

CAMBIOS MORFOLÓGICOS HISTORICOS EN LOS FONDOS DEL PRODELTA DEL
RÍO MAGDALENA, SECTOR BOCAS DE CENIZA, COSTA CARIBE DE COLOMBIA

DIEGO ALEXANDER MADRID MONTES

ESCUELA DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD EAFIT
MEDELLÍN
2017

(Página en blanco)

CAMBIOS MORFOLÓGICOS HISTÓRICOS EN LOS FONDOS DEL PRODELTA DEL
RÍO MAGDALENA, SECTOR BOCAS DE CENIZA, COSTA CARIBE DE COLOMBIA

DIEGO ALEXANDER MADRID MONTES

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Geólogo

Asesores:

IVÁN DARÍO CORREA ARANGO
JUAN FELIPE PANIAGUA ARROYAVE

ESCUELA DE CIENCIAS

UNIVERSIDAD EAFIT

MEDELLÍN

2017

(Página en blanco)

DEDICATORIA

Para mi Madre y mi hermano

Pilares en mi vida,
Fuerza de mis días
Le doy gracias a Dios
Que me dio esta bendición.

Sus almas puras,
Guían mis senderos,
Acompañan mis pasos,
Y me dan de valor.

Y aunque en el camino vacile
Siempre encuentro su apoyo,
Llenándome de coraje para afrontar
El futuro incierto por el cual luchar.

Así pues infinitas gracias
Porque a pesar de que cada día conozca
Muchas más cosas que el día anterior,
Nada puede igualar la alegría
De haberles conocido a ustedes dos.

AMMO-DAMM

AGRADECIMIENTOS

A los asesores del proyecto Iván Darío Correa Arango y Juan F. Paniagua Arroyave por dar un acompañamiento permanente y proveer herramientas para resolver las dudas que el proyecto iba generando.

A Cristina Isabel Pereira quien facilitó algunos insumos, herramientas y siempre estuvo atenta a cualquier inquietud.

A los profesores María Isabel Marín Cerón y Geovany Bedoya Sanmiguel por su ayuda durante el desarrollo de este proyecto.

Al grupo de docentes que fueron parte de mi proceso de formación por haberme instruido en el camino de la Geología y la vida profesional y en general a la Universidad EAFIT por prestar sus espacios siempre con la mejor calidad.

A los compañeros que siempre tendieron la mano en el momento necesario.

A mi madre y mi hermano y por último a usted que lee este proyecto.

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

RESUMEN

El reconocimiento de la morfología y cuantificación de los cambios del fondo marino del prodelta del río Magdalena resulta fundamental en el estudio de la evolución litoral de esta zona del Caribe Norte de Colombia. A partir de la síntesis de información disponible, digitalización de cartas de navegación, creación y comparación de modelos batimétricos en 3D entre los años 1935, 1999 y 2004, se proporcionan nuevos datos respecto a los patrones morfológicos y cambios en la sedimentación durante los últimos 80 años del prodelta del río Magdalena.

El fondo marino del prodelta está principalmente compuesto por sedimentos terrígenos producto del suministro inmediato del río Magdalena, y por estar disectado por 5 cañones submarinos por los cuales se desencadenan corrientes turbidíticas impulsadas por la actividad sísmica de la zona. Se reconocen asimismo geoformas tipo canales (diques) y barras de arena en zonas donde la plataforma presenta pendientes moderadamente bajas (de 2 a 7°) y condiciones adecuadas para la acumulación de sedimentos. Aunque la formación de plataforma en esta zona es limitada dado que la mayoría del suministro de sedimentos se dirige hacia los cañones, se reconocen dos sectores aledaños a la Ciénaga Mallorquín y Ciénaga Grande de Santa Marta donde este no parece ser el caso. Se interpretan algunos abombamientos como domos que sobresalen ~50 m en comparación al perfil, que están asociados probablemente a las intrusiones diapíricas que afectan al Caribe Colombiano.

