



Vigilada Mineducación

SEGMENTACIÓN ESTRUCTURAL DEL PLANO DE SUBDUCCIÓN DE LA
PLACA CARIBE EN LAS CUENCAS GUAJIRA Y SINÚ OFFSHORE

Structural segmentation of the Caribbean plate subduction plane in the Guajira and Sinú
Offshore basins

SERGIO ALEJANDRO PORRAS MORALES

VALENTINA ALZATE RUBIO

Trabajo de grado

Asesores

PhD José Fernando Duque Trujillo

PhD Alejandro Iván Beltrán Triviño

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
GEOLOGÍA

Segmentación estructural del plano de subducción de la placa Caribe en las cuencas Guajira y Sinú Offshore

Sergio Alejandro Porras Morales, Valentina Alzate Rubio

Asesores: PhD José Fernando Duque Trujillo – PhD Alejandro Iván Beltrán Triviño

1. Resumen

Evidencias como la actividad sísmica, rasgos geomorfológicos como el diapirismo y vulcanismo de lodo, prismas acrecionarios y el análisis de datos geodéticos, etc. indican que el Caribe Colombiano está segmentado estructuralmente y que continúa operando una zona de subducción en un margen convergente oblicuo. Para verificar lo anterior, se llevó a cabo interpretación sísmica, modelamiento de superficies y cálculo de soluciones de mecanismos focales en el área comprendida entre las cuencas Sinú *offshore* y Guajira *offshore*. Los productos obtenidos reflejan diferentes regímenes de esfuerzo desde transtensivos a transpresivos a lo largo de la zona de estudio, dentro de la misma configuración tectónica convergente, cuya segmentación es representada por la zona de la Sierra Nevada de Santa Marta entre el sistema de fallas de Cuiza y el lineamiento en *offshore* del sistema de fallas Santa Marta-Bucaramanga. Por lo tanto, se pudo determinar que en el Caribe colombiano el plano de subducción de la placa Caribe se encuentra segmentado y subduciendo con una geometría compleja y de bajo ángulo bajo la placa Suramérica.

Abstract

Evidence such as seismic activity, geomorphological features such as diapirism and mud volcanism, accretionary prisms and the analysis of geodetic data, etc. indicate that the Colombian Caribbean is structurally segmented and that a subduction zone continues operating in an oblique convergent margin. To verify the above, seismic interpretation, surface modeling and calculation of focal mechanism solutions were carried out in the area between the offshore Sinú and offshore Guajira basins. The products obtained reflect different stress regimes from transtensive to transpressive throughout the study area, within the same convergent tectonic configuration, whose segmentation is represented by the Sierra Nevada de Santa Marta area between the Cuiza fault system and the *offshore* lineament of the Santa Marta-Bucaramanga fault system. Therefore, it was determined that in the Colombian Caribbean the subduction

plane of the Caribbean plate is segmented and subducting at different shallow angles under the South American plate.

2. Introducción

La subducción de la placa Caribe bajo la placa Suramérica no presenta características típicas en superficie como arcos magmáticos, vulcanismo (e.g. Hamilton, 1994; McCulloch y Gamble, 1991), o cabalgamiento de secuencias ofiolíticas como es el caso de la Cordillera Occidental y hacia el sur del continente (e.g. Guajira et al., 2012; Lewis et al., 2006; Montes et al., 2019; Moores, 1998) dado su bajo ángulo de convergencia (e.g. Galindo y Lonergan, 2020; Kellogg et al., 2005; Pindell et al., 2005). Por lo tanto, se hace necesario el modelamiento a mayor detalle que permita comparar los modelos ya propuestos e investigaciones realizadas a mayor escala (e.g. Montes et al., 2019; Piraquive, 2017; SanchezRojas y Palma, 2014), para verificar o generar nuevas propuestas respecto a su morfología y convergencia.

La placa Caribe está limitada por las placas Norteamérica, Suramérica (Bloque de los Andes del Norte), Cocos y Nazca (Bloque Panamá-Chocó) (Cortés y Angelier, 2005), estos límites se caracterizan por ser zonas complejas de colisión, subducción y deformación *strike-slip* (Galindo, 2016). Para el Caribe *offshore* colombiano se encuentran numerosos trabajos que integran métodos geofísicos, como la generación de perfiles sísmicos de refracción y reflexión, descripción de núcleos de perforación (Mora Bohórquez, 2018), gravimetría, cálculo de mecanismos focales y análisis de datos geodéticos a nivel regional (Arcila y Muñoz–Martín, 2020). A partir de lo cual, se han propuesto diferentes modelos que establecen un marco temporal para la dinámica tectónica, el movimiento vectorial de las placas, su deformación, los ambientes y procesos de sedimentación en estas cuencas (Boschman et al., 2014; Cortés y Angelier, 2005; Escalona y Mann, 2011; Higgs et al., 2015; Londono et al., 2015; Montes et al., 2019; Pindell et al., 2005; Pindell y Kennan, 2009).

En este proyecto, a partir del modelamiento y evaluación de la subducción de la placa Caribe en la esquina noroccidental del bloque de los Andes del Norte, se encontró que evidencias como la actividad sísmica, rasgos geomorfológicos como el diapirismo y vulcanismo de lodo, desarrollo de prismas acrecionarios (e.g. Frunzeti et al., 2012; Kellogg et al., 2005; TrejosTamayo et al., 2020), y el análisis de mecanismos focales (Arcila y Muñoz–Martín, 2020; Cortés y Angelier, 2005; Galindo, 2016; Mora-Páez et al., 2019), permitieron reconstruir la configuración geométrica de la placa Caribe en subducción bajo la placa Suramérica, en el Caribe colombiano.

3. Marco tectónico

El área de estudio comprende las cuencas de la Guajira *offshore* y Sinú *offshore* en el Caribe colombiano (Figura 1). La cuenca Guajira se ubica en el extremo norte de Colombia, tanto *onshore* como *offshore*, en una configuración tectónica dominada por dos fallas de rumbo dextrales de escala regional (Oca y Cuiza) (Ramirez et al., 2015).

La cuenca Sinú *offshore* se ubica al NW de Colombia, entre el sistema de fallas de Romeral al E, la falla de Oca al N, el frente de deformación del Cinturón del Caribe al NW, y la Cordillera Occidental al S (Lozano y Zamora, 2014). Esta es una zona cuya evolución geológica se relaciona estrechamente con los eventos tectónicos derivados de la interacción entre las placas Suramérica (Bloque de los Andes del Norte) y Caribe, la placa Nazca y el Bloque Panamá-Chocó, que han generado áreas tectónicas como el prisma de acreción, con pliegues de crecimiento y diapirismo de lodo; la cuña de acreción de Sinú-Colombia y la cuenca de *back arc* San Jorge-Plato (Aguilera, 2011).

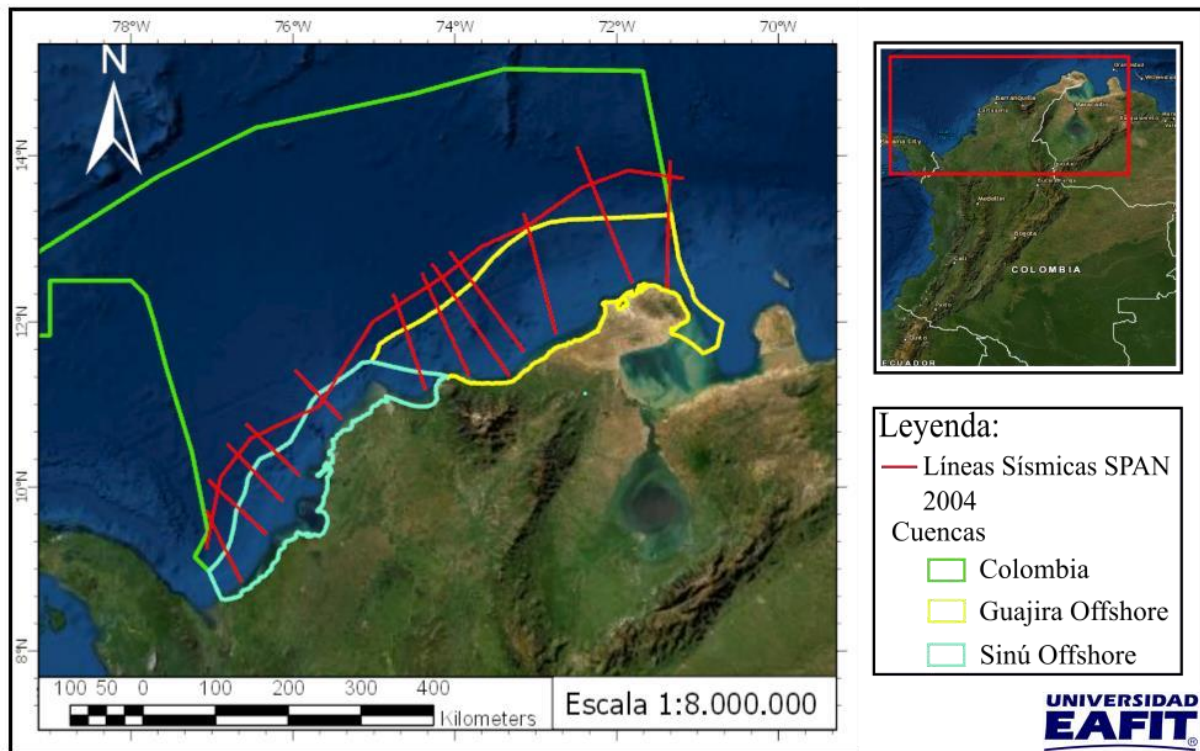


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio, correspondiente a las cuencas Guajira offshore y Sinú offshore del Caribe colombiano.

3.1 Modelo alóctono: Origen Pacífico de la placa Caribe

En la actualidad, la configuración tectónica al norte de Suramérica es el producto de la compleja interacción entre las placas tectónicas Nazca, Caribe y Suramérica, y los bloques de los Andes del Norte y Panamá-Chocó (Mora-Bohórquez et al., 2017) (Figura 2). Siendo la placa Caribe objeto importante de discusión dado su papel en los regímenes tectónicos y su origen y formación. Romito y Mann (2021) proponen y sintetizan un modelo de origen en el Pacífico para la placa Caribe (Figura 3), el cual consta de tres etapas tectónicas principales. En la primera, Pangea se separa desde los 210 hasta 140 Ma y forma las placas Norteamérica, Suramérica y África. En la segunda, la rotación en sentido antihorario del bloque Yucatán en el Jurásico Tardío acompaña la formación de la corteza oceánica en la parte central del Golfo de México. En la tercera, la extensión del suelo oceánico durante el Jurásico y Cretácico expande el corredor marino del proto Caribe oceánico entre Norteamérica y Suramérica, y permite así la entrada de arcos de isla y terrenos continentales. Además de la formación del Terreno Siuna que se inició hace aproximadamente 140-190 Ma al mismo tiempo que múltiples zonas de subducción que limitaron la placa Farallón y la placa proto Caribe (Escuder-Viruete et al., 2016).

Por lo tanto, para el Cretácico Tardío, el *Caribbean Large Igneous Province* (CLIP) se pudo haber formado sobre una pluma del manto que ascendió y se derramó en la corteza oceánica de Farallón, a la cual se le atribuye una edad Cretácica también (Pindell y Kennan, 2009). Con esto se formaría el primer arco alóctono que colisionó a lo largo de los Andes (Montes et al., 2019). Además, en las diferentes fases eruptivas identificadas, se observan un espesor cortical variable o anómalo del CLIP, el cual va de 8 a 20 km, diferencias en el carácter acústico del basamento y *seamounts* volcánicos que se extienden hasta el *Lower Nicaraguan Rise* (LNR) (IdárragaGarcía y León, 2019).

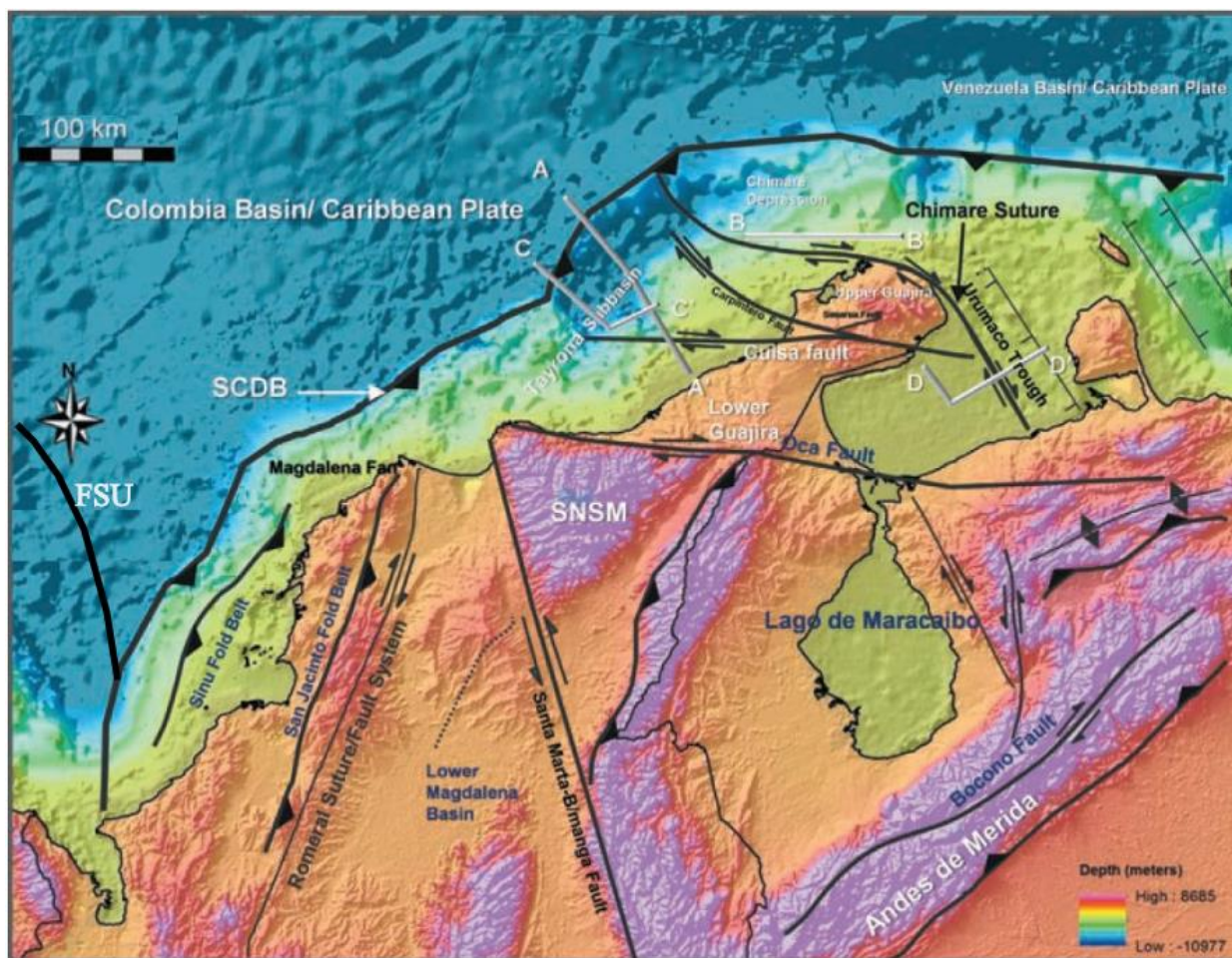


Figura 2. Principales estructuras de la zona de estudio. SNSM Sierra Nevada de Santa Marta, SCDB Cinturón deformado del sur del Caribe, Cinturón Plegado de Sinú, FSU Sistema de Fallas de Uramita, cuenca Tayrona y cuenca Ranchería. Modificado de Londoño et al. (2015).

Como resultado del desplazamiento hacia el E de la placa Farallón respecto a las Américas durante el Mesozoico y la inserción de su borde occidental entre las Américas (placa Caribe), una gran zona de fractura lateral derecha se desarrolló a lo largo del borde norte del Bloque de los Andes del Norte, mientras la subducción-obducción y acreción de la corteza oceánica ocurrían al W de Colombia en el Cretácico (Montes et al., 2019).

Durante este desplazamiento hacia el E respecto a Suramérica, la placa Caribe llevaba el remanente del arco magmático oceánico de Panamá, el cual finalmente colisionó contra el límite W de los Andes del Norte en el Mioceno (Duque-Caro, 1990; Kellogg et al., 2005). Esta colisión es tomada como uno de los mecanismos que condujeron la fase Andina en Colombia. La placa Farallón se rompió durante el Mioceno por el efecto del punto caliente de los Galápagos, dando lugar a las placas Cocos y Nazca, las cuales subducen bajo SA y CA (Cortés y Angelier, 2005).

