico o H1. Fuente: Autor.

- **Geoformas:** Se identifica 3 geoformas en el fondo oceánico y adicionalmente se identifica un rasgo geomorfológico presente en la superficie. Son las siguientes:
 - ✓ Cañón: En H1 se presentan 4 cañones de gran magnitud, donde esta geoforma se caracteriza por tener paredes escarpadas verticales a subverticales y cuya altura es mayor que el ancho del drenaje (Figura 33).
 - ✓ Terraza: Esta geoforma se caracteriza por ser de morfología plana o levemente inclinada (Figura 33).

- ✓ Colina: Esta geoforma se caracteriza por ser un montículo de tierra sobresaliente de poca elevación, con respecto al nivel base (Figura 33).
- **Rasgos geomorfológicos:** A partir de la interpretación realizada en el fondo oceánico se pudieron identificar rasgos geomorfológicos, asociados a las geoformas identificadas y son las siguientes:
 - ✓ canales distributarios submarinos: Se localizan en el cambio de plataforma continental o terraza hacia la zona del talud, teniendo una pendiente alta, con una dirección hacia el oeste y que aportan sedimentos al fondo oceánico (Figura 33).

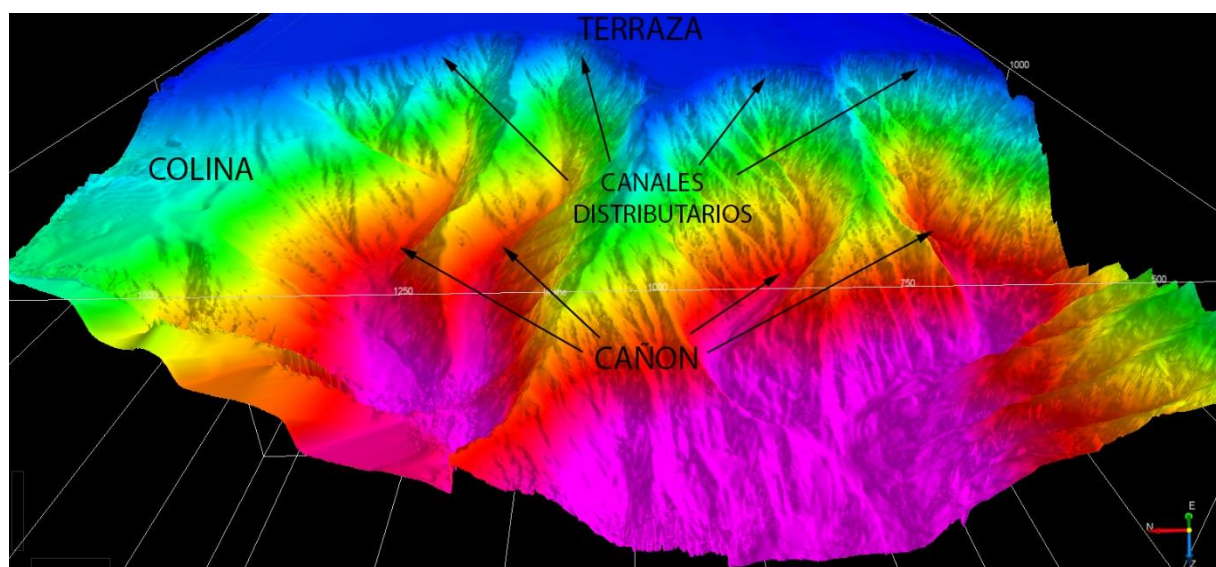


Figura 33. Geoformas identificadas en la superficie del fondo oceánico o H1. Fuente: Autor.

6.2 Paleohorizontes H2 y H5

Los paleohorizontes H2 y H5 (Figura 34 y Figura 35) se realizaron con una densidad menor de picado que con respecto a H1.

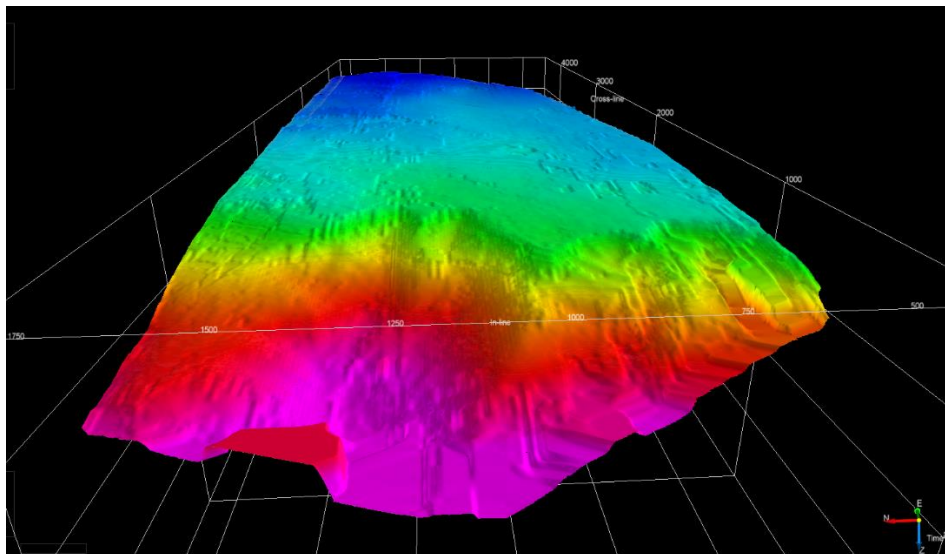


Figura 34. Superficie del paleohorizonte H2. Fuente: Autor.

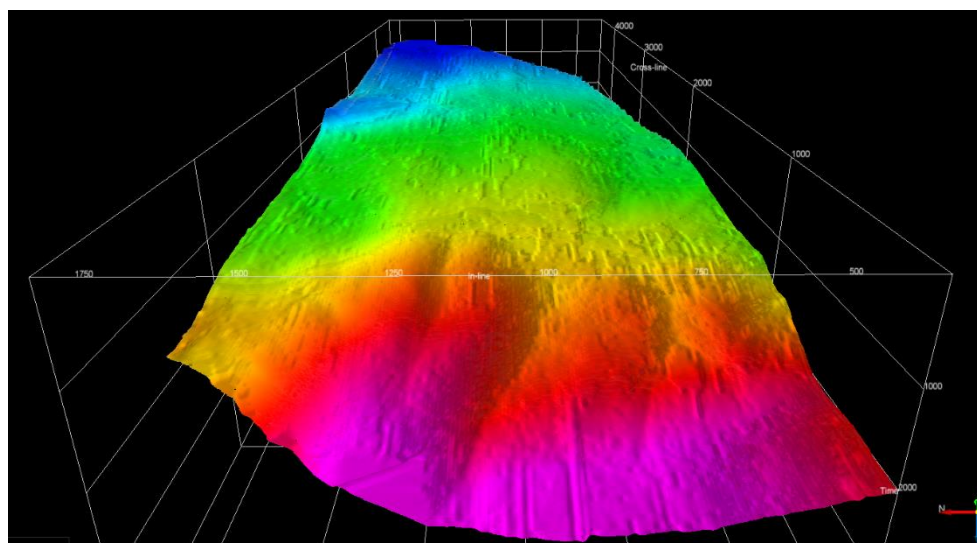


Figura 35. Superficie del paleohorizonte H5. Fuente: Autor.