El balance de sedimentos en el prodelta del Magdalena ha sido positivo (~30 m³/m²) teniendo como referencia la superficie del año 1935. Sin embargo, la comparación de la información para el periodo más reciente (entre 1999 y 2004) sugiere una disminución promedio de la cobertura sedimentaria de ~3 m³/m². En síntesis, y teniendo en cuenta las limitaciones asociadas con la exactitud de los datos analizados, los resultados aquí presentados sugieren la profundización de la zona próxima a la línea de costa y somerización costa afuera, lo que podría indicar que los sedimentos erosionados se han desplazado hacia mayores profundidades como producto de la dinámica de la zona.

Palabras Clave: Geomorfología submarina, corrientes de turbidez, plataforma continental, DEM, cartas de navegación, Surfer, ArcGIS, Kriging.

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

CONTENIDO

RESUMEN.....	9
1. INTRODUCCIÓN	19
1.1. Justificación	19
1.2. Objetivos.....	20
1.2.1. Objetivo General	20
1.2.2. Objetivos Específicos.....	20
2. METODOLOGÍA	21
2.1. Zona de estudio.....	21
2.1.1. Localización	21
2.1.2. Tectónica y rasgos estructurales	22
2.1.3. Geología litoral.....	23
2.1.4. Clima.....	26
2.1.5. Vientos.....	27
2.1.6. Oleaje, Marea y Deriva Litoral.....	28
2.1.7. Cambios del nivel relativo del mar	29
2.2. Síntesis de los conocimientos físicos y la elaboración de los modelos 3D del área estudiada del Prodelta del Magdalena.....	29
2.3. Variaciones morfológicas en los años 1935, 1999 y 2004.....	32
3. RESULTADOS.....	35
3.1. Descripción morfológica del sector de estudio con base en los modelos 3D de los años 1935, 1999 y 2004	35
3.1.1. Conocimiento de la morfología actual	35
3.1.2. Superficie batimétrica de 1935.....	39
3.1.3. Superficie batimétrica de 1999.....	40

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

3.1.4.	Superficie batimétrica de 2004.....	42
3.2.	Espesores y volúmenes de sedimento	42
3.2.1.	Perfiles batimétricos.....	43
3.2.2.	Volúmenes	49
4.	DISCUSION	55
4.1.	Interpretación a partir de los rasgos morfológicos descritos.....	55
4.2.	Cambio en los espesores y volúmenes de sedimentos	57
5.	CONCLUSIONES	59
6.	REFERENCIAS.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio. _____	21
Figura 2. Mapa litotectónico y morfoestructural del norte de Colombia. Tomado de Cediel et al. (2003). Nótese la convergencia de las placas, la disposición de las fallas Romeral - Oca y los terrenos Sinú (SN) y San Jacinto (SJ). _____	22
Figura 3. Mapa geológico de Barranquilla. Nótese que la mayor parte del relieve costero está formado por depósitos Cuaternarios. Tomado de Barrera (2001) con base en la plancha 17 del Servicio Geológico Colombiano. _____	24
Figura 4. Caracterización litológica de la plataforma. Tomado de Molina (1993). _____	25
Figura 5. Temperatura promedio anual de la ciudad de Barranquilla. Tomado de CIOH, 2017.	25
Figura 6. Precipitación promedio mensual de la ciudad de Barranquilla. Tomado de CIOH, 2017. _____	26
Figura 7. Magnitud de la velocidad promedio del viento. Tomado de CIOH, 2017. _____	27
Figura 8. Oleaje en el sector Bocas de Ceniza. Tomada del CIOH, 2017. Nótese que la dirección preferencial del oleaje viene del noreste. _____	28
Figura 9. Carta de navegación 5688 de Puerto Colombia a Santa Marta, 1935. Recuperado de expedición Nokomis, 1935-36 (ver Anexo 5). _____	30
Figura 10. Carta de navegación Puerto Colombia a Santa Marta COL 407, 1999. El cuadro rojo enmarca la zona de estudio, los puntos en morado corresponden al archivo shapefile de profundidades que fue realizado en ArcGIS. Recuperado del Atlas Cartográfico de los Océanos y Costas de Colombia (ver Anexo 5). _____	30
Figura 11. Carta de navegación COL 612, 2004. El cuadro rojo enmarca la zona de estudio, los puntos en marrón corresponden al archivo shapefile de profundidades que fue realizado en ArcGIS. Recuperado del Atlas Cartográfico de los Océanos y Costas de Colombia (ver Anexo 5). _____	31
Figura 12. Extensión de la plataforma continental. Tomado de Molina (1993). _____	35
Figura 13. Mapa de ubicación de los perfiles batimétricos de los cañones. Tomado de Molina (1993). _____	36
Figura 14. Perfiles batimétricos de los cañones identificados en cercanías del sector Bocas de Ceniza. Tomada de Molina (1993). _____	37