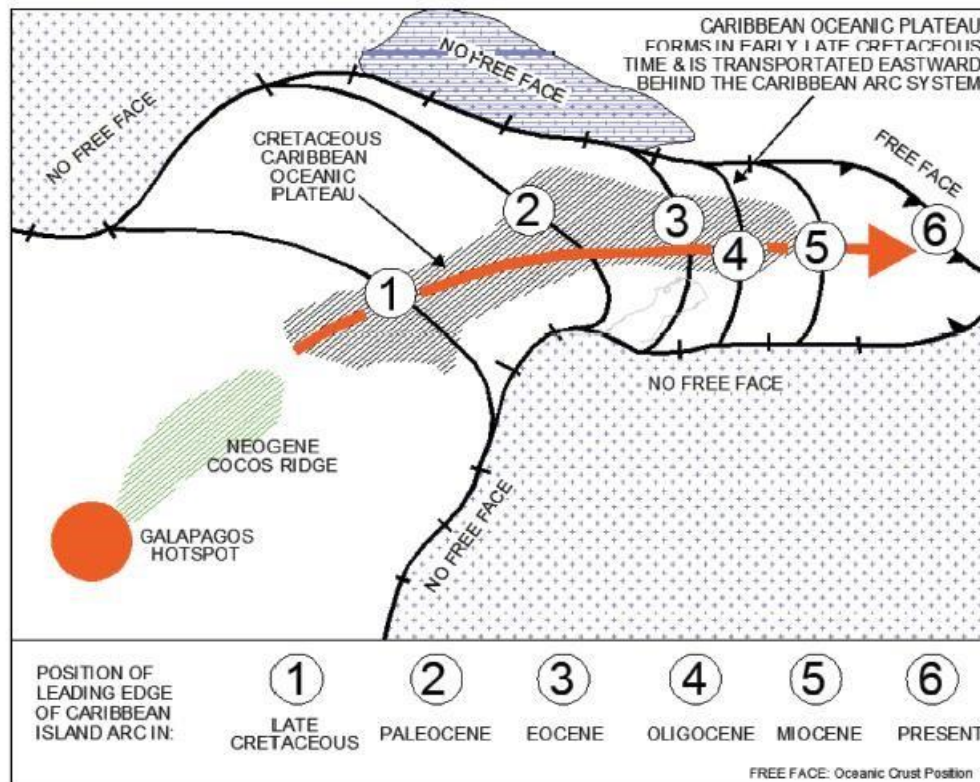


Figura 3. Modelo del origen pacífico de la placa Caribe y su migración. Tomado de Romito y Mann (2021).

3.2 Bloque Panamá-Chocó

Duque-Caro (1990) define al bloque Panamá-Chocó como un terreno exótico sin afinidad litogenética con Suramérica, acresionado al continente durante el Mioceno. La sutura que pone en contacto este bloque con el margen continental se conoce como la Zona de Falla de Uramita. El bloque Panamá-Chocó al estar despegado de la placa Caribe, colisiona activamente contra los Andes del Norte, mientras el bloque Santa Marta-Maracaibo está despegado del Escudo de Guyana (Montes et al., 2019).

3.3 Cinturón deformado del sur del Caribe

Los movimientos y el desarrollo de la interacción de estas placas han generado la formación de importantes cuerpos plegados o deformados a lo largo del *offshore* del Caribe Colombiano. De acuerdo a Naranjo-Vesga et al. (2020), la placa Caribe mantiene su movimiento hacia el NE respecto a la placa Suramérica, y la convergencia oblicua entre estas dos ha permitido el desarrollo del Cinturón Deformado del Caribe Sur (SCDB) en el *offshore* del norte de Colombia. La vista en planta del SCDB se muestra con una forma convexa que genera variaciones a lo largo del rumbo en los estilos estructurales (Aguilera, 2011; Ladd et al., 1984).

El sur del SCDB corresponde al Cinturón Plegado de Sinú, el cual consiste de un prisma acrecionario de sedimentos del Cenozoico Tardío, el cual es limitado al este por el lineamiento de Sinú (Idárraga-García et al., 2019; Kellogg et al., 2005; Naranjo-Vesga et al., 2020; Toto y Kellogg, 1992). Su levantamiento y deformación se iniciaron en el Cenozoico Tardío y ha continuado hasta el presente con una etapa de deformación durante el Plioceno-Pleistoceno asociada a la Orogenia Andina (Lozano y Zamora, 2014). El delta submarino del Magdalena divide el cinturón plegado del Sinú en Norte y Sur (Idárraga-García et al., 2019). Estos deltas submarinos se caracterizan por su progradación hacia el mar y su construcción en el lecho marino, considerándose como las acumulaciones de sedimento más grandes del planeta (Deptuck y Sylvester, 2018).

3.4 Sierra Nevada de Santa Marta

La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) es un macizo triangular aislado, el cual limita con la falla sinistral de Santa Marta-Bucaramanga con tendencia NW-SE, al SW (Ceron-Abril, 2008; Galindo, 2016; Montes et al., 2010), la falla dextral de Oca al N, la serranía del Cerrejón al SE y la sutura de Romeral o falla de Sinú-San Jacinto al SW (Montes et al., 2010) (Figura 2). Su levantamiento se ha interpretado como el resultado de la interacción entre el plateau del Caribe y el bloque Maracaibo, que posee un desplazamiento lateral (Galindo, 2016).

Piraquive (2017) propone un modelo de evolución y levantamiento para la SNSM que comienza en el Pérmico Medio-Inferior durante el que se desarrolló el arco Perigondwanico y ocurre el primer ciclo sedimentario en una plataforma carbonatada a medida que se desarrollaba una extensión por *rollback*. Siguiendo con diversas fases orogénicas, metamórficas y sedimentarias. Y en el Cretácico Tardío, este modelo evolutivo finaliza con la colisión y obducción del Gran Arco del Caribe contra el margen noroccidental de Suramérica (Londono et al., 2015; Vence, 2008) despegando la SNSM de la corteza continental y removiendo su raíz (Figura 4).

Esta propuesta de la SNSM sin raíz cortical se puede explicar mediante tres escenarios. El primero consiste del soporte flexural por el slab hundido, el segundo consiste del ascenso del Moho bajo la SNSM y el tercero, ya mencionado, consiste del despegue tectónico del Bloque Maracaibo en la parte superior de la placa Caribe, con dirección NW (Ceron-Abril, 2008). Sin embargo, en la actualidad persiste la discusión sobre su carácter rotatorio y la configuración de su raíz, es decir, si es un bloque despegado por la obducción o si continúa atada a la corteza continental, y su relación con las cuencas que la rodean (Montes et al., 2010; Piraquive, 2017).

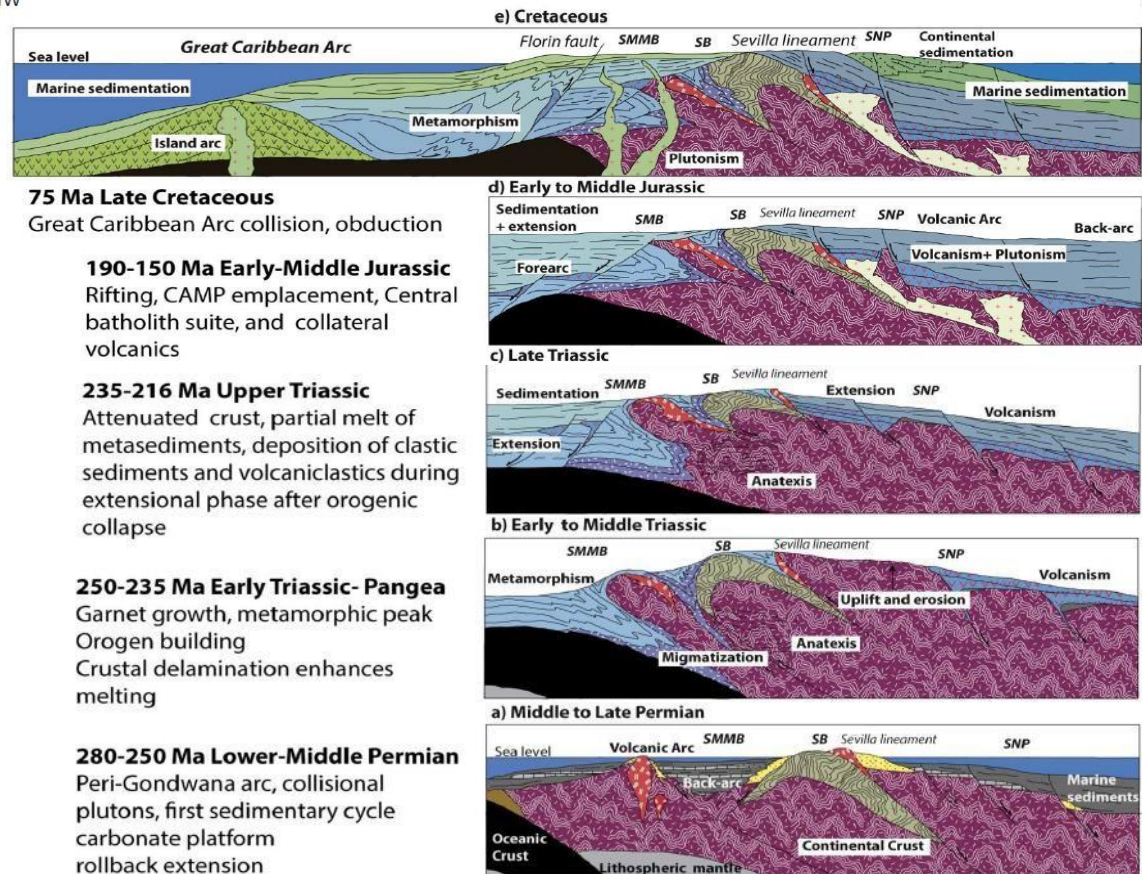


Figura 4. Modelo de evolución de la Sierra Nevada de Santa Marta propuesto por Piraquive (2017).

3.5 Gran Arco del Caribe (GAC)

Como lo resume Vence (2008) en su tesis de maestría, el Gran Arco del Caribe es un arco volcánico de edad Cretácica Temprana que continúa hasta el presente. Sus rocas se pueden encontrar en un cinturón semicontinuo que se extiende desde el norte de Centroamérica hasta el norte de Suramérica por 4200 km, y se encuentra enterrado en la zona del *offshore* colombiano. Debido a esta migración del GAC, al colisionar con los márgenes continentales de Suramérica, la actividad plutónica y volcánica se detuvo en el Eoceno Medio, y se desarrollaron los sistemas de fallamiento de rumbo E-W.

4. Datos y Metodología

Este proyecto integra datos de reflexión sísmica 2D del programa SPAN 2004, el cual consta de 13 líneas sísmicas equivalentes a 2512 km, con sismos y mecanismos focales. La sísmica es de carácter libre y fue descargada del repositorio de la Agencia Nacional de Hidrocarburos, los sismos fueron obtenidos a través del Catálogo Sísmico Nacional del Servicio Geológico

Colombiano. La información corresponde a las cuencas Guajira *offshore* con un área de 5.27 km² y de Sinú *offshore* con un área de 2.95 km², abarcando un área total de 8.22 km².

Las 13 líneas sísmicas empleadas en este proyecto tienen un procesamiento *Pre-Stack Depth Migration* (PSDM) previo, cuentan con una profundidad total de 21 km y una extensión que varía desde 80 km a 190 km en las líneas de buzamientos y de 871 km la línea de rumbo.

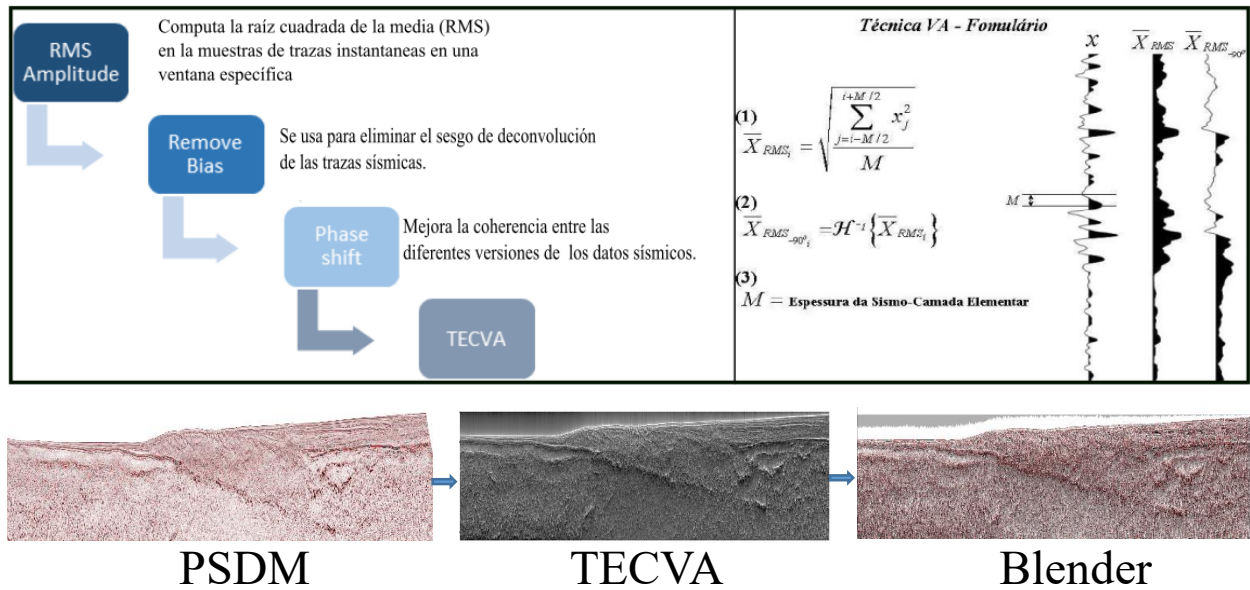
Fase 1

La recopilación de información se llevó a cabo consultando bibliografía sobre la tectonoestratigrafía y geología estructural de la región, que permitiera identificar un marco temporal de los eventos ocurridos en la zona de estudio y las líneas sísmicas que otros autores han procesado. Para obtener los eventos sísmicos de las cuencas Guajira y Sinú *offshore*, se consultó el Catálogo Sísmico del Servicio Geológico Colombiano, del cual es posible descargar los registros de primer arribo de la onda, con sus coordenadas, magnitud y profundidad (Figura 5).

Fase 2

Previo a la interpretación 2D de las líneas se realizó el control de calidad de los datos revisando sus coordenadas, profundidades, unidades de medida y resolución. La interpretación sísmica se llevó a cabo usando el procedimiento estándar de interpretación sísmica, es decir, el mapeo de las superficies y los principales sistemas de fallas, el cual se basa en la amplitud, continuidad, frecuencia y geometría de los reflectores sísmicos que son producto de la impedancia y frecuencia de las ondas sísmicas en el subsuelo (Alfaro y Holz, 2019). Se aplicó el atributo sísmico *The volume amplitude technique* (TecVa) (Ec. 1), el cual es resultado de la unión de un conjunto de atributos sísmicos, que al asociarse resultan en una sección con reflectores que pueden reconocerse más fácilmente, al resaltar las amplitudes más profundas y generar un mayor contraste entre las impedancias (Nunes et al., 2017). De esta manera se pudieron destacar los reflectores correspondientes a la placa Caribe, y a los principales sistemas de fallas en la zona de estudio (Figura 5).

Ecuación 1. Fórmula del atributo TecVa. Tomado y modificado de Bulhões y Amorim (2005) y Nunes et al. (2017)



Fase 3

La generación de la batimetría y los mapas estructurales de la placa Caribe, el basamento de la cuenca Guajira *offshore* y Sinú *offshore*, se realizó aplicando el algoritmo *Convergent Interpolation*, que se ajusta mejor a los diferentes estilos estructurales, con un tamaño de celda de 100 m x 100 m debido a la capacidad de cómputo, el cual toma un conjunto de puntos distribuidos aleatoriamente y los computa a través de iteraciones convergentes a una resolución de cuadrícula sucesivamente más fina, generando un modelo de alta calidad que representa la información introducida (Yattselev, 2018) (Figura 5).

Fase 4

Se descargaron 942 eventos sísmicos ocurridos en el área de las dos cuencas desde el año 1993 hasta 2018, los cuales se filtraron según su magnitud y profundidad para calcular la solución de mecanismos focales. Los sismos con magnitud mayor a 4Mw y profundidad menor a 21 km se procesaron en el software SEISAN (e. g. Havskov et al., 2020), donde se picaron los arribos de las ondas *p* según su polaridad. Las polaridades negativas se observan en picos de onda en el cuadrante distensivo, mientras las polaridades positivas se observan en picos de onda en el cuadrante compresivo (Delvaux et al., 1997). Mediante el monitoreo de los márgenes de error para el *strike*, *dip* y *rake* que arroja el software, se controlaba la exactitud de los resultados.

Para generar las gráficas de mecanismos focales de la zona, los datos de *strike*, *dip* y *rake* obtenidos en SEISAN, se integraron en el software WinTensor (Delvaux y Sperner, 2003). Aquellos sismos que no fueron aptos para generar un mecanismo focal, por magnitud menor a 4 Mw o profundidad mayor a 21 km, se tomaron en consideración para observar de forma general la actividad sísmica asociada al régimen de esfuerzos.

En ArcGis Pro se clasificaron y plotearon los sismos de acuerdo a su magnitud, se exportaron y se ubicaron en profundidad respecto al modelo de elevación digital (DEM) continental de la zona, obtenido en <http://viewfinderpanoramas.org/>, con tamaño de celda de 90x90 m. Los gráficos de los mecanismos focales se georreferenciaron en el mapa de la zona para visualizarlos y analizar su correspondencia con la actividad tectónica y el régimen de esfuerzos (Figura 5).