- **Geoformas H2:** Se identifica 2 geoformas en la superficie H2. Son las siguientes:
 - ✓ Canal: En esta superficie se encuentran dispersos los canales en toda el área del talud, resaltan los 4 canales más grandes de este talud, los canales son de forma alargada y de profundidad variadas (Figura 36).
 - ✓ Terraza: Esta geoforma se caracteriza por ser de morfología plana o levemente inclinada (Figura 36).

- ✓ Colina: Se identifican un montículo de tierra de poca elevación con respecto al nivel base (Figura 36).

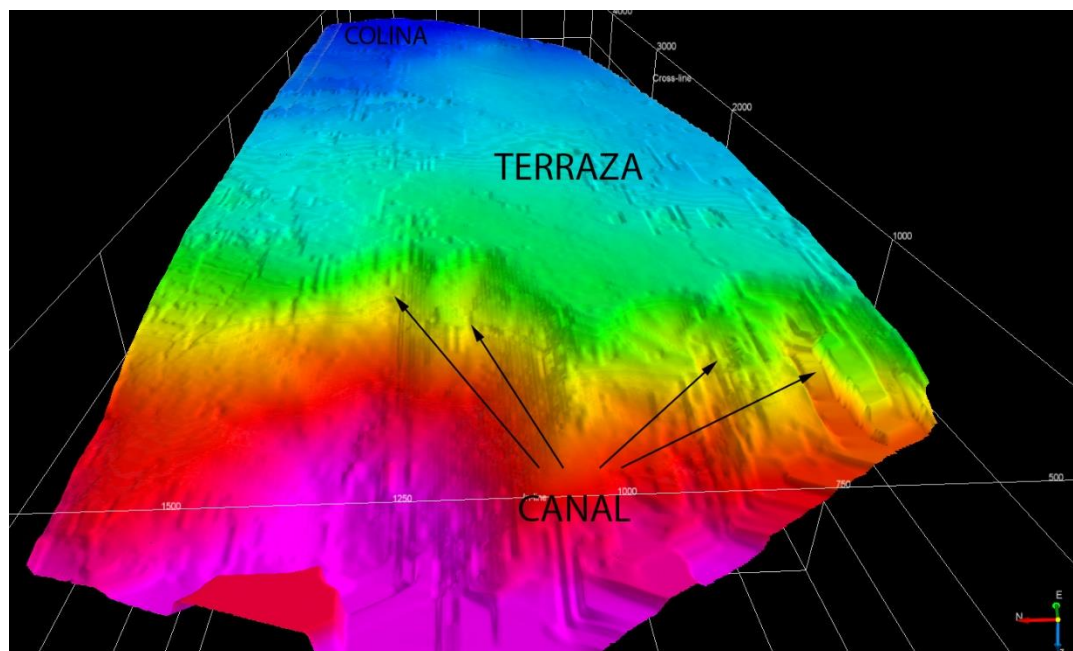


Figura 36. Geofomas identificadas en la superficie H2. Fuente: Autor.

- **Geofomas H5:** Se identifica 3 geofomas en la superficie H5. son las siguientes:
 - ✓ Canal: En esta superficie se encuentran dispersos los canales en toda el área del talud, resaltan los 4 canales más grandes de este talud, los canales son de forma alargada y de profundidad variadas (Figura 37).
 - ✓ Terraza: Esta geofoma se caracteriza por ser de morfología plana o levemente inclinada (Figura 37).
 - ✓ Colina: Se identifican dos montículos de tierra de poca elevación con respecto al nivel base (Figura 37).

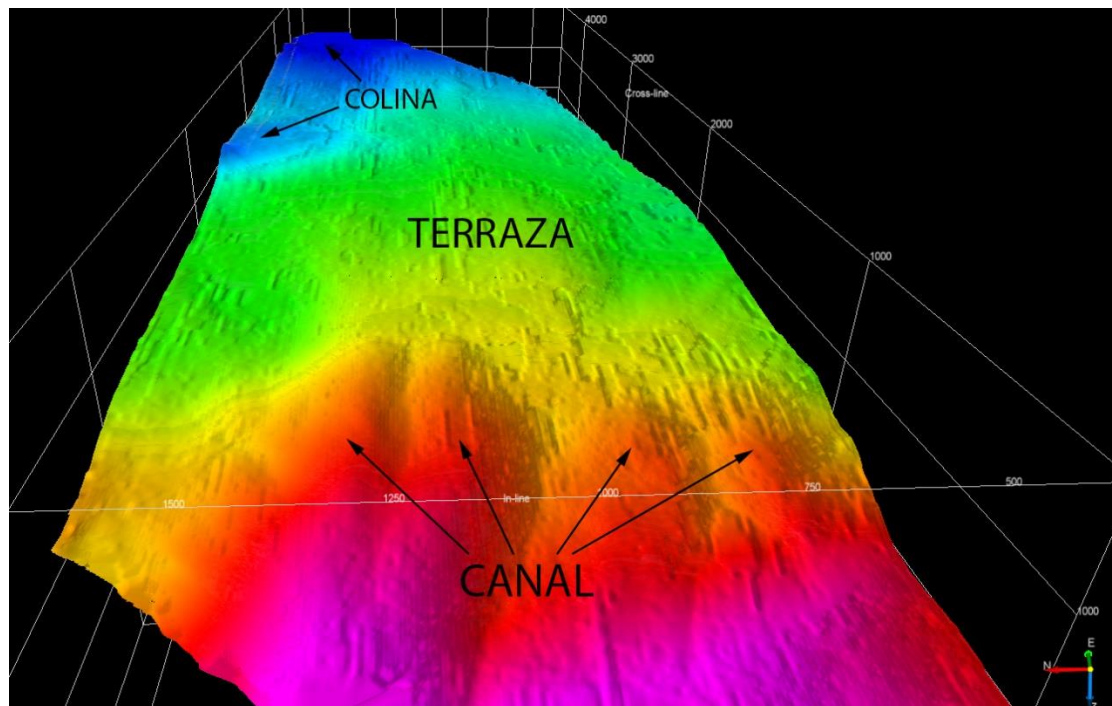


Figura 37. Geoformas identificadas en la superficie H5. Fuente: Autor.

6.3 Paleohorizontes en atributos sísmicos

Con el software Opendtect se aplicaron diferentes atributos y se escogieron los que presentaban con mayor continuidad los horizontes de interés para la identificación de superficies, estos atributos se explicaron brevemente en el capítulo de marco teórico (ver sección 4.2.2) y metodología (ver sección 5.5). En esta sección se presentan los resultados.

6.3.1 Paleohorizonte H3

6.3.1.1 Superficie identificada en el atributo de energía

Con este atributo se identificaron dos mantos de roca dura y se seleccionó el manto con mayor continuidad lateral, esta superficie se le denominó como “S.E” (Figura 38).