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

Figura 15. Modelo 3D de la superficie batimétrica del año 1935. Se muestran los tres tipos de polígonos identificados de acuerdo con la morfología (ver texto) y se encierra la geoforma interpretada como abombamiento. _____	38
Figura 16. Modelo 3D de la superficie batimétrica del año 1999. Ver explicación en el rótulo de la Figura 15). _____	38
Figura 17. Modelo 3D de la superficie batimétrica del año 2004. Veáse el rótulo de la Figura 15 para mayor información. _____	39
Figura 18. Mapa de la zona de estudio, con la ubicación de los perfiles batimétricos. _____	41
Figura 19. Perfiles batimétricos para el Corte A-Ap. _____	43
Figura 20. Perfiles batimétricos para el perfil B-Bp. _____	44
Figura 21. Perfiles batimétricos para el Corte C-Cp. _____	45
Figura 22. Perfiles de batimétricos para el Corte D-Dp. _____	45
Figura 23. Perfiles batimétricos para el Corte E-Ep. _____	46
Figura 24. Comparación de las superficies batimétricas de los años 1935-1999. _____	48
Figura 25. Comparación de las superficies batimétricas de los años 1935-2004. _____	48
Figura 26. Comparación de las superficies batimétricas de los años 1999- 2004. _____	49
Figura 27. Diferencia en la superficie batimétrica entre los años 1935 y 1999. _____	50
Figura 28. Diferencia en la superficie batimétrica de los años 1935 y 2004. _____	51
Figura 29. Diferencia en la superficie batimétrica de los años 1999 y 2004. _____	52
Figura 30. Comparación de perfiles batimétricos en la desembocadura del Magdalena entre periodos de deslizamientos. Tomado de Koopmans (1971). _____	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Compilación de técnicas utilizadas por otros autores para el cálculo de volúmenes de sedimentos. _____	33
Tabla 2. Errores resultantes de la interpolación realizada con cada método en Surfer. En rojo se resalta el método elegido. _____	34
Tabla 3. Cuantificación de área superficial y volúmenes de sedimentos para los tres periodos de tiempo comparados. La casilla diferencia muestra el porcentaje de diferencia entre los resultados de los dos métodos de cálculo usados, i.e. funciones Volume y Residuals. ____	47
Tabla 4. Promedio del cambio de volumen por área unitaria. Nótese que los volúmenes netos de las comparaciones con la superficie de 1935 son positivos, mientras la comparación de las superficies 1999 y 2004 entre sí da un balance negativo. _____	47
Tabla 5. Promedio de volumen para los tres periodos de tiempo. _____	53

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Base de datos *ArcGIS*.

Anexo 2. Base de datos *Surfer*.

Anexo 3. Datos de los perfiles batimétricos en Excel.

Anexo 4. Rutas de opciones para el cálculo de volúmenes en *Surfer* y *ArcGIS*.

Anexo 5. Cartas Batimétricas

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

Muchas de las plataformas continentales terrestres están cubiertas por materiales recientes poco consolidados que exhiben cambios morfológicos de consideración en periodos de tiempo relativamente cortos (Cowell & Thom, 1994; Restrepo et al., 2007; Martínez & Anfuso, 2008; Ordaz et al., 2016). En consecuencia, las plataformas continentales pueden evidenciar gran variedad de geoformas en sus fondos, y su estudio permite identificar los procesos físicos que allí se desarrollan. De particular importancia se consideran los procesos de sedimentación y erosión en zonas de desembocadura fluviales (Koopmans, 1971; Mendoza & Ortiz, 2000; Navarro, 2009; Cuadrado & Gómez, 2010; Barrera, 2015).