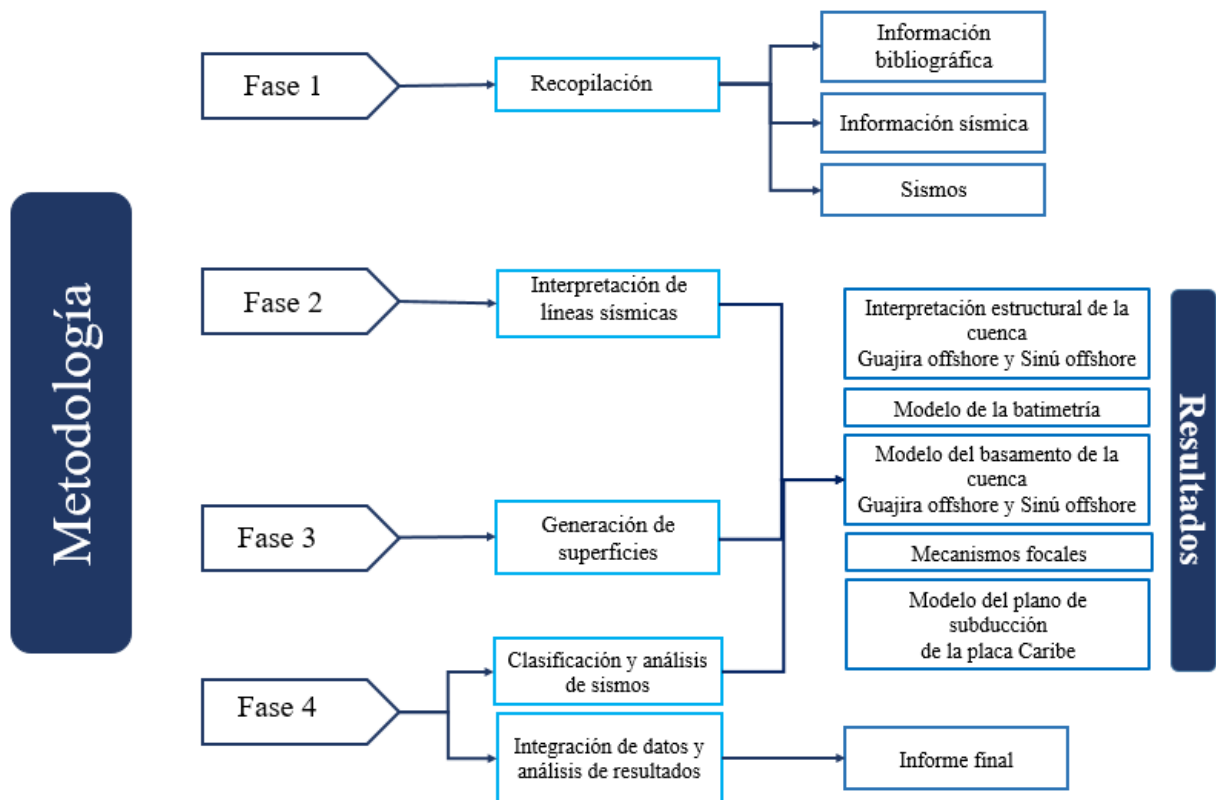


Figura 5. Metodología del proyecto, desarrollado en cuatro fases.

5. Resultados

5.1 Estilos estructurales

5.1.1 Cuenca Guajira offshore

En esta cuenca se definieron dos familias de fallas, de acuerdo con dos estilos estructurales predominantes y su ubicación. El primero asociado a las cuencas Tayrona y Ranchería, y el segundo asociado al Cinturón deformado del sur del Caribe.

5.1.1.2 Familia de fallas 1

Esta familia representa a las fallas más antiguas de la zona debido a su relación estratigráfica con las secuencias que las suprayacen y que no cortan. Estas fallas corresponden a fallas transtensivas que forman estructuras como *grabens* y *half graben*. En algunas zonas, este grupo de fallas está relacionado a los sistemas de Fallas de Cuiza y Oca en el *onshore*.

Esta familia se encuentra distribuida principalmente en las cuencas Tayrona en la parte baja y Ranchería en la parte alta de la cuenca Guajira *offshore*. En la cuenca Tayrona, desde la figura 6 a la figura 9, estas fallas alcanzan profundidades de 10 km en el sur y 15 km en el norte, presentando desplazamientos verticales de hasta 2000 m en algunas zonas, pero teniendo una predominancia en desplazamientos verticales de cientos de metros a lo largo de la cuenca.

En la cuenca Ranchería, estas fallas forman estructuras donde los *grabens* se hacen más angostos y presentan profundidades de hasta 6 km hacia el sur de esta cuenca (Figura 10). Mientras que hacia el norte, estas estructuras alcanzan una profundidad de 12 km y presentan un desplazamiento vertical de hasta 2650 m (Figura 11).

5.1.1.3 Familia de fallas 2

Esta familia de fallas corresponde a un régimen de esfuerzos más reciente debido a su relación estratigráfica cortando las secuencias superiores, exhiben un buzamiento predominante hacia el SE, presentan un despegue en la parte basal, asociado a la subducción de la placa Caribe, generando así un sistema dúplex imbricado hacia el NW correspondiente al Cinturón Deformado del Sur del Caribe, que se puede observar de la figura 6 a la figura 12. Hay una mayor densidad de fallas hacia el norte mientras hacia el sur disminuye la densidad y se hacen más profundas.

5.1.1.4 Sistemas de fallas de Cuiza y Oca

Los sistemas de fallas de Oca y Cuiza tienen una cinemática dextral, cuyo desplazamiento se puede observar tanto en *onshore* como *offshore*. En la línea sísmica SPAN 2600 (Figura 6) ubicada en el límite de la cuenca Guajira offshore y Sinú offshore se encuentra un depocentro importante al este de la cuenca Tayrona, el cual se asocia a la actividad de la falla de Oca y al cañón submarino de La Aguja (Restrepo-Correa y Ojeda, 2010). Las fallas normales de este depocentro alcanzan los 15 km de profundidad y se observan desplazamientos de 2000 m (Figura 7). La falla de Cuiza se puede seguir desde el continente hasta las líneas SPAN 3600 (Figura 10) y SPAN 3200 (Figura 9) en el *offshore*, este sistema de fallas presenta una profundidad de 8000 m y un desplazamiento promedio de 300 m.

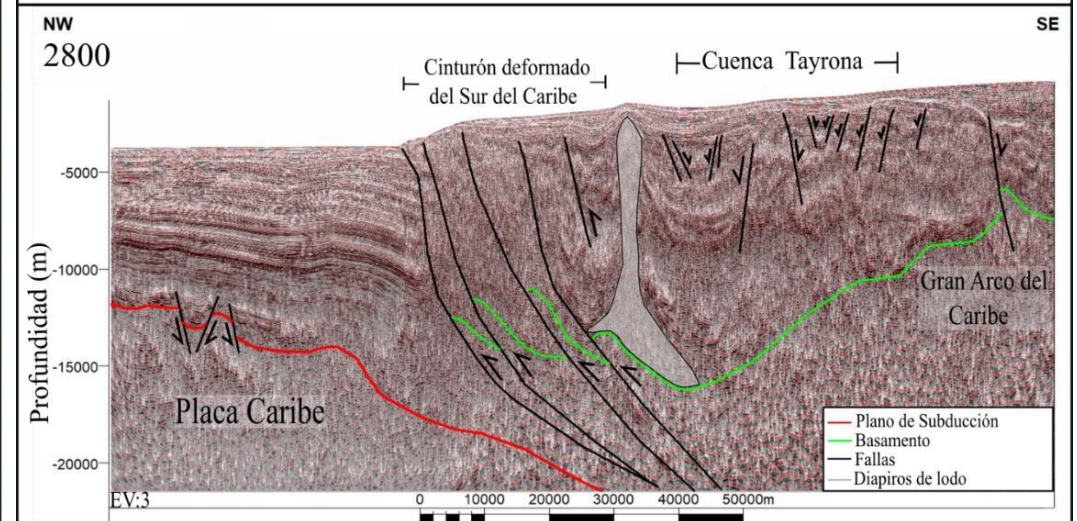
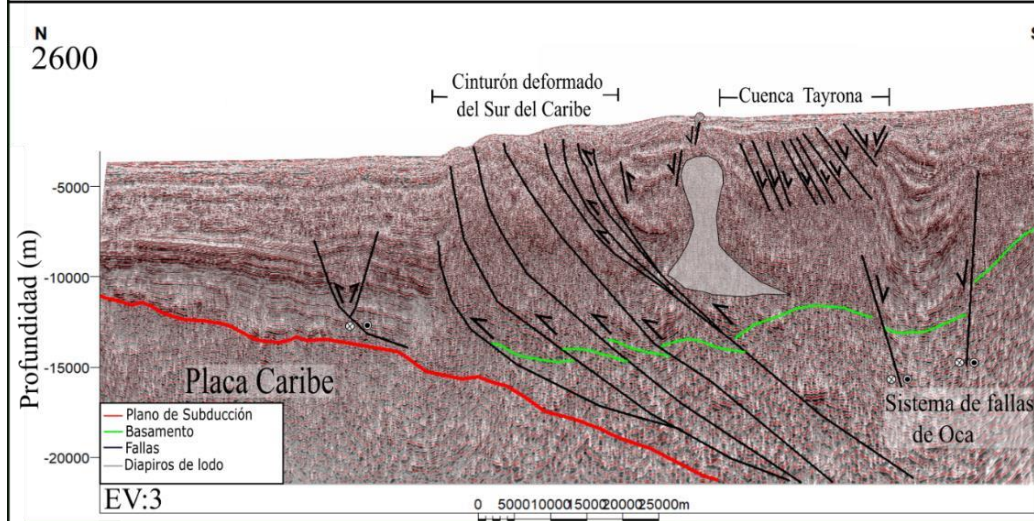
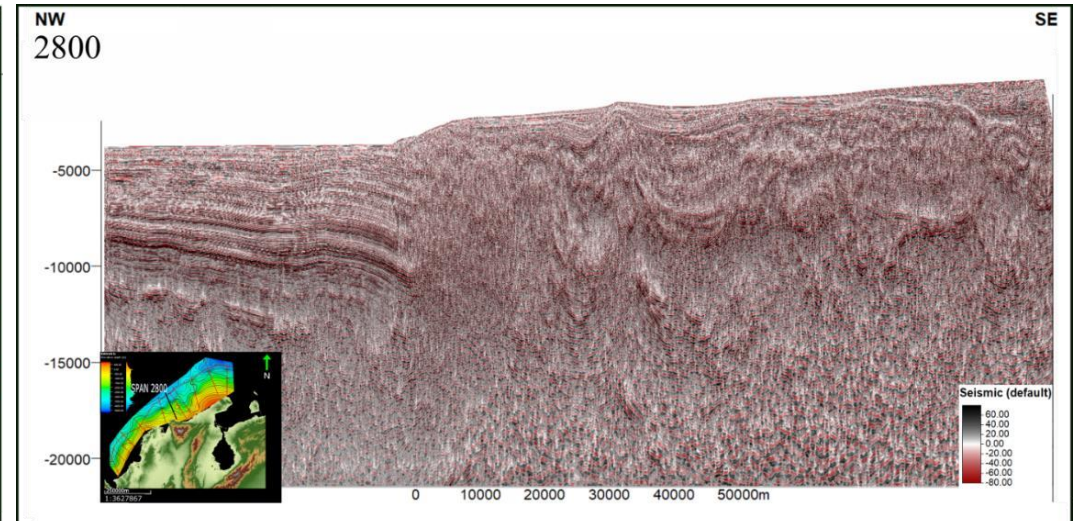


Figura 6. Línea sísmica SPAN 2600, al sur de la cuenca Guajira offshore, en la zona de Figura 7. Línea SPAN 2800, al sur de la cuenca Guajira offshore, en la zona de influencia del Cinturón deformado del sur del Caribe y diapirismo de lodo. Aparente presencia del Gran Arco del Caribe correspondiendo al basamento.

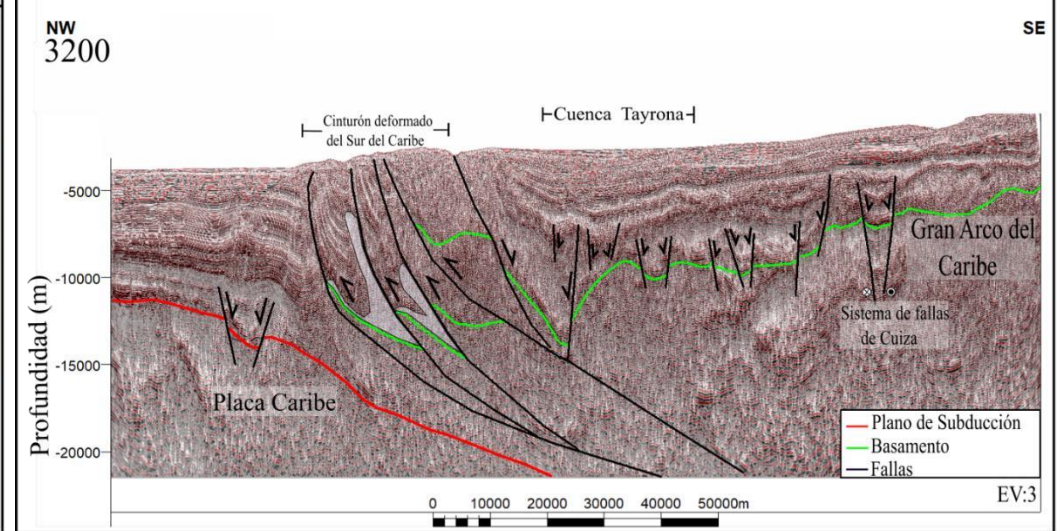
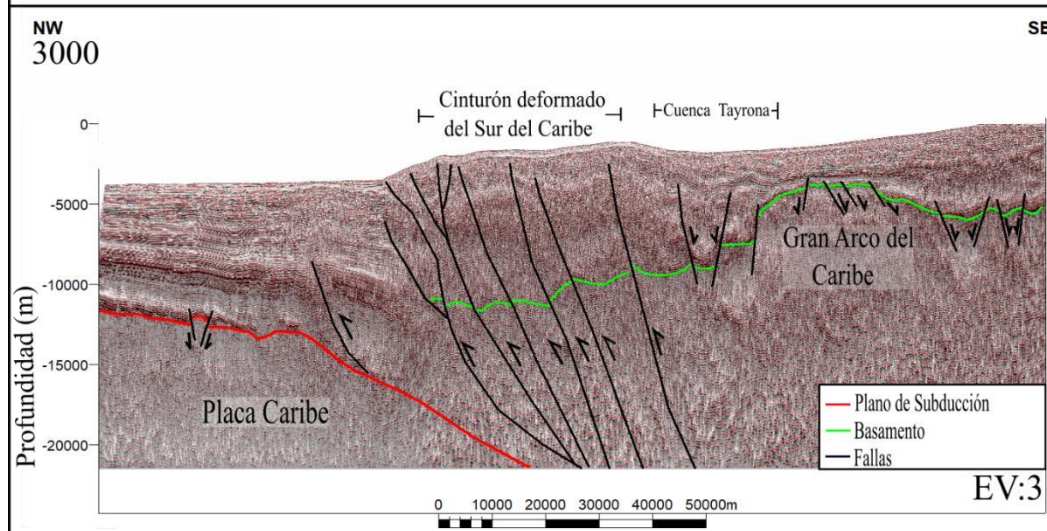
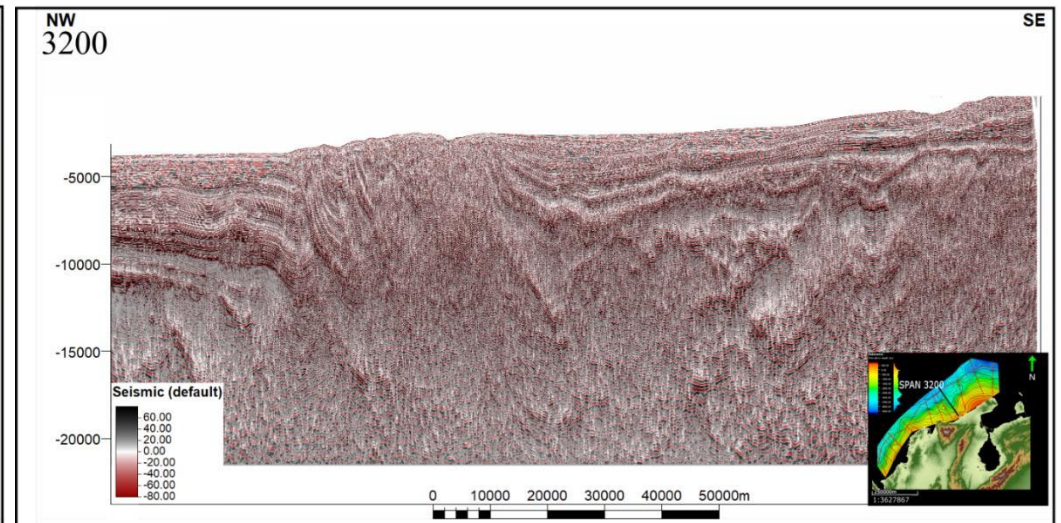
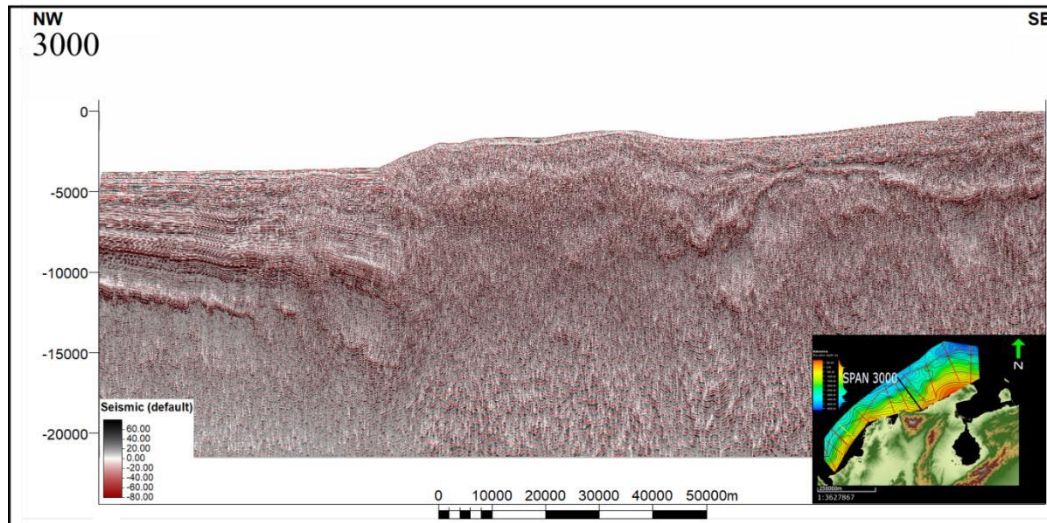


Figura 8. Línea sísmica SPAN 3000, en el sur de la cuenca Guajira offshore. Continúa en la zona de influencia del Cinturón deformado del sur del Caribe, se observa el Gran Arco del Caribe.