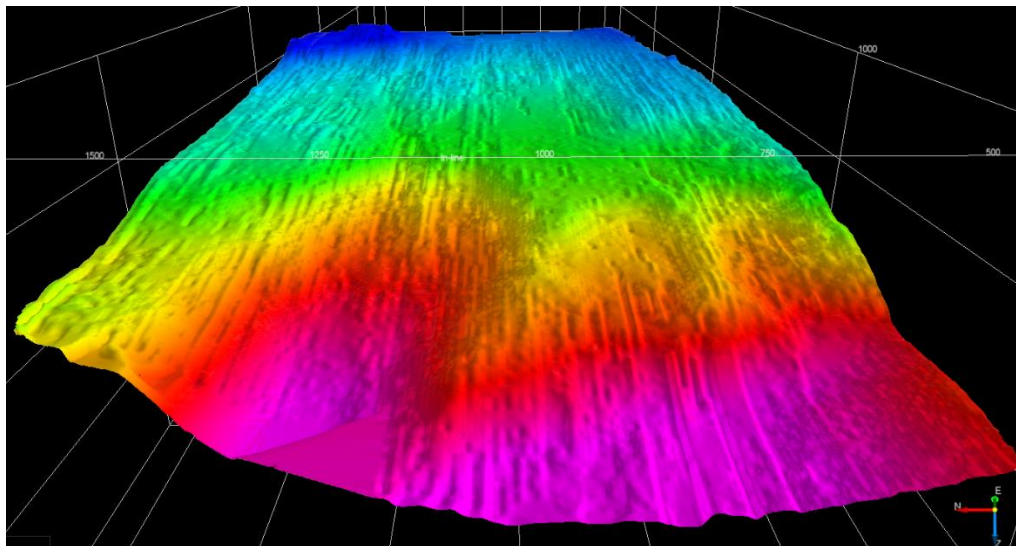


Figura 38. Superficie del paleohorizonte “S.E.” identificado en el atributo de energía. Fuente: Autor.

- **Geoformas:** Se identifica 3 geoformas en la superficie S.E. Son las siguientes:
 - ✓ Canal: En esta superficie se encuentran dispersos los canales en toda el área del talud, resaltan los 4 canales más grandes de este talud, los canales son de forma alargada y de profundidad variadas (Figura 39).
 - ✓ Terraza: esta geoforma se caracteriza por ser de morfología plana o levemente inclinada (Figura 39).
 - ✓ Colina: En la zona más este de la superficie se resalta un montículo de tierra sobresaliente sobre el nivel base (Figura 39).

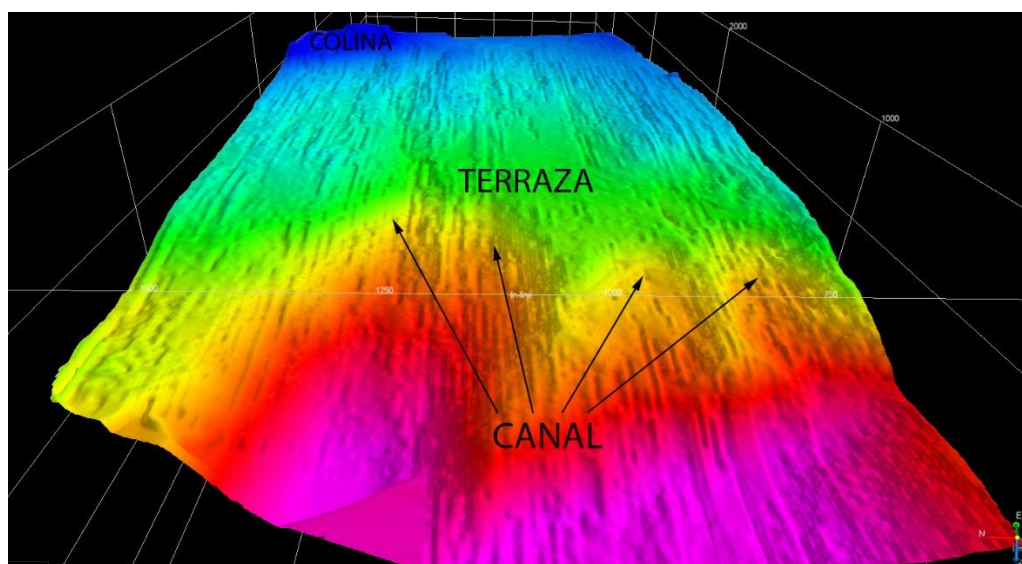


Figura 39. Geoformas identificadas en la superficie “S.E.”. Fuente: Autor.

6.3.1.2 Superficie identificada en el atributo de descomposición espectral

Con este atributo se identificaron amplitudes de 20hz, donde se seleccionó la amplitud con mayor continuidad lateral, esta superficie se le denominó “S.D.E.20Hz”. Además, esta superficie coincide con la superficie de energía (Figura 40).

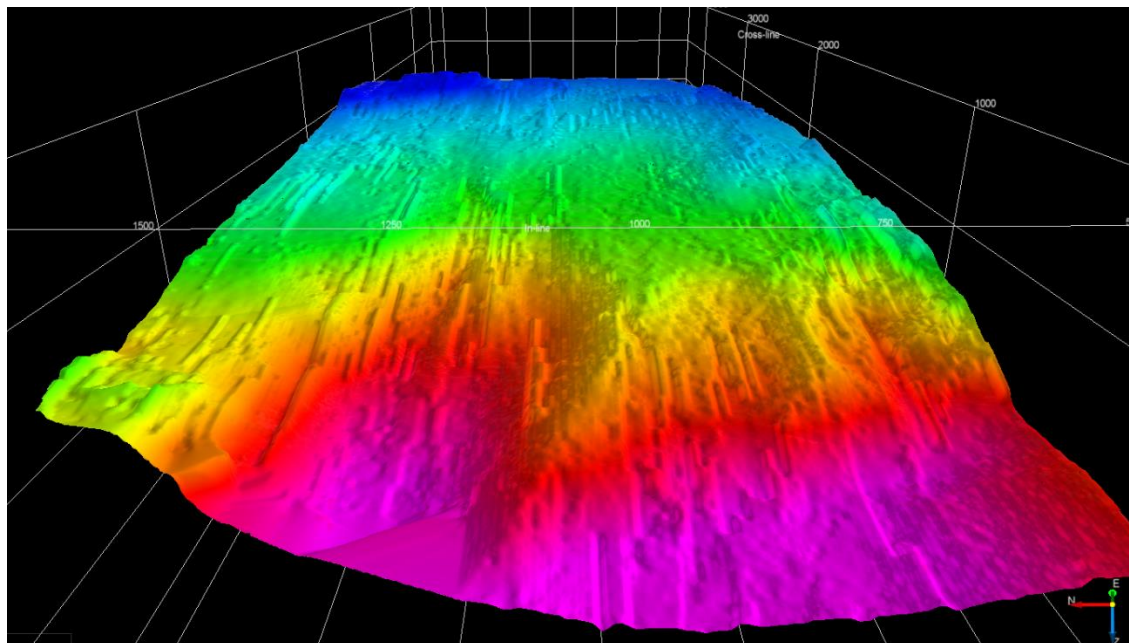


Figura 40. Superficie del paleohorizonte “S.D.E.20Hz” identificado en el atributo de descomposición espectral. Fuente: Autor.