Los deltas fluviales pueden considerarse como *“protuberancias de la costa formadas donde los ríos entran a los océanos, mares semi-cerrados, lagos o lagunas y suministran sedimentos más rápidamente de lo que pueden ser redistribuidos por los procesos de cuenca”* (Elliot, 1986). Los deltas se consideran relativamente más importantes en los mares abiertos (Restrepo & López, 2008; Boggs, 2012) y son comunes en el océano moderno debido no sólo a la estabilidad relativa del nivel del mar durante el Holoceno tardío posterior a las fluctuaciones evidenciadas durante el Pleistoceno, sino también a las altas cargas de sedimentos transportados por los ríos (Inman and Nordstrom, 1971; Koopmans, 1971; Coleman, 1976 en Restrepo & López, 2008; Wright, 1978; Syvitski et al., 2005).

El ser humano ha inducido fuertes modificaciones a los sistemas costeros que han desencadenado cambios drásticos en cortos periodos de tiempo (años, décadas) (Syvitski et al., 2005; Restrepo & López, 2008). Un buen ejemplo de lo anterior se relaciona con el área del prodelta del río Magdalena: con el fin de prevenir la sedimentación en la desembocadura del río y promover la navegación comercial a los puertos fluviales de Barranquilla, fueron construidos en la década de los 30's dos estructuras rocosas longitudinales (tajamares) de varios km de longitud cada una. Estas estructuras se encargan de confinar el canal principal del río, aumentar el flujo de la corriente y desplazar los aportes sedimentarios de este a profundidades mayores (Alvarado, 2005; Gómez, 2015). Lo anterior ha ocasionado cambios morfológicos

relativamente importantes en la desembocadura del río y sectores adyacentes más profundos, incluyendo fenómenos erosivos en algunos sectores, en ocasiones producidos por corrientes de turbidez (Molina et al., 1999; Restrepo & López, 2008).

El proyecto aquí presentado se orienta a reconocer los cambios morfológicos actuales de una zona del prodelta del río Magdalena. Este análisis se realizó con base en el modelado de los fondos y la cuantificación de los cambios recientes (~80 años) calculados a partir de comparaciones batimétricas, las cuales permitieron a su vez el reconocimiento de los lugares donde ocurrió somerización o profundización de varios perfiles del fondo. La metodología y resultados aquí presentados son insumos para próximos estudios básicos y aplicados de interés para la instalación de plataformas petroleras, construcción de puertos y solución de problemas de erosión litoral, entre muchos otros.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Contribuir al conocimiento de la ubicación, magnitudes y causas de los cambios morfológicos históricos (1935 - 2004) en un sector central del prodelta del río Magdalena.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Sintetizar los conocimientos físicos y elaborar modelos digitales 3D del área de estudio con base en las cartografías batimétricas disponibles de los años 1935, 1999 y 2004.
- Ubicar, interpretar y evaluar semi-cuantitativamente las magnitudes de los cambios morfológicos históricos (somerización – profundización) producidos por procesos de erosión y sedimentación en la plataforma del área de estudio.

2. METODOLOGÍA

2.1. Zona de estudio

2.1.1. Localización

El área de estudio se ubica sobre el prodelta actual del río Magdalena, al frente de los dos tajamares del sector Bocas de Cenizas (departamentos de Atlántico y Magdalena) en la Costa Caribe Colombiana (Figura 1). Esta zona corresponde a un cuadrado de aproximadamente 36 km² limitado por los paralelos 10°59'33.91"N y 11°20'27.55"N de latitud norte y los meridianos 75° 0'23.17"O y 74°39'20.50"O de longitud oeste. Tiene como límite interno una extensión de línea de costa de aproximadamente 45 km con profundidades que oscilan entre los 0 y 1,200 m de profundidad. La zona de estudio puede encontrarse en la plancha 17 (escala 1:100.000) del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Barrera, 2001).