Figura 9. Línea sísmica SPAN 3200, hacia el sur de la cuenca Guajira Offshore, en la zona de mayor profundidad de la cuenca Tayrona.

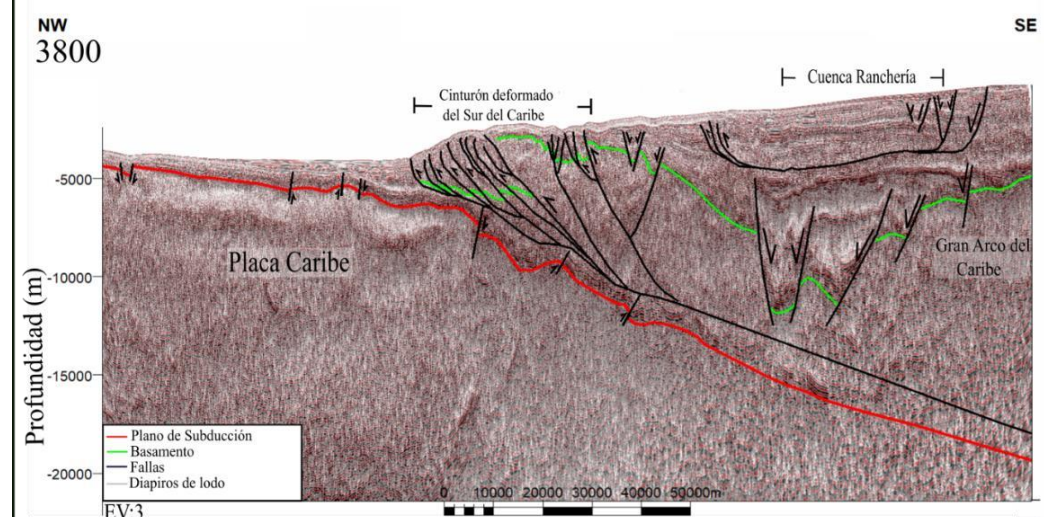
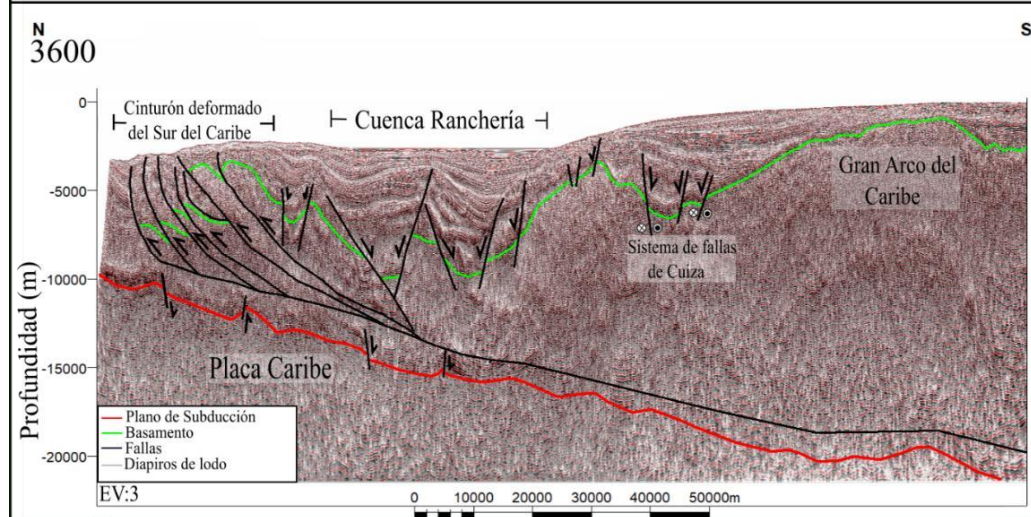
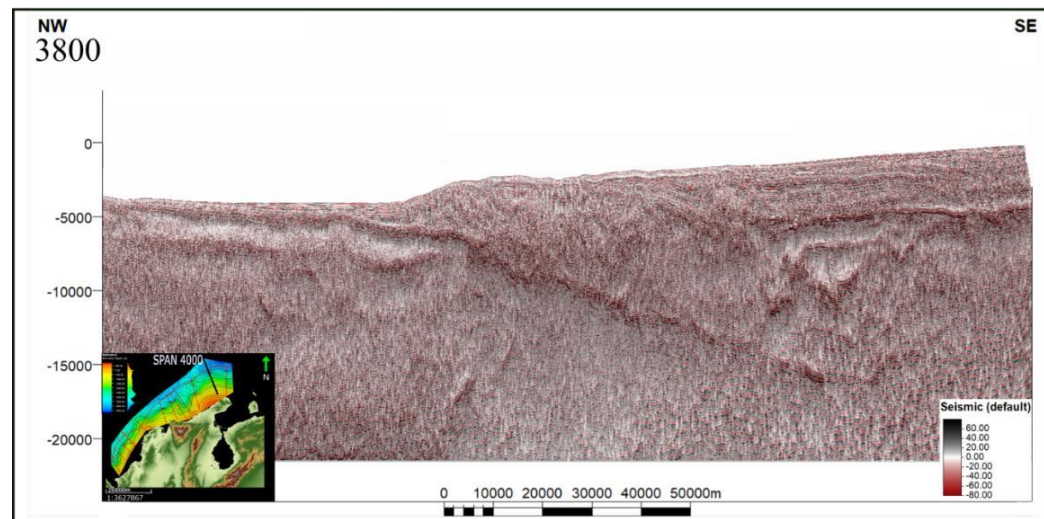
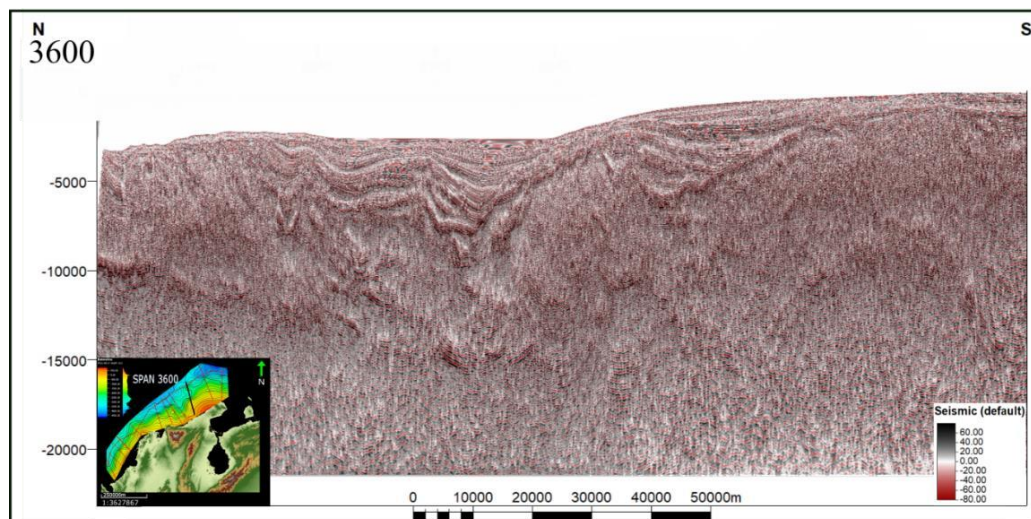


Figura 10. Línea sísmica SPAN 3600, se encuentra hacia el centro de la cuenca Guajira offshore, se observa el Cinturón deformado del sur del Caribe, la cuenca Ranchería, el sistema de fallas de Cuiza y el Gran Arco del Caribe.

Figura 11. Línea sísmica SPAN 3800, se encuentra en el norte de la cuenca Guajira offshore, se observa el Cinturón deformado del sur del Caribe, la cuenca Ranchería y el Gran Arco del Caribe.

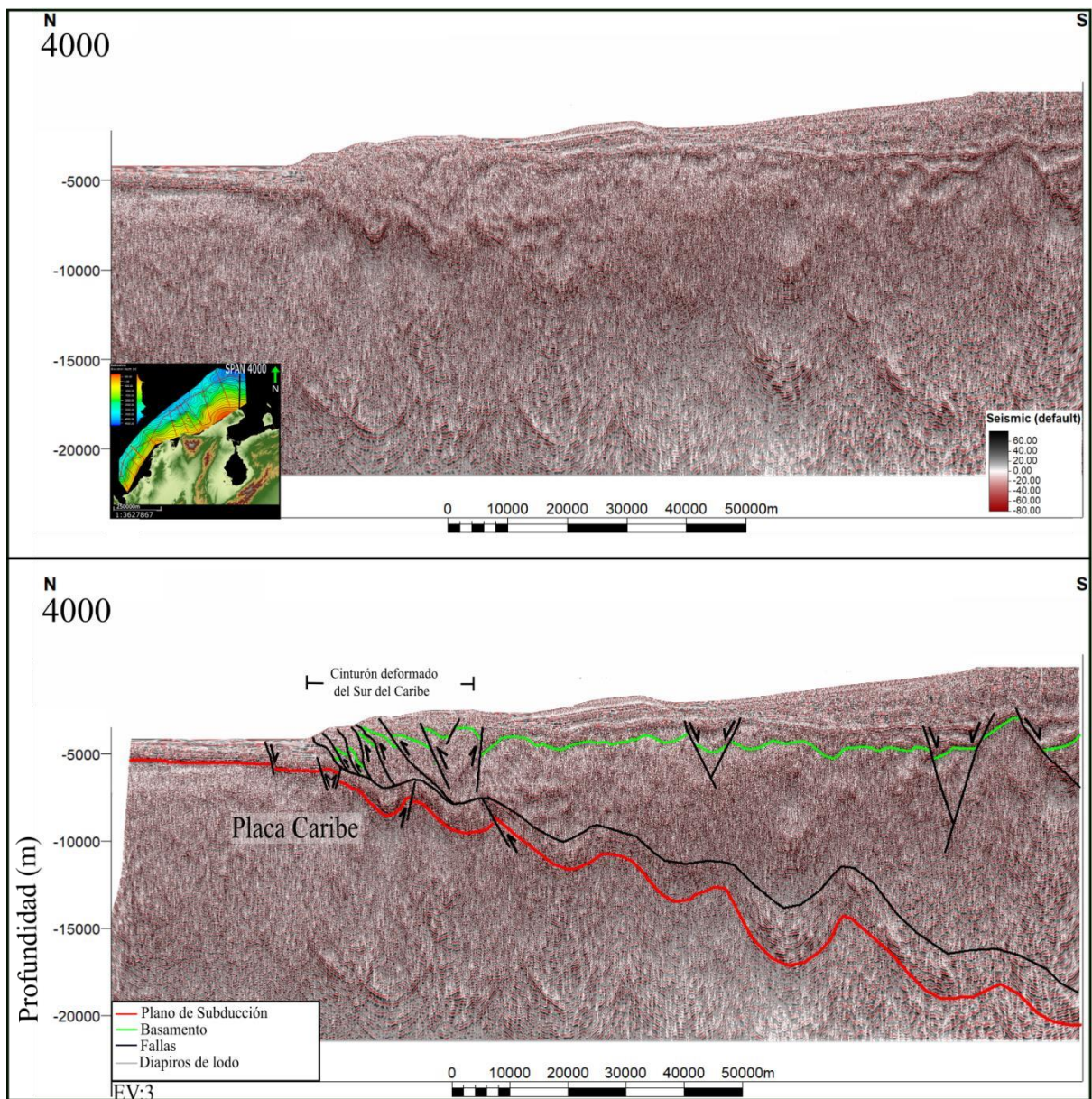


Figura 12. Línea sísmica SPAN 4000, se encuentra en el norte de la cuenca Guajira offshore, se observa el Cinturón deformado del Caribe y la placa Caribe con la mayor deformación en la zona.

5.1.2 Cuenca Sinú Offshore

En esta cuenca se encuentran las líneas sísmicas SPAN 1400, 1600, 1800, 2000 y 2200, en donde se puede observar una gran estructura correspondiente al Cinturón Plegado del Sinú, el cual presenta diferentes estructuras como pliegues, diapiros de lodo y fallas normales e inversas con un componente de rumbo dextral. Estas fallas se agruparon en dos familias según su estilo estructural:

5.1.2.1 Familia de fallas 1

Esta familia de fallas es la que predomina en la zona y se puede observar desde la figura 13 a la figura 16. Exhibe un buzamiento aparente hacia el SE y corresponden a fallas inversas con ángulos bajos en comparación con la familia de fallas inversas que se encuentra en la cuenca Guajira *offshore*. La mayoría de estas fallas presenta un despegue asociado a la subducción de la placa Caribe, generando así un sistema dúplex imbricado hacia el NW. Estas fallas también se asocian a estructuras en flor positiva encontradas en el frente de deformación del CPS (Figura 14 y Figura 15). El desplazamiento predominante de estas fallas varía de 1400 m y 2500 m, alcanzando en algunas zonas los 4000 m.

5.1.2.2 Familia de fallas 2

Esta familia corresponde a fallas normales que presentan un buzamiento aparente hacia el SE y un desplazamiento de alrededor de 200 m, se encuentran en la parte más sur de la cuenca Sinú *offshore*, en el límite con la cuenca del Urabá (Figura 13). Están asociadas al sistema de Fallas de Uramita y a la presencia de diapiros de lodo.

5.1.3 Diapiros de lodo

Los diapiros de lodo fueron identificados respecto a su carácter sísmico, mostrando en los reflectores zonas caóticas, generando plegamiento y desplazamiento de los reflectores en las zonas adyacentes. En este proyecto se interpretaron los diapiros que se pueden observar a escala regional.

En las líneas SPAN 2600 y 2800 (Figura 6 y Figura 7) hacia el sur de la cuenca Guajira *offshore*, se observa un diapirismo de lodo importante, entre el Cinturón deformado del sur del Caribe y la cuenca Tayrona, en donde estos cuerpos presentan una geometría alargada que se va

haciendo más ancha hacia el tope, su altura varía desde los 8000 m a los 11500 m y su diámetro alcanza los 5000 m.

En las líneas SPAN 3000 y 3200 (Figura 8 y Figura 9) estos diapiros de lodo presentan formas más irregulares, y se encuentran asociados a las fallas inversas del CDSC aprovechando estas estructuras para movilizarse.

En la línea SPAN 1400 (Figura 13), en la parte más sur de la cuenca Sinú, el diapirismo de lodo se observa dentro del Cinturón Plegado del Sinú, interactuando con algunas fallas normales, asociadas a la zona de falla de Uramita, en el límite con la cuenca del Urabá. Este cuerpo presenta una geometría alargada de aproximadamente 6000 m que se va haciendo más ancha hacia el tope alcanzando los 2400 m de diámetro.

5.1.4 Placa Caribe

La placa Caribe fue interpretada desde la cuenca Colombia al W hacia el E en las cuencas Guajira y Sinú *offshore*. Se encuentra subduciendo de manera oblicua bajo el CDSC y es fácil de identificar en la mayoría de las líneas sísmicas.

La parte de la placa Caribe que se encuentra en la cuenca Colombia, presenta una mayor cantidad de fallas normales, que conforman estructuras como *graben* y *half graben*, las cuales presentan desplazamientos que llegan a los 400 m. En la cuenca Guajira *offshore*, la placa tiene tanto fallas normales como inversas de altos ángulos, estas fallas se observan donde la placa aumenta su pendiente al encontrarse bajo el Cinturón deformado del sur del Caribe (Figura 9).

Hacia el norte de la zona de estudio, la placa oceánica se caracteriza por tener una geometría muy sinuosa y de mayor pendiente (Figura 12) presentando una deformación muy marcada en comparación con el resto de la placa, mientras al sur la deformación es más extendida y de menor pendiente (Figura 15). En las zonas con profundidades mayores a 15 km no se logró interpretar fallas dada la baja resolución de los reflectores al alcanzar estas profundidades.