- **Geoformas:** Se identifica 3 geoformas en la superficie S.D.E.20Hz. Son las siguientes:
 - ✓ Canal: En esta superficie se encuentran dispersos los canales en toda el área del talud, resaltan los 4 canales más grandes de este talud, los canales son de forma alargada y de profundidad variadas (Figura 41).
 - ✓ Terraza: esta geoforma se caracteriza por ser de morfología plana o levemente inclinada (Figura 41).
 - ✓ Colina: En la zona más este de la superficie se resalta un montículo de tierra sobresaliente sobre el nivel base (Figura 41).

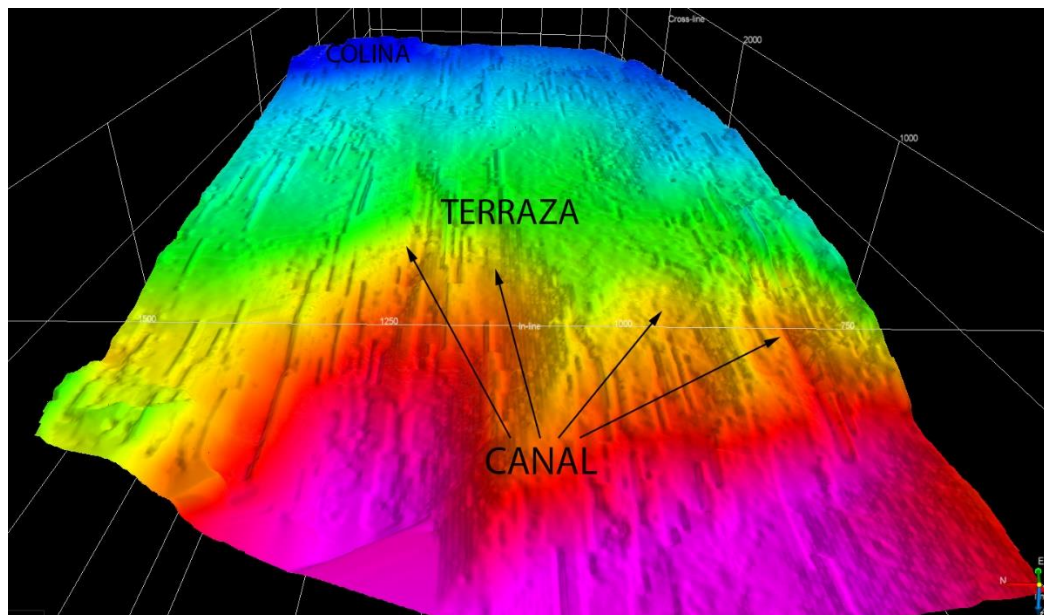


Figura 41. Geoformas identificadas en la superficie “S.D.E.20Hz”. Fuente: Autor.

6.3.1.3 Superficie identificada en el atributo instantáneo de amplitud

Con este atributo se resaltó las zonas de mayor amplitud y se seleccionó la amplitud donde se presenta mayor continuidad, esta superficie se denominó “S.I.AMPL.”. Además, esta superficie coincide con la superficie de energía y descomposición espectral, lo cual nos permitirá realizar una comparación (Figura 42).

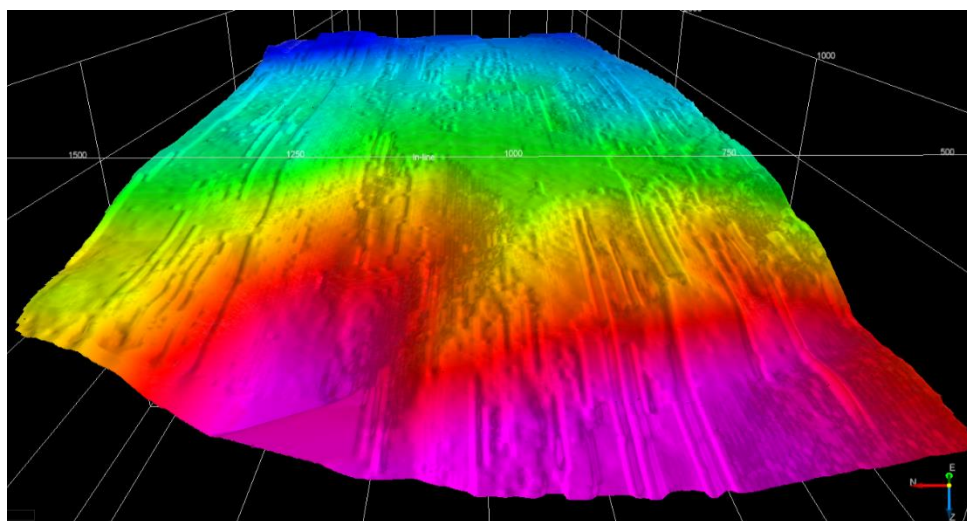


Figura 42. Superficie del paleohorizonte “S.I.AMPL.” identificado en el atributo instantáneo de amplitud. Fuente: Autor.

- **Geoformas:** Se identifica 3 geoformas en la superficie S.I.AMPL. Son las siguientes:
 - ✓ Canal: En esta superficie se encuentran dispersos los canales en toda el área del talud, resaltan los 4 canales más grandes de este talud, los canales son de forma alargada y de profundidad variadas (Figura 43).
 - ✓ Terraza: esta geoforma se caracteriza por ser de morfología plana o levemente inclinada (Figura 43).
 - ✓ Colina: En la zona más este de la superficie se resalta un montículo de tierra sobresaliente sobre el nivel base (Figura 43).