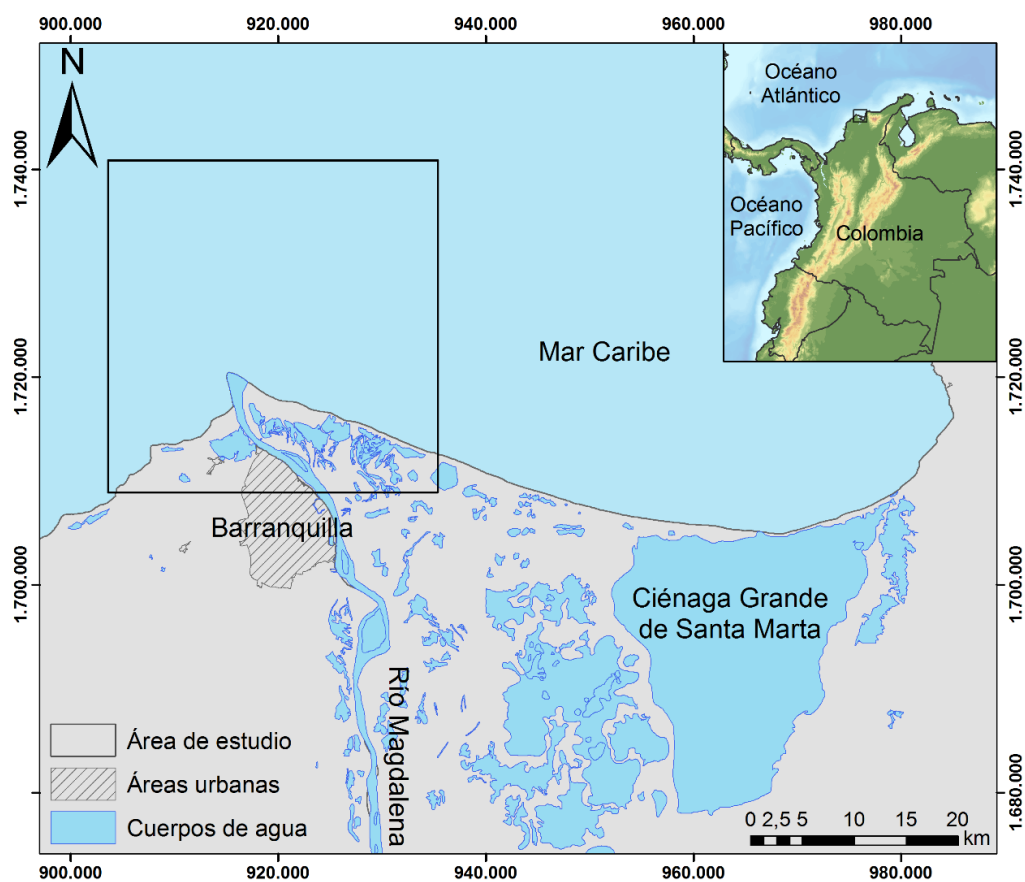


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio.