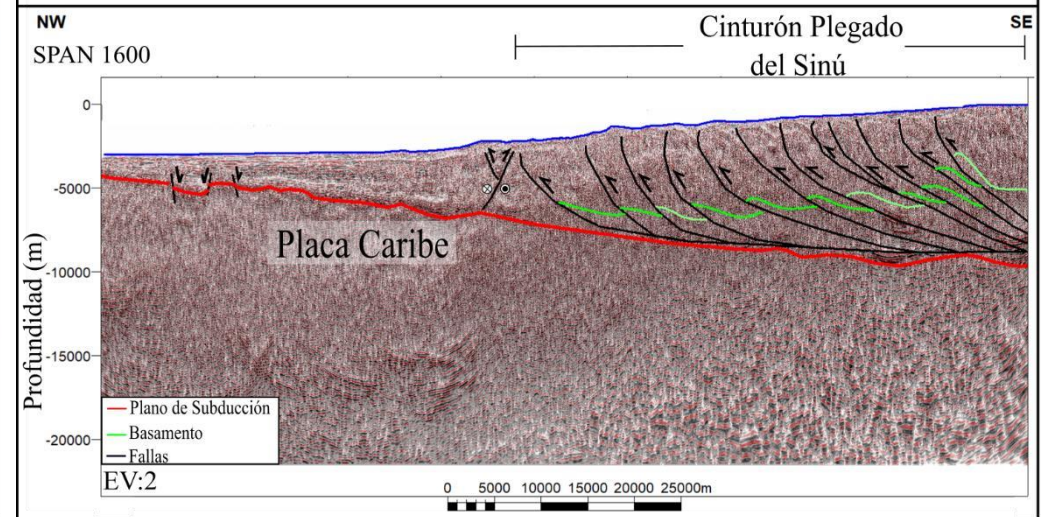
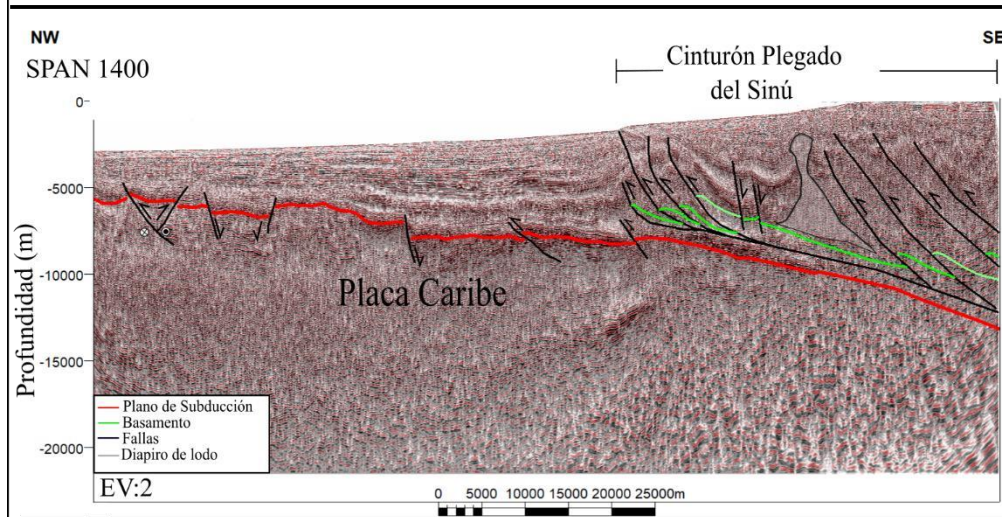
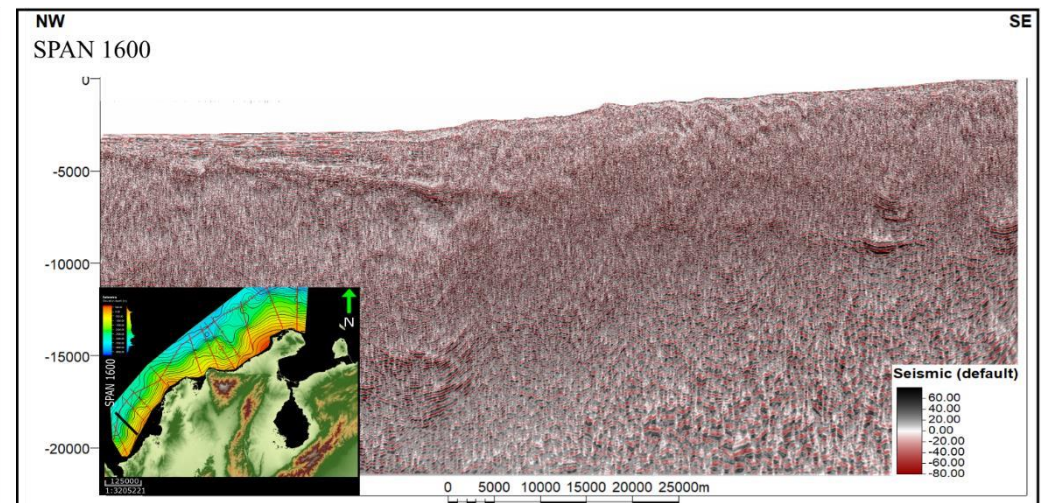
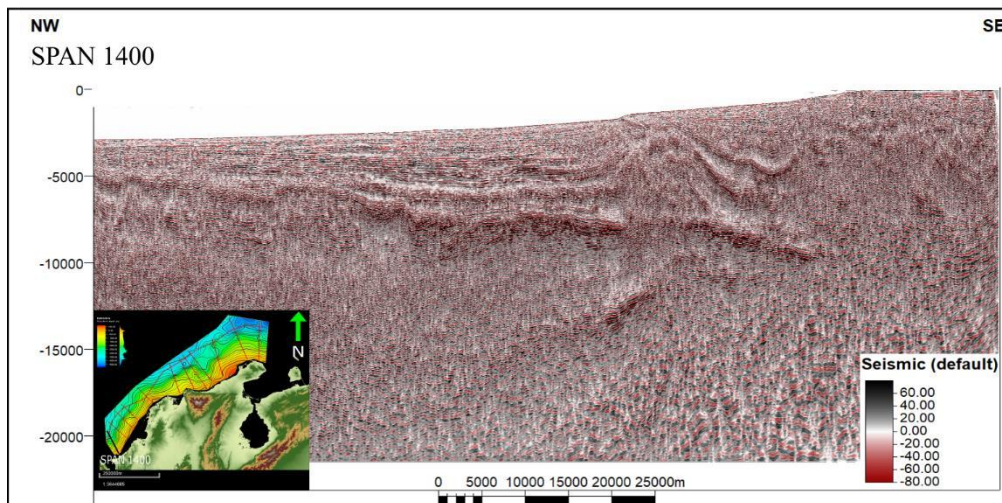


Figura 13. Línea sísmica SPAN 1400, se encuentra al sur de la cuenca Sinú offshore, en la zona de influencia de la zona de falla de Uramita

Figura 14. Línea sísmica SPAN 1600, se encuentra en el sur de la cuenca Sinú offshore, en la zona de influencia de la Cinturón Plegado del Sinú.

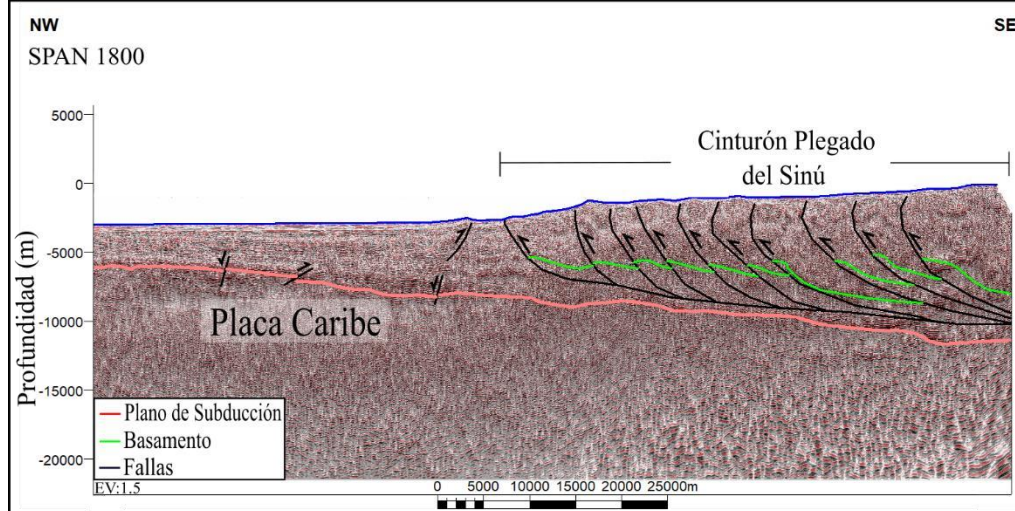
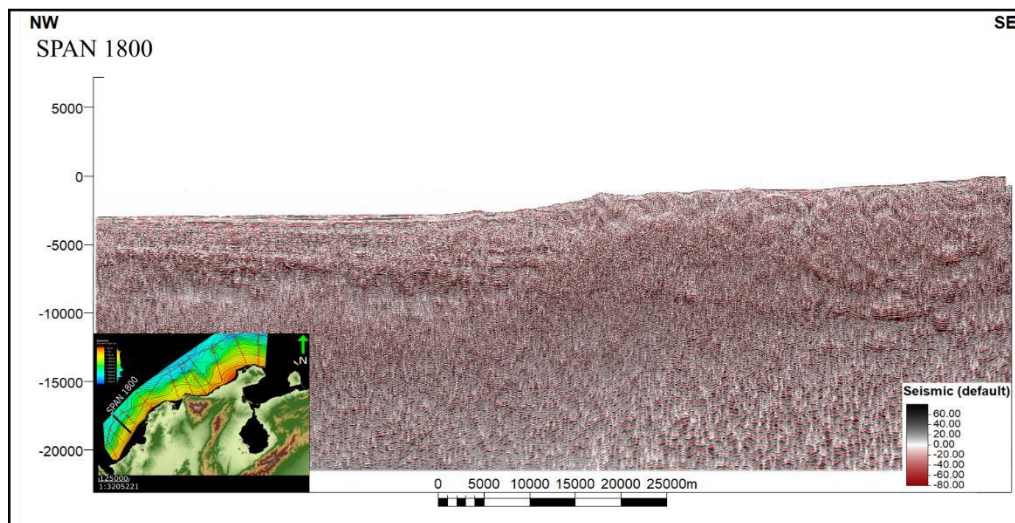


Figura 16. Línea sísmica SPAN 1800, se encuentra al norte de la cuenca Sinú offshore, en offshore, la zona de influencia del Cinturón deformado del Sinú.

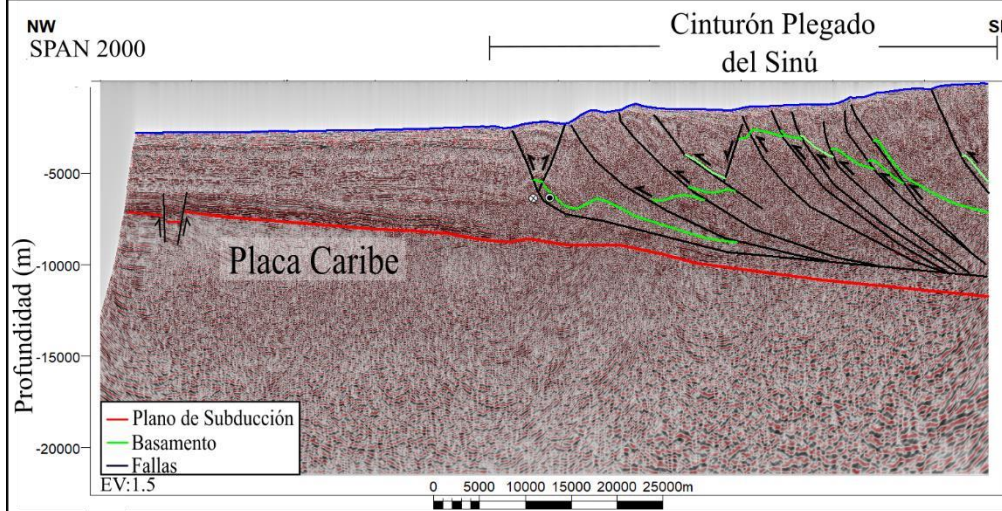
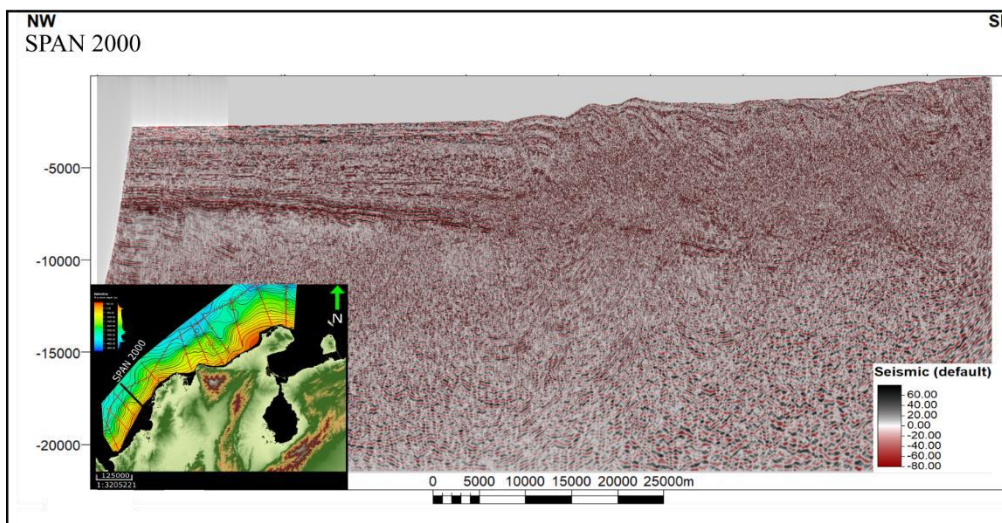


Figura 15. Línea sísmica SPAN 2000, se encuentra en el norte de la cuenca Sinú en la zona de influencia del frente de deformación del Cinturón deformado del Sinú.

5.2 Sismicidad en la Sierra Nevada de Santa Marta

Los 942 sismos ploteados hasta 32 km de profundidad para las dos cuencas no muestran una tendencia en la geometría de la subducción. Sin embargo, se observa una actividad sísmica importante concentrada alrededor y bajo la SNSM, con magnitudes entre 0.5 y 6 Mw (Figura 17). Es importante recordar que los sismos ploteados se encuentran limitados al área de las cuencas de estudio y parte del continente, por lo cual no se observa una clara geometría del plano de subducción. Sin embargo, en el perfil A-A' (Figura 22), donde se plotea la variación en la profundidad (30 km) de los sismos respecto a la latitud, se toma como referencia una zona más regional, observando la geometría cóncava del plano de subducción y su aumento de pendiente a 15°.

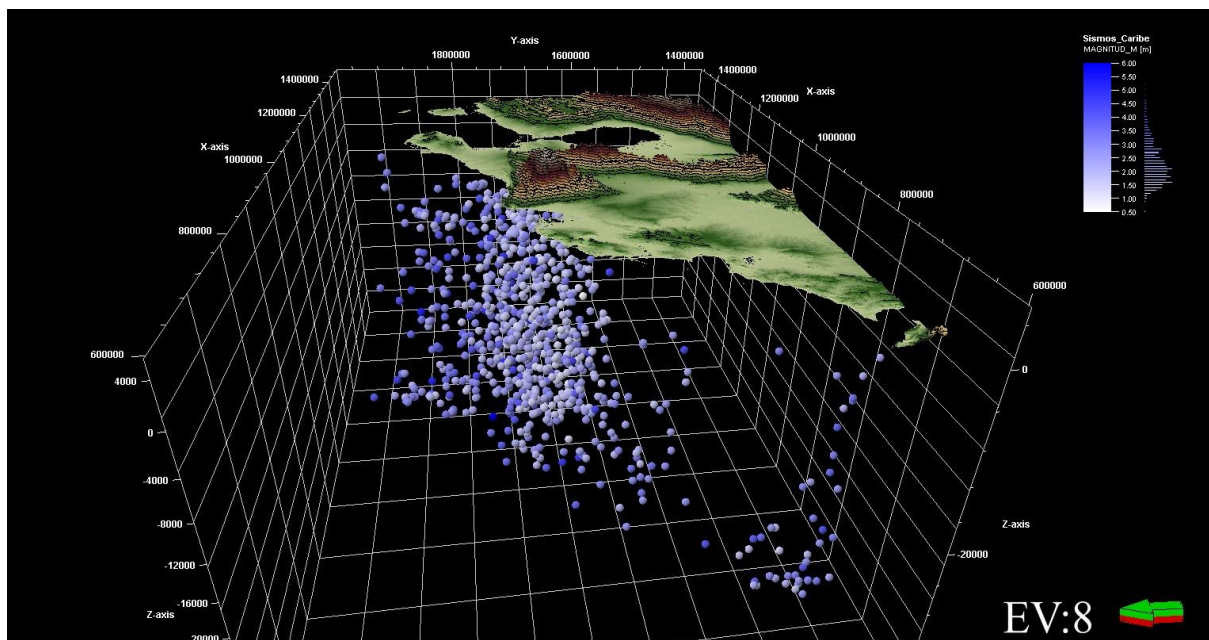


Figura 17. Mapa de distribución de eventos sísmicos para las cuencas Guajira y Sinú *offshore*. Se observa una condensación de sismos bajo la SNSM.