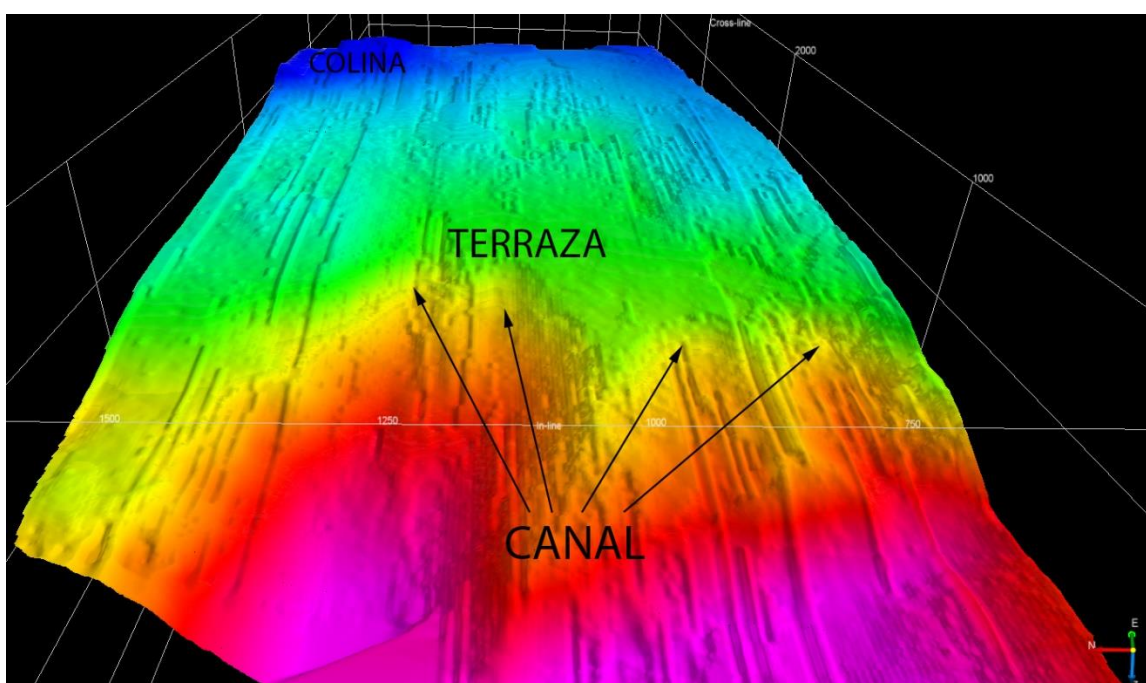


Figura 43. Geoformas identificadas en la superficie “S.I.AMPL”. Fuente: Autor

6.3.2 Paleohorizonte H4

6.3.2.1 Superficie identificada en el atributo de filtro de frecuencia

Con este atributo se mejoró las continuidades de algunas amplitudes y se seleccionó la amplitud donde se presentará una mejor continuidad, esta superficie se le denominó “S.F.F.B.” (Figura 44).

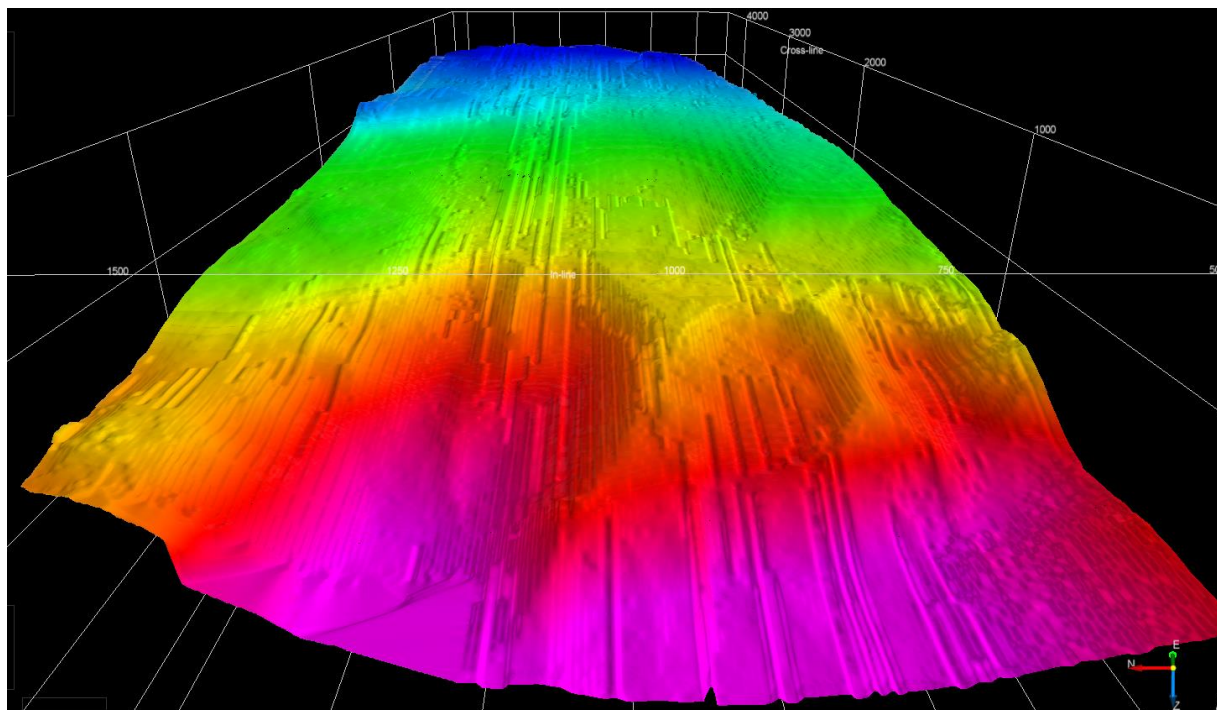


Figura 44. Superficie del paleohorizonte “S.F.F.B.” identificado en el atributo de filtro de frecuencia.
Fuente: Autor.

- **Geoformas:** Se identifica 3 geoformas en la superficie S.F.F.B. Son las siguientes:
 - ✓ Canal: En esta superficie se encuentran dispersos los canales en toda el área del talud, resaltan los 4 canales más grandes de este talud, los canales son de forma alargada y de profundidad variadas (Figura 45).
 - ✓ Terraza: esta geoforma se caracteriza por ser de morfología plana o levemente inclinada (Figura 45).
 - ✓ Colina: En la zona más este de la superficie se resalta dos montículos de tierra sobresaliente sobre el nivel base (Figura 45).

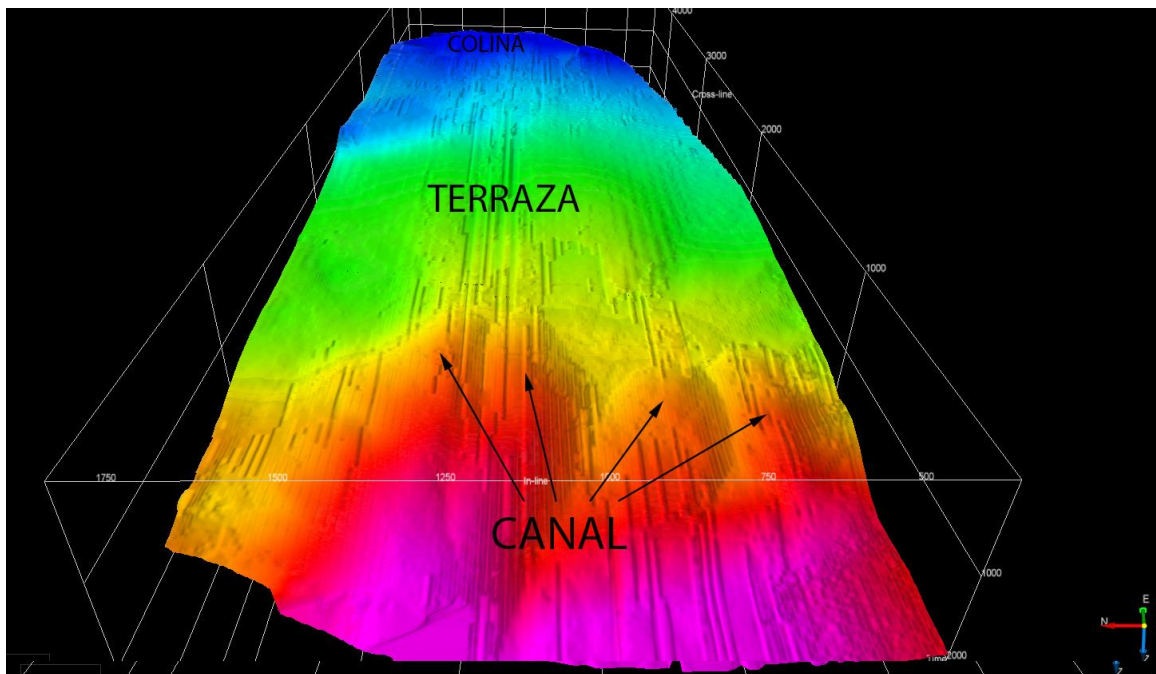


Figura 45. Geoformas identificadas en la superficie “S.F.F.B.”. Fuente: Autor.

6.3.2.2 Superficie identificada en el atributo de instantáneo de Hilbert

Con este atributo se mejoró en gran medida las continuidades de las amplitudes y se seleccionó la amplitud donde se presentará la mejor continuidad, aparte de que esta coincidía con el atributo de filtro de frecuencia lo cual nos ayuda a realizar una comparación en los resultados de las superficies de estos dos atributos, esta superficie se le denominó “S.I.HILBERT” (Figura 46).

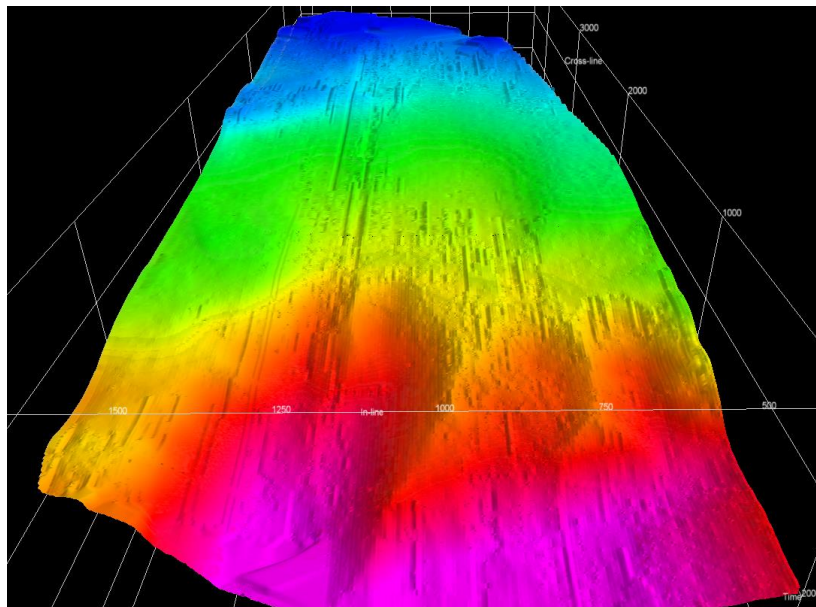


Figura 46. Superficie del paleohorizonte “S.I.HILBERT” identificado en el atributo instantáneo de Hilbert. Fuente: Autor.

- **Geoformas:** Se identifica 3 geoformas en la superficie S.I.HILBERT. Son las siguientes:
 - ✓ Canal: En esta superficie se encuentran dispersos los canales en toda el área del talud, resaltan los 4 canales más grandes de este talud, los canales son de forma alargada y de profundidad variadas (Figura 47).
 - ✓ Terraza: esta geoforma se caracteriza por ser de morfología plana o levemente inclinada (Figura 47).
 - ✓ Colina: En la zona más este de la superficie se resalta un montículo de tierra sobresaliente sobre el nivel base (Figura 47).

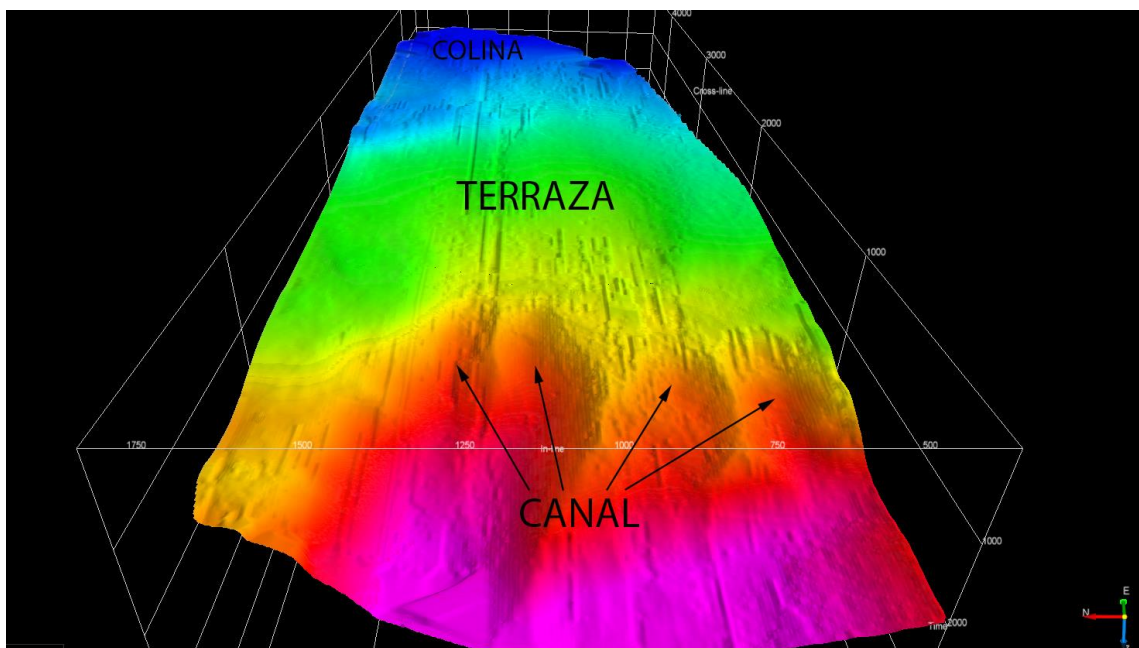


Figura 47. Geoformas identificadas en la superficie “S.I.HILBERT”. Fuente: Autor

6.4 Ambiente depositacional

En las superficies identificadas en los datos sísmicos y en los datos procesados con atributos sísmicos, se identificaron unas geoformas predominante en todas las superficies las cuales son características de ambientes marinos.

De forma específica se presenta una transición de ambientes de marinos someros a marinos profundos; las geoforma de terraza caracteriza un ambiente de plataforma externa, que hace parte de los subambientes marino somero y la pendiente del talud es característica de pendiente continental, que hace parte de los subambientes marino profundos.

6.5 Atributo de similaridad

En el análisis de los diversos atributos presentes en el software Opendtect, nos encontramos con un atributo que resaltaba las discontinuidades y fallas presente en la sísmica (Figura 48) de mejor forma que los otros atributos. Este atributo se basa en la comparación entre perfiles y entre más parecido sean los perfiles el resultado del cálculo de atributo tiende a

1, mientras menos se parezcan los perfiles este valor tiende a 0. El atributo se explica de forma más extendida en la sección 4.2.2.4.