5.3 Modelamiento 3D

5.3.1 Batimetría de la zona de estudio

La superficie mapeada de la batimetría tiene un índice de contornos cada 250 m, mostrando un rango de profundidades indicado por colores desde 0 m (rojo) hasta 4500 m (azul). En esta superficie se pueden identificar algunas características del relieve oceánico, como lo son la plataforma continental, el talud continental y parte de la llanura abisal de esta zona del Caribe.

La plataforma continental se encuentra a profundidades que van desde 0 m hasta 2000 m aproximadamente, esta presenta pendientes promedio de 1.5° en la cuenca Guajira *offshore* y 2.2° en la cuenca Sinú *offshore*. Sin embargo, se observa una notable disminución de la pendiente en el área de influencia de los deltas del Magdalena y Sinú. El talud continental se encuentra entre 1500 m y 3000 m de profundidad, este se caracteriza por sus altas pendientes, presentando un rango de 4.2° a 5.8° a lo largo de las dos cuencas. La llanura abisal se encuentra en un rango de profundidades que van desde 2700 m a 4500 m con pendientes que varían de 0.36° a 0.83° (Figura 18)

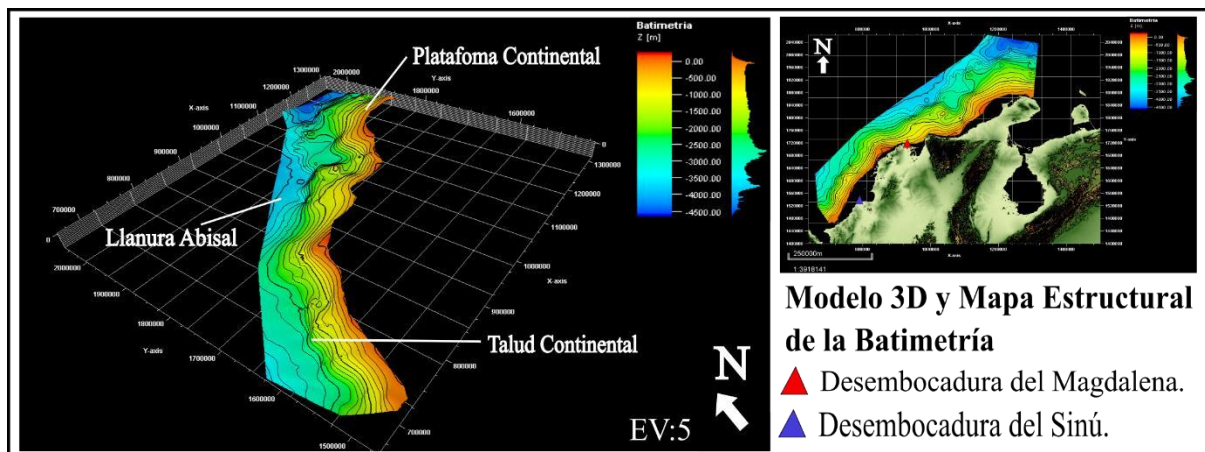


Figura 18. Modelo 3D y mapa estructural de la batimetría trazada para la zona de estudio. Se observa una profundidad desde 0 a 4500 m.

5.3.2 Basamento Cuenca Guajira *offshore*

Para el mapa del basamento de la cuenca Guajira *offshore* se obtuvo un rango de profundidades representado en colores, que van de 1000 m (rojo) hasta 16000 m (morado), con índice de contornos cada 500 m (Figura 19). Se observan dos altos estructurales importantes, uno de ellos correspondiente al alto Carpintero a aproximadamente 2000 m de profundidad. El segundo, cercano a la SNSM, a aproximadamente 4000m de profundidad, corresponde al alto Chuchupa. Los colores azules indican profundidades entre 8000 m y 12000 m, asociadas a la cuenca Ranchería, al norte del alto de Carpintero. Siguiendo esta tendencia hacia el sur de Carpintero, se observa una depresión de 16000 m frente a la punta este de la SNSM, correspondiente a la cuenca Tayrona. Estas dos cuencas se encuentran limitadas por fallas normales con un componente de rumbo dextral importante. En vista en planta se pueden correlacionar los sistemas de fallas de Oca y Cuiza con las fallas observadas en las líneas sísmicas en el *offshore* (Figura 19).

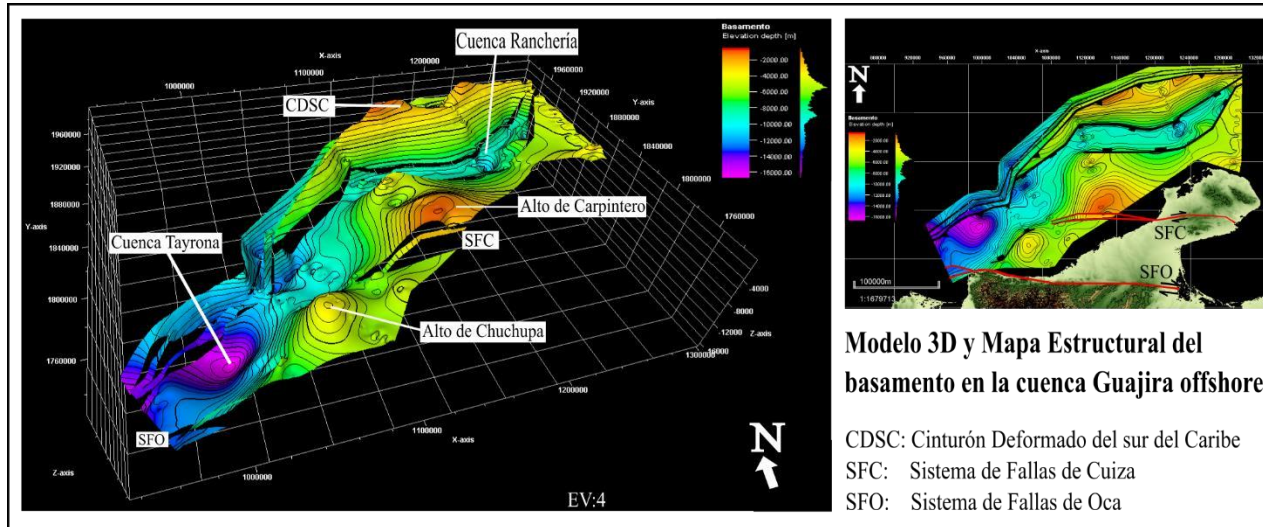


Figura 19. Modelo 3D y mapa estructural del basamento de la cuenca Guajira *offshore*. Se observa una profundidad desde 2 a 16 km. Las estructuras formadas corresponden al Cinturón Deformado del sur del Caribe (CDSC), Sistema de Fallas de Cuisa (SFC), Sistema de Fallas de Oca Oca (SFO), cuenca Tayrona, cuenca Ranchería, Alto de Chuchupa y Alto de Carpintero.

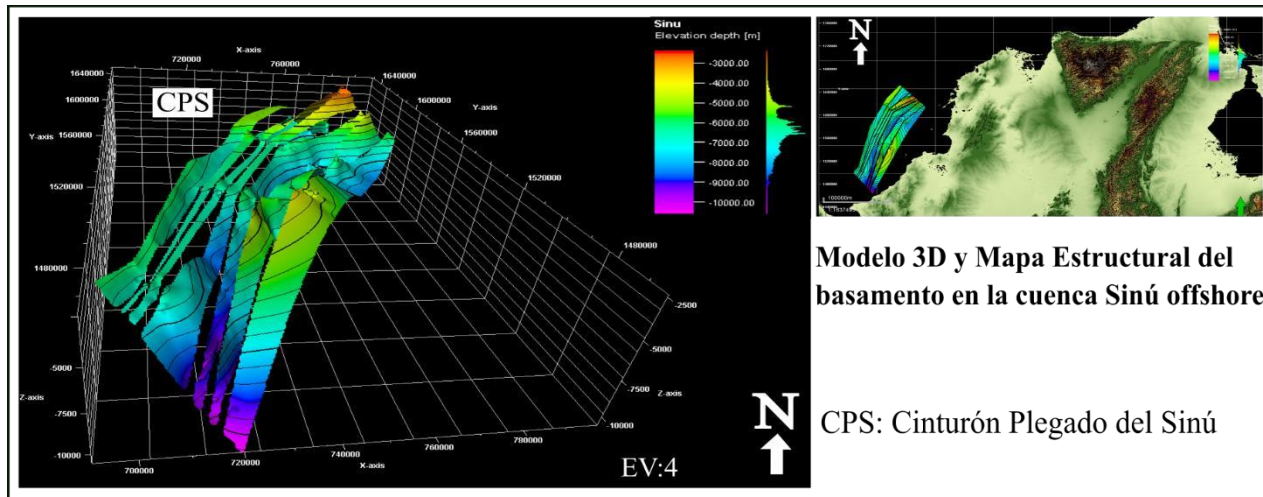


Figura 20. Modelo 3D y mapa estructural del basamento de la cuenca Sinú *offshore*. Se observa una profundidad desde 3 a 10 km. La estructura formada corresponde al Cinturón Plegado del Sinú.

5.3.3 Basamento Cuenca Sinú offshore

Para el mapa del basamento de la cuenca Sinú *offshore* se obtuvo un rango de profundidades representado en colores, que van de 2000 m (rojo) hasta 11000 m (morado), con índice de contornos cada 500 m (Figura 20). Se observa una gran estructura conformada por fallas inversas y escamas o pliegues imbricados hacia el NW, los cuales corresponden al sistema dúplex del Cinturón Plegado del Sinú.

5.3.4 Plano de Subducción de la placa Caribe

La superficie modelada del plano de subducción tiene un rango de colores indicando profundidades de 3000 m (rojo) hasta 23000 m (verde), con índice de contornos cada 1000 m (Figura 21). El plano de subducción de la placa Caribe en el *offshore* colombiano presenta importantes variaciones tanto en la profundidad como en la geometría desde el norte, en las cuencas Colombia y Guajira *offshore*, hasta el sur en las cuencas Colombia y Sinú *offshore*. En la zona norte de la cuenca Colombia este plano se encuentra a profundidades que varían de 4000 m a 6000 m, mientras que a la altura de la SNSM entre las latitudes (11.0106178 N) y (11.9793183 N) la placa alcanza profundidades que varían de 11000 m a 12000 m, presentando una geometría cóncava.

En la cuenca Guajira *offshore* la geometría y pendiente también varían N-S, hacia el norte se presenta una superficie más irregular y sinuosa con una pendiente suave, mientras que al sur de esta cuenca el plano presenta una superficie que paulatinamente se vuelve más homogénea y que a su vez presenta pendientes más pronunciadas a la altura de la SNSM teniendo en promedio 15°, mientras que al norte presenta una pendiente promedio de 5.7°.

En la parte sur, correspondiente a la cuenca Sinú *offshore* y sur de la cuenca Colombia, el plano de subducción es mucho más homogéneo, teniendo pocas variaciones en su pendiente y geometría. A lo largo de las líneas sísmicas de esta zona, el plano presenta profundidades que van desde los 4000 m a los 7000 m en la cuenca Colombia, y que llegan de 10000 m a 14000 m de profundidad en la cuenca Sinú *offshore*, presentando una pendiente promedio de 2.9°.

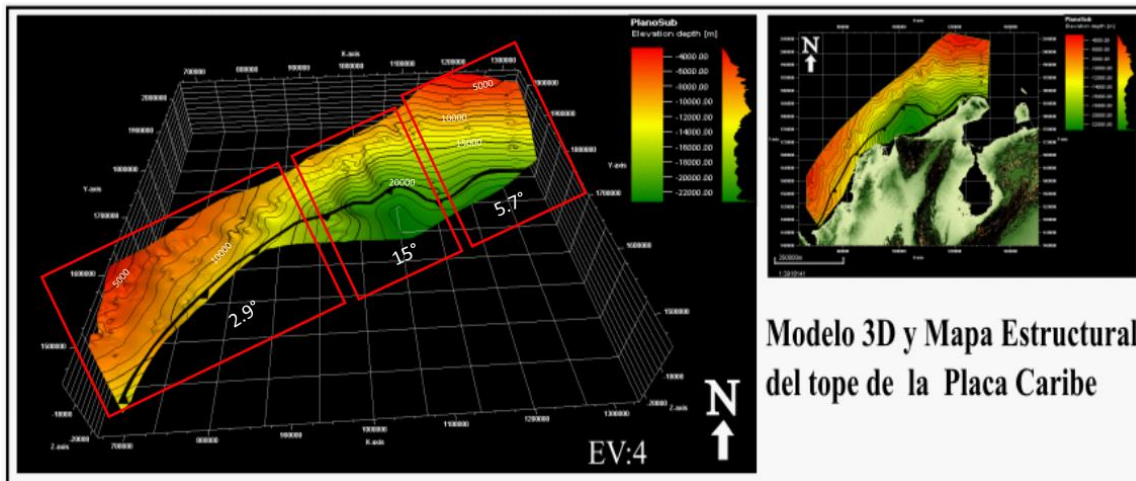


Figura 21. Modelo 3D y mapa estructural del tope de la placa Caribe. Se observa una profundidad desde 4000m a 22000m. La línea negra de la subducción corresponde al límite de las líneas sísmicas, lo que se encuentra bajo esta es la extrapolación del algoritmo. Los vectores de velocidad corresponden a los determinados por Arcila y Muñoz–Martín (2020., 2017).

5.4 Mecanismos focales

De los 942 eventos sísmicos descargados y procesados, se obtuvieron 6 mecanismos focales, localizados en el área de la cuenca Guajira *offshore*. Las soluciones calculadas se verificaron según los márgenes de error establecidos por el software Seisan: errores de *F-Factor* menores a 0.3, errores en el *Strike* y *Dip* de máximo 5 y en el *Rake* de máximo 8 (Tabla 1). Estos rangos de valores se consideran óptimos para las soluciones.

De acuerdo al índice R' usado para definir el régimen de esfuerzo, donde $R = \sigma_2 - \sigma_3 = \sigma_1 - \sigma_3$, los regímenes obtenidos son:

$R'=R$ indica regímenes de fallamiento normal (NF), con valores de 0.5, y fallamiento normal con componente de rumbo (NS) con valor de 1

$R'=(2-R)$ indica regímenes de strike-slip (SS), con un valor de 1.5

$R'=(2+R)$ indica regímenes de fallamiento thrust (TF), con un valor de 2.5

Los mecanismos focales calculados para el área de la cuenca Guajira *offshore* se encuentran a profundidades entre 8 y 20 km, perteneciendo a las fallas que cortan las secuencias sedimentarias acumuladas sobre la placa. Estos mecanismos expresan un sentido de desplazamiento transcurrente predominantemente (TF, SS, TS). Sin embargo, también se observan mecanismos de desplazamiento normal con un componente de rumbo de importante influencia hacia el sur de la cuenca (NS, NF), entrando a la cuenca Colombia y en la zona de falla de Oca, al norte de la SNSM (Figura 22).

Tabla 1. Datos de las soluciones de mecanismos focales calculados para este proyecto, ubicados en Ranchería, La Guajira.