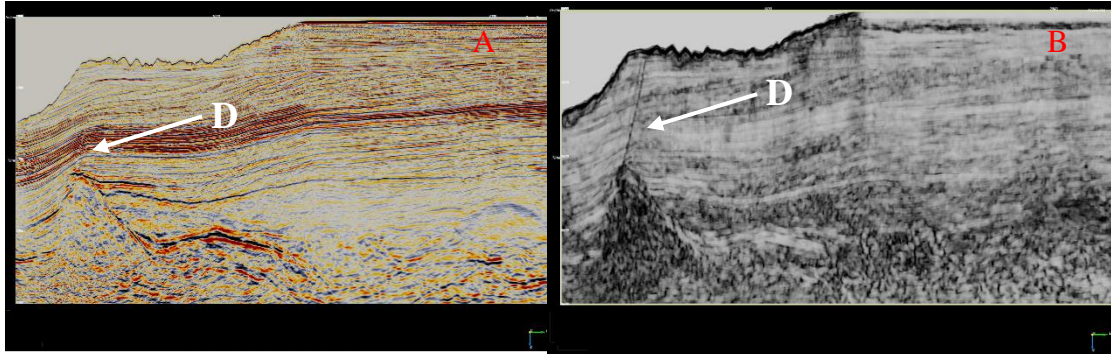


Figura 48. En las dos imágenes se resalta con la letra D la discontinuidad presente. A. Datos de sísmica original. B. Datos con el atributo de similaridad aplicado. Fuente: Autor.

7 Conclusiones

Se generó la superficie del fondo oceánico más detallada a partir del cubo sísmico en el área de interés, donde se pudieron caracterizar las geoformas presentes de cañón, terraza y colina. La resolución de la batimetría no permite identificar estas geoformas. Además, se analizaron imágenes de radar verificando que la resolución tampoco permite identificar estas geoformas debido a que las ondas electromagnéticas no son capaces de atravesar el espesor de la columna de agua.

El fondo oceánico obtenido de la sísmica permitió generar 3 geoformas de ambiente marino y un rasgo geomorfológico en la zona de estudio. La principal geoforma es una terraza que corresponde a la plataforma externa y abarca el 80% del área en el sentido E-O. Hacia el NW se identificó una colina y la zona oeste corresponde a la pendiente continental donde se puede identificar la geoforma de cañón y el rasgo geomorfológico de canales distributarios.

En el paleohorizonte H3 se utilizaron los atributos de energía, descomposición espectral e instantáneo de amplitud. donde se compararon los resultados de cada uno y el atributo instantáneo de amplitud mostró una mejor resolución de las geoformas canal, terraza y colina.

En el paleohorizonte H4 se utilizaron los atributos de filtro de frecuencia e instantáneo de Hilbert. Donde se compararon los resultados de cada uno y el atributo instantáneo de Hilbert mostró una mejor resolución de las geoformas de canal, terraza y colina.

Las superficies interpretadas tanto en sísmica, como en la aplicación de atributos sísmicos indican ambientes de depositación marino somero con una transición a ambientes de depositación marino profundo.

El tipo de secuencia estratigráfica entre los periodos de depositación de los paleohorizontes y el fondo marino es agradacional, donde se presenta un crecimiento de la plataforma en el sentido oeste-este.

8 Recomendaciones

Se recomienda el uso del atributo de similaridad para trabajos enfocados a la identificación de discontinuidades y fallas.

Se recomienda la utilización de datos sísmicos en futuras identificación de geoformas en el fondo oceánico y hacer posible un primer mapa de geoformas de todo el fondo oceánico colombiano del mar caribe.

9 Referencias Bibliográficas

- ANH. (2011). *PETROLEUM GEOLOGY OF COLOMBIA. Vol. 8.* UNIVERSITY EAFIT.
- Bates, R. L., & Jackson, J. A. (1987). *Glossary of Geology 3rd Ed.* . American Geological Institute, Alexandria, Virginia. p. 788.
- Bayona, G., Jimenez, G., Silva, C., Cardona, A., Montes, C., Roncancio, J., & Cordani, U. (2010). Paleomagnetic data and K/Ar ages from Mesozoic units of the Santa Marta Massif: A preliminary interpretation for block rotations and translations. *Journal of South American Earth Sciences, Vol. 29*, pp. 817-831.
- Brown, L. F. J., & Fisher, W. L. (1977). *Seismic stratigraphic interpretation of depositional systems: examples from Brazilian rift and pull apart basins. In Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration (C. E. Payton, Ed.)*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 26. pp. 213–248.
- Cardona, A., Weber, M., Wilson, R., Cordani, U., Muñoz, C. M., & Paniagua, F. (2007). *Evolución tectono-magmática de las rocas maficasultramáficas del Cabo de La Vela y el Stock de Parashi, Península de la Guajira: registro de la evolución orogénica Cretácica-Eocena del norte de Suramérica y el Caribe*. Paper presented at the XI Congreso Colombiano de Geología. 11p.
- Catuneanu, O. (2006). *Principles of sequence stratigraphy*. Edmonto, Canada: ELSEVIER.
- Cediel, F., Shaw, R., & Caceres, C. (2003). *Tectonic assembly of the Northern Andean block. In: The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation and Plate Tectonics (Ed. by C. Bartolini, R. Butler, and J. Blickwede)*, (Vol. 79). Memory AAPG. pp 815-848.
- Cerón, R. M., Castellanos, O. M., Barragán, M. F., Montenegro, G., Sánchez, C., Mora, C., . . . Martínez, A. (2009). Inventario, análisis e integración de la información técnica disponible de la Cuenca Guajira onshore para la elaboración de los paquetes técnicos y promocionales y acompañamiento en la ronda de áreas abiertas. . Universidad de Pamplona – ANH. 147 p.
- Collinson, J. D. (1969). The sedimentology of the Grindslow Shales and the Kinderscout Grit: a deltaic complex in the Namurian of northern England. *Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 39*, pp. 194–221.
- Chopra, S., & Marfurt, K. (2007). *Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization* (Vol. 11). States of America.
- Duque-Caro, H. (1984). Structural style, diapirism, and accretionary episodes of Sinu-San Jacinto terrane, southwestern Caribbean-borderland. In: Bonini, E., Hargraves, R.B., Sahgan, R. (Eds.), *The Caribbean–South American Plate Boundary and Regional Tectonicsm. Geological Society of America, Vol. 162*, pp. 303–316.
- Duque, H., & Reyes, R. (1999). Biostratigraphy study integrating seismic data of the Guajira region (onshore and offshore). *Volume 1, 137 p*.
- Ercilla, G., Alonso, B., Estrada, F., Chiocci, F., Baraza, J., & Farran, M. (2002a). The Magdalena Turbidite System (Caribbean Sea): present-day morphology and architecture model. *Marine Geology, Vol. 185*, pp. 303–318.
- Ercilla, G., Wynn, R. B., Alonso, B., & Baraza, J. (2002b). Initiation and evolution of turbidity current sediment waves in the Magdalena turbidite system. *Marine Geology, Vol. 192*, pp. 153–169.