Fecha	Ubicación			Datos					Ejes de momento de esfuerzo			SH		Esfuerzo	
	Lat (°9)	Long (°)	Profundidad (km)	Mw	Strike	Dip	Slip	Factor F	P	B	T	SH max	SH min	R'	Regimen de Esfuerzo
15/08/2013	11.487	-73.381	20	4.5	138	35	78	0.18	237	328	91	56	146	2.5	TF
14/02/2014	11.559	-73.174	18.8	4.6	30	87	-161	0.12	77	201	344	76	166	1.5	SS
16/05/2013	11.991	-73.571	13.8	4.5	107	41	161	0.08	331	222	84	160	70	2	TS
02/05/2013	11.316	-73.39	9.8	4.6	48	65	-62	0.23	360	215	118	22	112	0.5	NF
28/02/2014	11.953	-73.54	8.9	4.3	125	40	-161	0.06	327	191	82	162	72	1	NS
05/04/2001	12.385	-73.625	12.8	4	18	47	-81	0	359	192	102	12	102	0.5	NF

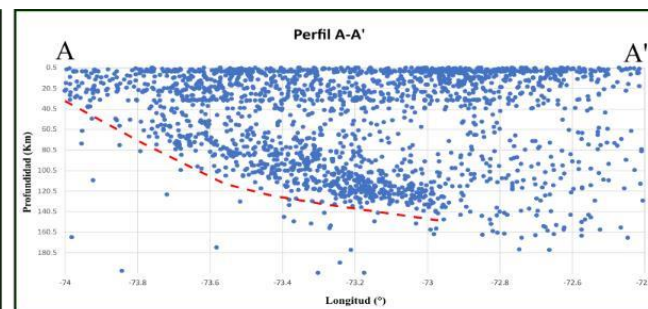
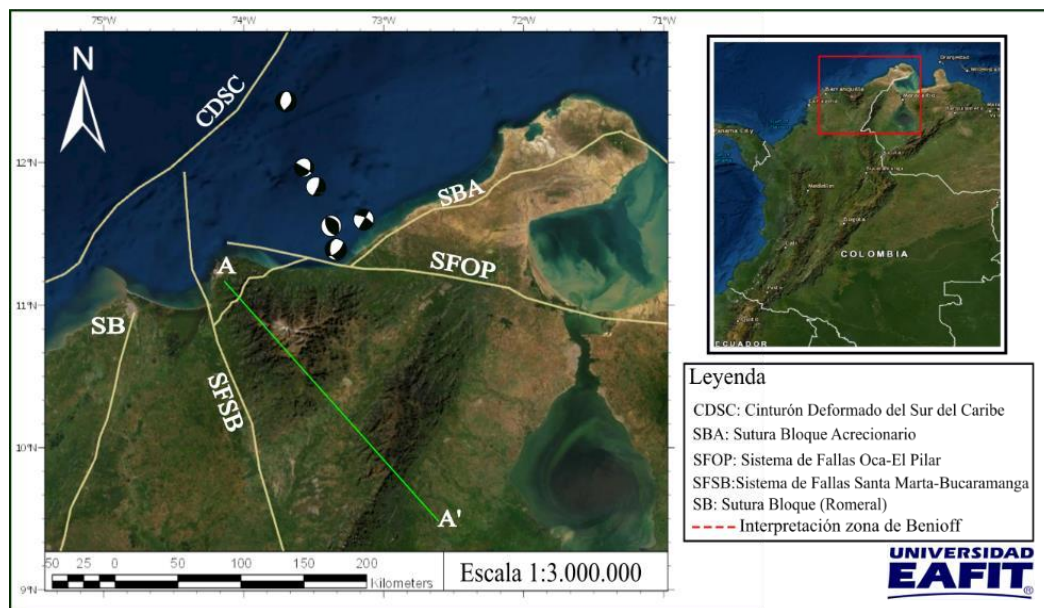


Figura 22. Mapa con solución de mecanismos focales propios e interpretación de fallas regionales realizada por (Restrepo et al., 2017). Perfil A-A' de sismos ocurridos desde 1993 hasta 2018.

6. Discusión

6.1 Sierra Nevada de Santa Marta

La SNSM es un macizo elevado de 5710 m de altura que no presenta una raíz cortical que compense isostáticamente su estructura (Castaño, 2019; Ceron-Abril, 2008), y se encuentra en el límite del margen convergente oblicuo entre la placa Caribe y el noroccidente de Suramérica (Montes et al., 2010; Pindell y Higgs, 1998; Pindell y Kennan, 2009; Piraquive, 2017).

La concentración de la mayoría de los eventos sísmicos (63%) (Figura 17 y Figura 22), el cambio en la geometría del plano de subducción, el cual parece estar envolviendo la SNSM, y el aumento en la pendiente de la placa Caribe bajo la SNSM (Figura 21), indican la presencia de un cuerpo o bloque que actuaría como soporte de la SNSM, que a su vez deforma o segmenta la placa oceánica poniendo resistencia a la convergencia oblicua. Esto concuerda con los modelos propuestos (e.g. Ceron-Abril, 2008; Kellogg et al., 2005; Sanchez-Rojas y Palma, 2014), en los cuales la subducción de la placa Caribe bajo la placa Suramérica presenta un cambio de pendiente y un aumento de la actividad sísmica, en el Caribe colombiano.

Este soporte que se infiere puede explicarse mediante varios escenarios como los propone Ceron-Abril (2008) basándose en el modelo de Airy. Nuestros datos, superficies modeladas y la forma en la que se concentran los sismos bajo la SNSM, se adaptan al escenario del Moho ascendente. Las altas anomalías positivas de Bouguer presentadas por Castaño (2019) y Ceron-Abril (2008) (Figura 23), y los altos gradientes geotermales que muestran las rocas cristalinas de la SNSM permiten corroborar que no hay un equilibrio isostático en esta zona (Villagómez et al., 2011), lo cual es posible considerando el escenario del ascenso del Moho, debido a que este explica el alto flujo de calor.

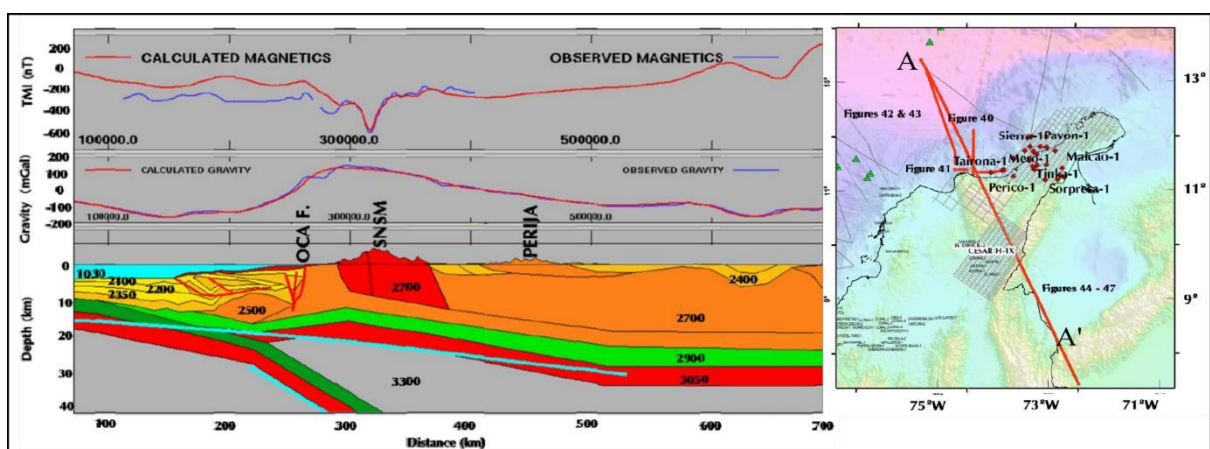


Figura 23. Modelado gravimétrico y magnético 2D a través del perfil A-A' que atraviesa la SNSM. Modificado de Cerón (2008).

Por otra parte, nuestros resultados estructurales son coherentes con el modelo geológico-geofísico propuesto por Castaño (2019), el cual muestra mediante datos gravimétricos que la placa Caribe subduce a un ángulo de aproximadamente 14° y que el Moho se encuentra a profundidades someras de aproximadamente 22 km bajo la SNSM.

6.2 Relación y rasgos estructurales entre las cuencas Sinú offshore y Guajira offshore

La relación entre secuencias, diapirismo de lodo, y fallamiento inverso y normal es compleja en estas cuencas, debido a los distintos regímenes de esfuerzo que han reactivado, invertido y plegado estas estructuras.

Nuestro modelo se realizó interpretando el plano de subducción de manera continua desde el sur de la cuenca Sinú offshore hasta el norte de la cuenca Guajira offshore, debido a las características sísmicas continuas que presenta. No obstante, a nivel regional se puede observar lo que interpretamos como un cambio estructural entre ambas cuencas, cuyo límite se le puede atribuir a los lineamientos en offshore de las fallas Santa Marta-Bucaramanga en la zona de la SNSM y de Cuiza hacia la Guajira (Figura 21). Esta segmentación estructural se manifiesta en los cambios significativos de pendientes entre ambas cuencas y la SNSM, complementando los dos dominios estructurales propuestos por Bolívar (2019) a partir de mecanismos focales, localizados en el Golfo de Urabá y en la Guajira.

Las familias de fallas inversas y estructuras en flor positiva identificadas dentro del Cinturón Plegado del Sinú, que es la extensión sur del Cinturón deformado del sur del Caribe, corresponden a eventos transpresivos bajo un régimen de esfuerzo de *strike slip* característico de márgenes convergentes oblicuos, que inició en el Cretácico y que desde el Oligoceno hasta el Mioceno presentó mayor tasa de deformación, formando los cinturones deformados en ambas cuencas (Rodríguez et al., 2021).

Las familias de fallas normales identificadas se pueden atribuir a dos eventos. Aquellas observadas en la placa Caribe corresponden a la separación de Pangea durante el Cretácico (Mantilla et al., 2013). Las fallas normales de la cuenca Guajira offshore, que se formaron después del Cretácico y se observan en las secuencias sedimentarias (Figura 6 a Figura 12), pueden considerarse como estructuras transtensivas, cuyas secuencias sintectónicas influyen en el colapso de bloques por sobrecarga y gravedad (e.g. James, 2005; Martínez et al., 2015).

Esta configuración de fallas normales con componente de rumbo se encuentra limitando las cuencas de Ranchería y Tayrona (Figura 19), las cuales pueden clasificarse como cuencas de

pull apart, cuya geometría, especialmente la de la cuenca Ranchería, responde a la descrita por Rahe et al. (1998) para este tipo de cuencas.

De acuerdo a lo anterior, en el Sinú *offshore* se infiere un régimen compresivo predominante con un componente de rumbo menor en comparación con la cuenca Guajira *offshore*, donde la influencia de un régimen transpresivo es mayor. En este orden de ideas, los vectores de velocidad, esfuerzo y deformación deben ser más ortogonales respecto al margen continental en la cuenca Sinú *offshore*, y los vectores en la Guajira *offshore* deben ser más oblicuos, como los determinados por Arcila y Muñoz–Martín (2020., 2017), Camacho et al. (2010) y Posada et al. (2017) (Figura 24).

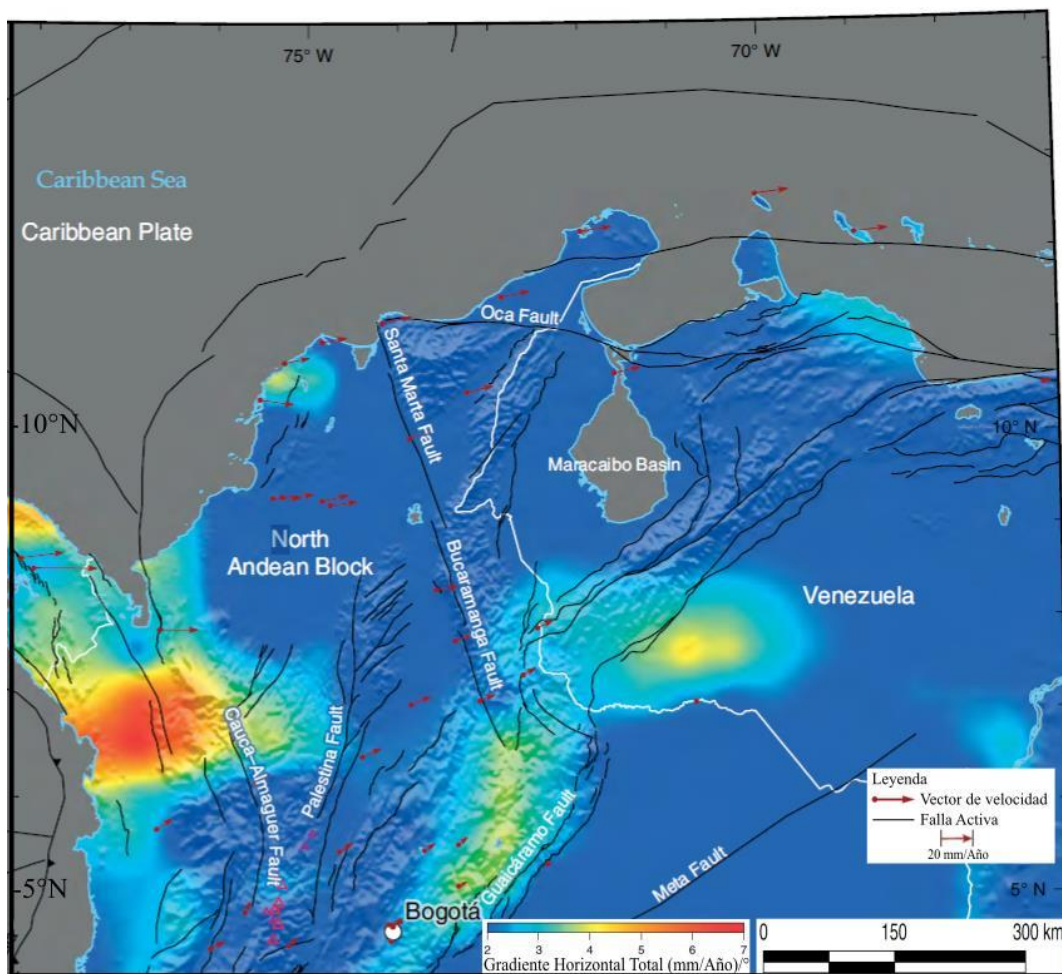


Figura 24. Gradiente de deformación horizontal total definido a partir de velocidades de GPS. Modificado de Arcila y Muñoz–Martín (2020).

6.3 Diapirismo de lodo

La fuente del diapirismo de lodo en el margen NW de Suramérica corresponde a unidades de *shale* del Oligoceno (Galindo, 2016; Ramirez et al., 2015) y es el resultado de la compresión y del desarrollo de espesores de sedimentos importantes que generan una sobrecarga en este material lodoso (Vernette et al., 1992).

En la cuenca Guajira *offshore*, el diapirismo de lodo se encuentra con mayor influencia en el CDSC y en la parte posterior a este (Figura 6 y Figura 7), lo cual indica que el ascenso de este material y la formación de estas estructuras deben estar relacionadas con la presencia de fallas y la sobrecarga de sedimentos.

El diapirismo de lodo presente hacia la zona de contacto con la cuenca Urabá, se ve favorecido por la compresión generada desde la colisión y sutura del bloque Panamá-Chocó que inició en el Mioceno, con un movimiento oblicuo (Mora-Páez et al., 2019; Rodríguez et al., 2021), y junto con el diapirismo de lodo en la cuenca de la Guajira, asociado directamente a un régimen de esfuerzos transpresivos (Ramirez et al., 2015; Van Benthem et al., 2013), implican una evidencia importante de la convergencia oblicua de la placa Caribe.

6.4 Margen convergente oblicuo

La presencia y características estructurales de estos cinturones y el prisma de acreción (Kellogg et al., 2005; Kellogg y Bonini, 1982; Toto y Kellogg, 1992), integrada con los datos GPS, análisis geodéticos y de mecanismos focales tanto nuestros como de otros autores (e.g. Arcila y Muñoz-Martín, 2020; Cortés y Angelier, 2005; Sanchez-Rojas y Palma, 2014; Bolívar, 2019; Toro y Osorio, 2005), los cuales muestran que los vectores de velocidad de la placa Caribe se mueven a 2cm/año y que los regímenes de esfuerzo son predominantemente transcurrentes, satisfacen de mejor manera una configuración tectónica consistente con un margen convergente donde se desarrolla una zona de subducción oblicua de bajo ángulo (e. g. Ceron-Abril, 2008; Galindo y Lonergan, 2020; Naranjo-Vesga et al., 2020) que una configuración tectónica de margen pasivo (Rossello y Cossey, 2012).

Adicionalmente, un margen pasivo en el Caribe colombiano no resultaría factible dado que no se observa una formación de fallas normales asociadas a rifting (colapso) posterior a la separación de Pangea en el Cretácico, el terreno cratónico se encuentra muy distal y la quiescencia tectónica no ha durado periodos de tiempo suficientes (e. g. Boschman et al., 2014). A diferencia de los márgenes pasivos donde se desarrollaron las cuencas del Atlántico Sur,

cuyo rift viene actuando desde el Cretácico Temprano hasta el presente produciendo la separación de Suramérica y África (Wen et al., 2019).

6. Conclusiones

- Los cambios en el ángulo de subducción de la placa Caribe y las principales fallas regionales interpretadas en las líneas sísmicas de las cuencas Guajira *offshore* y Sinú *offshore* muestran diferencias estructurales marcadas que permiten inferir una segmentación estructural en la placa, la cual se refleja en los distintos estilos estructurales entre ambas cuencas. En el Sinú actúa un régimen compresivo con componente de rumbo menor en comparación con la Guajira, con vectores de velocidad y deformación más perpendiculares al margen continental, mientras en la Guajira predomina un régimen transpresivo con vectores de velocidad y deformación más oblicuos.
- En la zona de la SNSM la actividad sísmica, el cambio en la geometría de la placa oceánica de manera envolvente bajo el macizo y el cambio en la pendiente del plano de subducción, manifiestan la presencia de un soporte bajo este macizo, que junto con los modelos de anomalías gravimétricas de otros autores permiten establecer que se trata de un soporte asociado a un ascenso somero del Moho a 20 km, provocando así, que un segmento de la placa Caribe subduzca a aproximadamente 15° bajo el macizo.
- La presencia de cinturones plegados y deformados, el prisma acrecionario, el levantamiento de la SNSM, el desarrollo de cuencas de *pull-apart*, los mecanismos focales calculados y los datos GPS de otros autores, indican una configuración tectónica de un margen convergente oblicuo de bajo ángulo en el margen NW de Suramérica. Por su parte, la sismicidad en el Caribe colombiano refleja la subducción de la placa Caribe segmentada bajo la placa Suramérica.

7. Agradecimientos

A los profesores José Fernando Duque y Alejandro Beltrán, mil gracias por su acompañamiento, sus conocimientos y buenas energías. Con ustedes todo toma rumbo. A José Daniel y Laura por su compañía, su disposición y sus enseñanzas, muchísimas gracias. Un honor haberlos conocido.

A Sergio por su entereza y dedicación con este proyecto, gracias. Gracias por ser una persona llena de valores y fortaleza. Lo logramos, sobrevivimos.

A mi familia, María, Julio y Fabi, mi gratitud eterna. Porque me hicieron quien soy, aunque a veces esto nos supere. Por su incansable amor y entendimiento. Por sus permanentes esfuerzos y sacrificios. Espero seguir haciéndolos sentir orgullosos de mí siempre, porque se merecen el Universo y nada menos, lo merecemos. Los amo mucho, mucho.

A mis amigos, Lorena, Valentina, Diego, Camilo, Wilfredo y Juan José, gracias. Significa mucho para mí haber encontrado con quien reír, compartir y confiar, el haber crecido juntos. Recuerden que nuestras vidas están volviendo a comenzar y sé que lo mejor nos está esperando. A mí misma, me agradezco por todo. Por enfrentar los miedos e ir vencidos, por cuidarme y amarme. Porque ahora puedo decir lo hice, hice un buen trabajo y estoy muy orgullosa de mí.

Valentina Alzate Rubio

A los profesores José Duque y Alejandro Beltrán por haber creído en este proyecto, por haber compartido sus conocimientos y por guiarnos en todo el proceso A Valentina Alzate por ser una gran amiga y compañera de proyecto.

A José Daniel y Laura Redondo por su disposición para compartir todos sus conocimientos.

A mis padres y mi hermano por su apoyo incondicional, por ser un respaldo y voz de aliento en todo momento.

A mis amigos Camilo, Juan, Wilfredo, Diego, Camila, Valentina, Lore, Andrés, Katherin, Aleja y los que faltan, por tantas risas, experiencias y momentos que quedarán para siempre.

Sergio Alejandro Porras Morales

8. Referencias

- Aguilera, R. (2011). Petroleum geology of Colombia: Sinú and San Jacinto Basins. Editor: Fabio Cediell. 12. Agencia Nacional de Hidrocarburos.
- Alfaro, E., Holz, M. (2019). Stratigraphic relationships between the Colombian , Sinú Offshore and Sinú-San Jacinto basins based on seismic stratigraphy. *Braz. J. Geol.* vol.44 no.4 São Paulo Dec. 2014. <https://doi.org/10.5327/Z23174889201400040007>
- Arcila, M., Muñoz–Martín, A. (2020). Chapter 17. Servicio Geológico Colombiano. *Elder Northfield's Home*, 4, 280–295. <https://doi.org/10.2307/j.ctt1d9nkv6.23>
- Bolívar, J. S. (2019). Caracterización sismogénica del Caribe colombiano. Escuela de Ingenieros de Antioquia, Envigado.
- Boschman, L. M., van Hinsbergen, D. J. J., Torsvik, T. H., Spakman, W., Pindell, J. L. (2014). Kinematic reconstruction of the caribbean region since the early jurassic. *Earth-Science Reviews*, 138, 102–136. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.007>
- Bulhões, É. M., Nogueira de Amorim, Wander. (2005). Princípio da Sismo Camada Elementar e sua aplicação à Técnica Volume de Amplitudes (tecVA). 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- Camacho, E., Hutton, W., Pacheco, J. F. (2010). A new look at evidence for a wadati-benioff zone and active convergence at the north Panama deformed belt. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(1), 343-348. <https://doi.org/10.1785/0120090204>
- Castaño, C. (2019). Estructura cortical de la Sierra Nevada de Santa Marta y sus implicaciones en la cuenca Cesar-Ranchería. Escuela de Ingenieros de Antioquia, Envigado.
- Ceron-Abril, J. F. (2008). Crustal structure of the Colombian Caribbean Basin and margins. *PhD Thesis*, 165.
- Cortés, M., Angelier, J. (2005). Current states of stress in the northern Andes as indicated by focal mechanisms of earthquakes. *Tectonophysics*, 403(1-4), 29-58. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.03.020>
- Delvaux, D., Sperner, B. (2003). New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. *Geological Society Special Publication*, 212, 75-100. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06>
- Delvaux, Damien, Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Levi, K., Miroshnichenko, A., Ruzhich, V., San'kov, V. (1997). Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282(1-4), 1-38. [https://doi.org/10.1016/S00401951\(97\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S00401951(97)00210-2)
- Deptuck, M. E., Sylvester, Z. (2018). Submarine Fans and their Channels, Levees, and Lobes. in: Micallef, A., et al., *Submarine Geomorphology*. 13-25. <https://doi.org/10.1007/978-3-31957852-1>
- Duque-Caro, H. (1990). The choco block in the northwestern corner of South America: Structural, tectonostratigraphic, and paleogeographic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 3(1), 71-84. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(90\)90019-W](https://doi.org/10.1016/0895-9811(90)90019-W)

- Escalona, A., Mann, P. (2011). Tectonics, basin subsidence mechanisms, and paleogeography of the Caribbean-South American plate boundary zone. *Marine and Petroleum Geology*, 28(1), 8-39. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.01.016>
- Escuder-Viruete, J., Joubert, M., Abad, M., Pérez-Valera, F., Gabites, J. (2016). The basaltic volcanism of the Dumisseau Formation in the Sierra de Bahoruco, SW Dominican Republic: A record of the mantle plume-related magmatism of the Caribbean Large Igneous Province. *Lithos*, 254-255, 67-83. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.03.013>
- Frunzeti, N., Baciú, C., Etiope, G., Pfanz, H. (2012). Geogenic emission of methane and carbon dioxide at Beciu mud volcano, (Berca-Arbănași hydrocarbon-bearing structure, Eastern Carpathians, Romania). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 7(3), 159-166. <https://doi.org/10.1029/2000RG000093>
- Galindo, P. (2016). Transtension and transpression in an oblique subduction setting: Evolution of the Bahia Basin, Colombian Caribbean margin. 270. <https://spiral.imperial.ac.uk:8443/handle/10044/1/31408>
- Galindo, P. A., Lonergan, L. (2020). Basin Evolution and Shale Tectonics on an Obliquely Convergent Margin: The Bahia Basin, Offshore Colombian Caribbean. *Tectonics*, 39(3). <https://doi.org/10.1029/2019TC005787>
- Guajira, M., Vargas, C. A., Montes, L. A., Ortega, C. (2012). Geología Estructural Y Estratigrafía Del Área Majayura (Guajira). *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36 (140), 385-398.
- Posada, G., Monsalve, G., Abad, A. M. (2017). Focal mechanism construction in the north of the Colombian Central Cordillera from record the National Seismological Network of Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 42, 36-44. DOI: <https://doi.org/10.15446/rbct.n42.57160>
- Hamilton, W. B. (1994). Subduction systems and magmatism. *Geological Society Special Publication*, 81(81), 3-28. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1994.081.01.02>
- Havskov, J., Voss, P. H., Ottemöller, L. (2020). Seismological observatory software: 30 yr of seisan. *Seismological Research Letters*, 91(3), 1846-1852. <https://doi.org/10.1785/0220190313>
- Higgs, R., Court, O., Road, B., Ox, O. (2015). Caribbean South America oblique collision model revised. 613-657.
- Idárraga-García, J., León, H. (2019). Unraveling the underwater morphological features of Roncador Bank, archipelago of San Andres, Providencia and Santa Catalina (Colombian Caribbean). *Frontiers in Marine Science*, 1-15. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00077>
- Idárraga-García, J., Masson, D. G., García, J., León, H., Vargas, C. A. (2019). Architecture and development of the Magdalena Submarine Fan (southwestern Caribbean). *Marine Geology*, 414(May), 18-33. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.05.005>
- James, K. (2005). A simple synthesis of Caribbean geology. *Caribbean Journal of Earth Science*, 39 (December), 69-82.
- Kellogg, J. N., Bonini, W. E. (1982). Subduction of the Caribbean Plate and basement uplifts in the overriding South American Plate. *Tectonics*, 1(3), 251-276. <https://doi.org/10.1029/TC001i003p00251>

- Kellogg, J., Toto, E., Ceron, J. (2005). Structure and Tectonics of the Sinu-San Jacinto Accretionary Prism in Northern Colombia. X Congreso Colombiano de Geología, Bogota, 2005, February 2015, 1-10.
- Ladd, J. W., Stoffa, P. L., Westbrook, G., Dh, D. (1984). Seismic reflection profiles across the southern margin of the Caribbean. Geological Society of America, memoir 162, 154-158.
- Lewis, J. F., Draper, G., Proenza, J. A., Espaillat, J., Jiménez, J. (2006). Ophiolite-related ultramafic rocks (serpentinites) in the Caribbean region: A review of their occurrence, composition, origin, emplacement and Ni-laterite soil formation. *Geological Acta*, 4(1–2), 237-263.
<https://doi.org/10.1344/105.000000368>
- Londono, J., Schiek, C., Biegert, E. (2015). Basement architecture of the Southern Caribbean Basin, Guajira Offshore, Colombia. *AAPG Memoir*, 108, 85-102.
<https://doi.org/10.1306/13531932M1083639>
- Lozano, E., Zamora, N. (2014). *Compilación De La Cuenca Sinú – San Jacinto, Anexo K. Servicio Geológico Colombiano.*
- Mantilla, O., Castellanos, J., Ramirez, V., Hurtado, D., Rubio, C. (2013). Tectono – Stratigraphic Events of the Northern Caribbean Offshore , Colombia. AAPG International Conference and Exhibition.
- Martinez, W., Hermoza, W., Espino, D., Carrington, J., Perez, J., Pate, K., Rodrigo, M. (2015). Tectono-stratigraphic evolution of the Chichibacoa–Rancherías basin offshore Colombia. *AAPG Memoir*, 108, 709-728. <https://doi.org/10.1306/13531954M1083657>
- McCulloch, M. T., Gamble, J. A. (1991). Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3-4), 358-374.
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90029-H](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90029-H)
- Montes, C., Guzman, G., Bayona, G., Cardona, A., Valencia, V., Jaramillo, C. (2010). Clockwise rotation of the Santa Marta massif and simultaneous Paleogene to Neogene deformation of the Plato-San Jorge and Cesar-Ranchería basins. *Journal of South American Earth Sciences*, 29 (4), 832-848. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.07.010>
- Montes, C., Rodriguez-Corcho, A. F., Bayona, G., Hoyos, N., Zapata, S., Cardona, A. (2019). Continental margin response to multiple arc-continent collisions: The northern Andes-Caribbean margin. *Earth-Science Reviews*, 198(July). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102903>
- Moores, E. M. (1998). Ophiolites, the sierra nevada, “cordillera,” and orogeny along the pacific and caribbean margins of North and South America. *International Geology Review*, 40(1), 40-54.
<https://doi.org/10.1080/00206819809465197>
- Mora-Bohórquez, J. A., Ibáñez-Mejía, M., Oncken, O., de Freitas, M., Vélez, V., Mesa, A., Serna, L. (2017). Structure and age of the Lower Magdalena Valley basin basement, northern Colombia: New reflection-seismic and U-Pb-Hf insights into the termination of the Central Andes against the Caribbean basin. *Journal of South American Earth Sciences*, 74, 1-26.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.01.001>
- Mora-Páez, H., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., Mencin, D., Fernandes, R. M. S., Diederix, H., LaFemina, P., Cardona-Piedrahita, L., Lizarazo, S., Peláez-Gaviria, J. R., Díaz-Mila, F., Bohórquez-Orozco, O., Giraldo-Londoño, L., Corchuelo-Cuervo, Y. (2019). Crustal

deformation in the northern Andes – A new GPS velocity field. *Journal of South American Earth Sciences*, 89(November 2018), 76-91. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.11.002>

- Mora Bohórquez, J. A. (2018). Upper Cretaceous to Recent plate tectonics , basin formation and tectono-stratigraphy of the Lower Magdalena valley and San Jacinto fold belt of Northwestern Colombia : implications for hydrocarbon systems. Tesis doctoral. Freie Universitat Berlin, Alemania.
- Naranjo-Vesga, J., Ortiz-Karpf, A., Wood, L., Jobe, Z., Paniagua-Arroyave, J. F., Shumaker, L., Mateus-Tarazona, D., Galindo, P. (2020). Regional controls in the distribution and morphometry of deep-water gravitational deposits along a convergent tectonic margin. *Southern caribbean of Colombia. Marine and Petroleum Geology*, 121,104639. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104639>
- Nunes, S. A. S., Glória, M. E., Oliveira, J. P. M., Cardoso, C. E. N., de Andrade Viera Filho, C. L., de Oliveira, J. P., Borghi, L. (2017). The use of seismic attribute in 2D data: A case study. 12681271. <https://doi.org/10.1190/sbgf2017-246>
- Pindell, J. L., Higgs, R. (1998). Cenozoic palinspastic reconstruction paleogeographic evolution and hydrocarbon setting of the northern margin of south america. *SEPM Special Publication*, 58, 56576.
- 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. *Geological Society Special Publication*, 328, 1-55. <https://doi.org/10.1144/SP328.1>
- Pindell, J. L., Maresch, W. V., Draper, G., Higgs, R. (2005). Proto-Caribbean margins. 2394(01), 7-52. [https://doi.org/10.1130/2005.2394\(01\)](https://doi.org/10.1130/2005.2394(01)).
- Piraquive, A. (2017). Structural framework, deformation and exhumation of the Santa Marta Schists: Accretion and deformational history of a Caribbean Terrane at the north of the Sierra Nevada de Santa Marta. 234. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01689912/document>
- Rahe, B., Ferrill, D. A., Morris, A. P. (1998). Physical analog modeling of pull-apart basin evolution. *Tectonophysics*, 285(1–2), 21–40. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00193-5](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00193-5)
- Ramirez, V., Vargas, L. S., Rubio, C., Nino, H., Mantilla, O. (2015). Petroleum systems of the Guajira Basin, northern Colombia. *AAPG Memoir*, 108, 399–430. <https://doi.org/10.1306/13531944M1083647>
- Restrepo-Correa, I. C., Ojeda, G. Y. (2010). Geologic controls on the morphology of La Aguja submarine canyon. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(4), 861–870. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2010.07.001>
- Rodríguez, I., Bulnes, M., Poblet, J., Masini, M., Flinch, J. (2021). Structural style and evolution of the offshore portion of the Sinu Fold Belt (South Caribbean Deformed Belt) and adjacent part of the Colombian Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 125, 104862. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104862>
- Romito, S., Mann, P. (2021). Tectonic terranes underlying the present-day caribbean plate: Their tectonic origin, sedimentary thickness, subsidence histories and regional controls on

- hydrocarbon resources. In Geological Society Special Publication, Vol. 504(1).
<https://doi.org/10.1144/SP504-2019-221>
- Rossello, E. A., Cossey, S. P. J. (2012). What is the evidence for subduction in the Caribbean margin of Colombia? XI Simposio Bolivariano - Exploración Petrolera En Las Cuencas Subandinas, April, 1-4.
- Sanchez-Rojas, J., Palma, M. (2014). Crustal density structure in northwestern South America derived from analysis and 3-D modeling of gravity and seismicity data. *Tectonophysics*, 634(July), 97–115. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.07.026>
- Toro, R. A; Osorio, J. A. (2005). Determinación De Los Tensores De Esfuerzos Actuales Para El Segmento Norte De Los Andes Calculados a Partir De Mecanismos Focales De Sismos Mayores. *Boletín de Geología*, 27(1), 13-24.
- Toto, E. A., Kellogg, J. N. (1992). Structure of the Sinu-San Jacinto fold belt - an active accretionary prism in northern Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 5(2), 211-222.
[https://doi.org/10.1016/0895-9811\(92\)90039-2](https://doi.org/10.1016/0895-9811(92)90039-2)
- Trejos-Tamayo, R., Vallejo, F., Arias, V., García, C., Pardo-Trujillo, A., Bedoya, E., Flores, J. A. (2020). Biostratigraphy of ejected material from mud volcanoes in the Caribbean region of Colombia: Contribution to the stratigraphy of Sinú Basin. *Journal of South American Earth Sciences*, 103(April). <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102782>
- Van Benthem, S., Govers, R., Spakman, W., Wortel, R. (2013). Tectonic evolution and mantle structure of the Caribbean. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(6), 3019-3036.
<https://doi.org/10.1002/jgrb.50235>
- Vence, E. M. (2008). Subsurface structure, stratigraphy, and regional tectonic controls of the Guajira margin of northern Colombia.
- Vernette, G., Mauffret, A., Bobier, C., Briceno, L., Gayet, J. (1992). Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian Margin. *Tectonophysics*, 202(2-4), 335-349. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90118-P](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90118-P)
- Villagómez, D., Spikings, R., Mora, A., Guzmán, G., Ojeda, G., Cortés, E., Van Der Lelij, R. (2011). Vertical tectonics at a continental crust-oceanic plateau plate boundary zone: Fission track thermochronology of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Tectonics*, 30(4).
<https://doi.org/10.1029/2010TC002835>
- Wen, Z., Jiang, S., Song, C., Wang, Z., He, Z. (2019). Basin evolution, configuration styles, and hydrocarbon accumulation of the South Atlantic conjugate margins. *Energy Exploration and Exploitation*, 37(3), 992-1008. <https://doi.org/10.1177/0144598719840751>
- Yattselev, M. L. (2018). Symmetric contours and convergent interpolation. *Journal of Approximation Theory*, 225, 76-105. <https://doi.org/10.1016/j.jat.2017.10.003>