- Estrada, F., Ercilla, G., & Alonso, B. (2005). Quantitative study of a Magdalena submarine channel (Caribbean Sea): implications for sedimentary dynamics. *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 22, pp. 623–635.
- Fajardo, A., & Rubiano, J. (1998). located in the onshore part of the Chimare Depression.
- Fisher, W. L., & McGowen, J. H. (1967). *Depositional systems in the Wilcox group of Texas and their relationship to occurrence of oil and gas.* . Gulf Coast Association Geological Society, Transactions 17, pp. 105–125.
- Flinch, J. F. (2003). *Structural evolution of the Sinu-Lower Magdalena area (Northern Colombia)*. In: Bartolini, C., Buffler, R.T., Blickwede, J. (Eds.), *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation, and Plate Tectonics* (Vol. 79). AAPG Memoir. pp. 776–796.
- Galloway. (1989). Genetic stratigraphic sequences in basin analysis, I. Architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. . *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 73, pp. 125-142.
- Godínez-Urban, A., Molina-Garza, R. S., Geissman, J. W., & Wawrzyniec, T. (2011). Paleomagnetism of the Todos Santos and La Silla Formations, Chiapas: Implications for the Opening of the Gulf of Mexico. *Geosphere*, Vol. 7.1, pp. 145-158.
- Gomez, I. (2001). *Structural style and evolution of the Cuiza Fault System, Guajira, Colombia*. Master thesis, University of Houston, Houston. 141 p.
- Gutierrez, M., & Osorio, C. (1988). Evaluación del potencial de hidrocarburos de la plataforma Chuchupa-Ballena, Cuenca de la Baja Guajira. *Reporte interno Ecopetrol. Inf. Geol.* 3132. Bogotá.
- Harms, J. C., & Fahnestock, R. K. (1965). Stratification, bed forms, and flow phenomena (with an example from the Rio Grande). In Primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation (G. V. Middleton, Ed.). *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists* pp. 84–115, *Special Publication 12*.
- Isabel, C., Restrepo, c., Germán, Y., & Ojeda. (2010). Geologic controls on the morphology of La Aguja submarine canyon. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 29, pp. 861–870.
- Miall, A. D. (1990). Principles of Sedimentary Basin Analysis. *Springer, Second Edition*.
- Miall, A. D. (1995). *Whither stratigraphy?* *Sedimentary Geology*, Vol. 100, pp. 5–20.
- Miall, A. D. (1997). The Geology of Stratigraphic Sequences. *Springer-Verlag*, p. 433.
- Middleton, G. V. (1973). *Johannes Walther's Law of the Correlation of Facies*. (Vol. 84). Geological Society of America Bulletin. p. 979–988.
- Mitchum, R. M., Jr. (1977). *Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 11: glossary of terms used in seismic stratigraphy*. In *Seismic Stratigraphy–Applications to Hydrocarbon Exploration* (C. E. Payton, Ed.). American Association of Petroleum Geologists Memoir 26. pp. 205–212. .
- Mora, & Martinez, J. I. (2005). Sedimentary metal ratios in the Colombia Basin as indicators for water balance change in northern South America during the past 400,000 years. *Paleoceanography*. Vol.20. doi: 10.1029/2005PA001132,2005
- Morales, D., Rocha, V., & Posada, B. (2017). Geomorfología de los fondos submarinos del Parque Nacional Natural Corales de Profundidad, mar Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras Bulletin of Marine and Coastal Research*, 46 (2), pp. 73-90.

- Nova, G., Montaña, P., bayona, G., Augusto, R., & Montes, C. (2012). PALEOMAGNETISMO EN ROCAS DEL JURÁSICO Y CRETÁCICO INFERIOR EN EL FLANCO OCCIDENTAL DE LA SERRANÍA DEL PERIJÁ; CONTRIBUCIONES A LA EVOLUCIÓN TECTÓNICA DEL NW DE SURAMERICA. *Boletín de Geología*, Vol. 34, pp. 117-139.
- Payton. (1977). Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration. *American Association of Petroleum Geologists Memoir* 26. p. 516.
- Pindell, J. L., & Kennan, L. (2009). Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update. In: James, K., Lorente, M. A., and Pindell, J. (eds) *The Origin and Evolution of the Caribbean Plate. Geological Society, London, Special Publications*, 328, pp. 1-54.
- Posamentier, H. W., & Allen, G. P. (1999). *Siliciclastic sequence stratigraphy: concepts and applications*. SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology No. 7, p. 210.
- Posamentier, H. W., Allen, G. P., James, D. P., & Tesson, M. (1992). *Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples, and exploration significance*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin Vol. 76, pp. 1687–1709.
- Posamentier, H. W., Jervey, M. T., & Vail, P. R. (1988). Eustatic controls on clastic deposition I – conceptual framework. In *Sea Level Changes—An Integrated Approach* (C. K. Wilgus, B. S. Hastings, C. G. St. C. Kendall, H. W. Posamentier, C. A. Ross and J. C. Van Wagoner, Eds.). *SEPM Special Publication* 42., pp. 110–124.
- Rubiano, J. (1998). Evaluación Regional Cuenca Baja Guajira. *Instituto Colombiano del Petróleo, División de Exploración y Producción, Ecopetrol*, 109 p.
- Rummerfeld, B. (1954). *Reflection quality, a fourth dimension: Geophysics* (Vol. 19). pp. 684-694.
- Santamaria, F., & Schubert, C. (1974). Geochemistry and geochronology of the southern.
- Sarmiento-Rojas, L. F. (2002). *Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes. Inferences from tectonic models.*, PhD Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam. 295p.
- Shell. (1998). Evaluation of the Colombian Caribbean Offshore. Guajira Region Phase II., vol. 5; 248 p.
- Shepard, F. (1973). Sea floor off Magdalena Delta and Santa Marta Area, Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 84, pp. 1955–1972.
- Simons, D. B., Richardson, E. V., & Nordin, C. F. (1965). Sedimentary structures generated by flow in alluvial channels. In *Primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation* (G. V. Middleton, Ed.). *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists pp. 34-52., Special Publication* 12.
- Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., & Mora, H. P. (2002). Wide plate margin deformation, Southern Central America and Western South America, CASA GPS observation. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 15, pp. 157–171.
- Tschanz, C. M., Marvin, R. F., Cruz, B. J., Menhert, H. H., & Cebula, G. T. (1974). Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, northeastern Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, v. 85, p. 273-284.
- USGS (Cartographer). (2000). Map of Quaternary Faults and Folds of Colombia and its Offshore Regions. Compiled by Gabriel Paris. Esc. 1: 2.500.000.

- Vence, E. (2008). *Subsurface structure, stratigraphy, and regional tectonic controls of the Guajira margin of northern Colombia*. (Master of Sciences in Geological Sciences Thesis), University of Texas at Austin. 128p.
- Wagoner, V. (1995). Overview of sequence stratigraphy of foreland basin deposits: terminology, summary of papers, and glossary of sequence stratigraphy. In *Sequence Stratigraphy of Foreland Basin Deposits* (J. C. Van Wagoner and G. T. Bertram, Eds.). *American Association of Petroleum Geologists., Memoir 64.*, pp. ix-xxi.
- Walker, R. G. (1992). Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In *Facies Models: Response to Sea Level Change* (R. G. Walker and N. P. James, Eds.). *Geological Association of Canada, GeoText 1*, pp. 1–14.
- Walther, J. (1894). Anfänge der deutschen Meeresgeologie. *Zeitschrift der geologischen Gesellschaft*, Vol I, p 856-860.

10 Referencias electrónicas

- ANH. (2010). *Mapas de cuencas Colombianas*. <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Paginas/Mapa%20de%20Cuencas.aspx>.
- DGB, E. S. (2002). Attributes and Filters. *file:///C:/Program%20Files/OpenTect/6.0.0/doc/od_userdoc/Default.htm#appendix_a-attributes_and_filters.htm*.
- Kramer, K. V., & Shedd, W. W. (2017). A 1.4-billion-pixel map of the Gulf of Mexico seafloor. from <https://doi.org/10.1029/2017EO073557>.