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

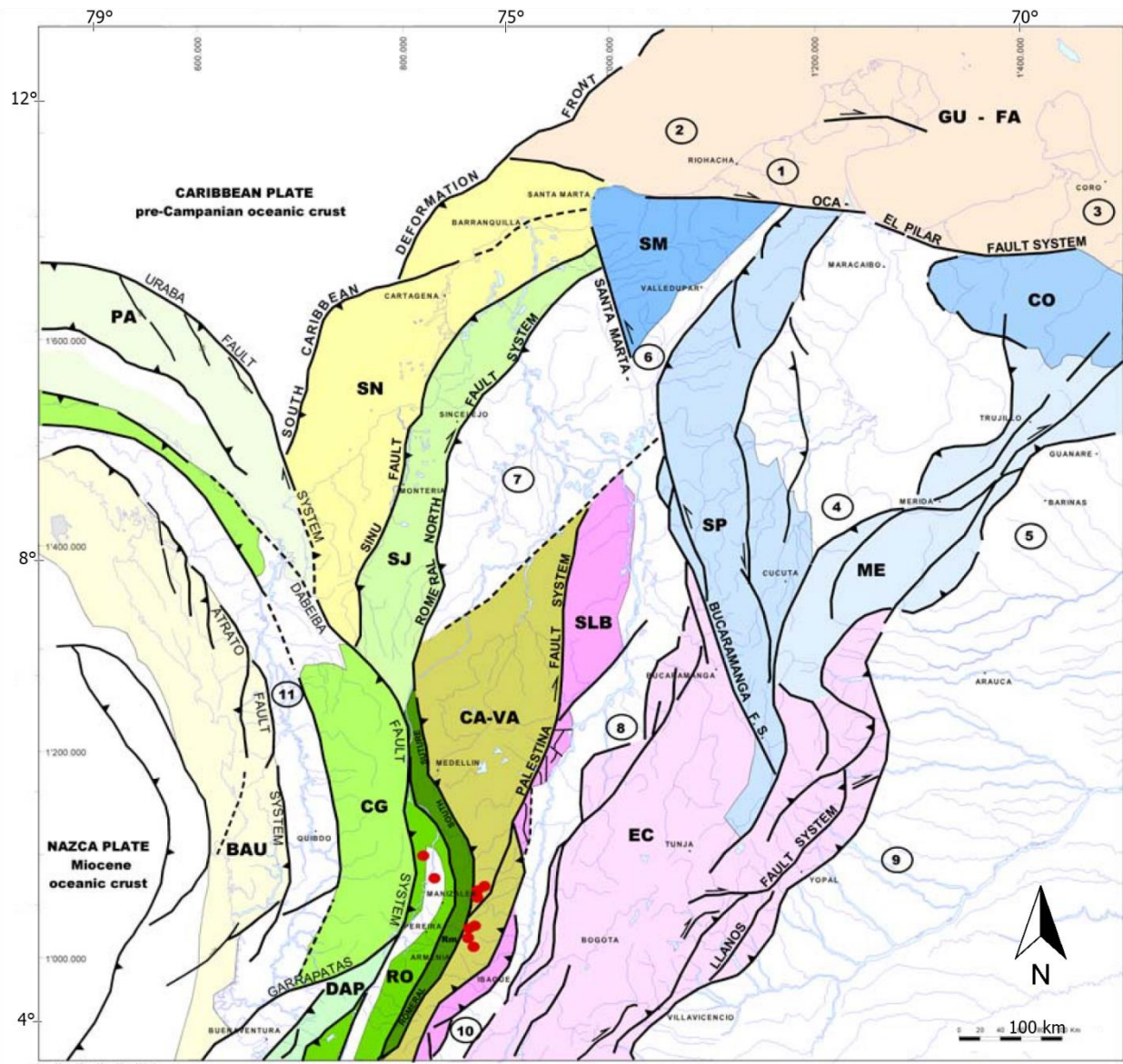


Figura 2. Mapa litotectónico y morfoestructural del norte de Colombia. Tomado de Cediel et al. (2003). Nótese la convergencia de las placas, la disposición de las fallas Romeral - Oca y los terrenos Sinú (SN) y San Jacinto (SJ).

2.1.2. Tectónica y rasgos estructurales

La zona Caribe colombiana se caracteriza por la convergencia de las placas tectónicas de Nazca, Caribe y Suramericana, con procesos de carácter no magmático y baja sismicidad (Duque-Caro, 1984; Guzmán, 2007; Gómez, 2015; Figura 2). Durante el periodo Terciario se conformaron en la zona sur del Caribe dos prismas acrecionarios conocidos como el Cinturón del Sinú, en la parte más occidental costera, y el Cinturón

de San Jacinto, en la parte central (Barrera, 2001, Alfaro & Holz, 2014). Como resultado de estas interacciones y de la importante sedimentación de materiales orgánicos, se desarrollaron en el área focos de diapirismo arcilloso, tanto en tierra como en la plataforma y taludes continentales (Duque-Caro, 1984; Molina, 1993).

Los terrenos Sinú – San Jacinto (Figura 2) han sido interpretados como prismas de acreción asociados a la subducción de la Placa Caribe debajo de la Placa Suramérica (Aguilera, 2011; Alfaro & Holz, 2014). El frente de este prisma desaparece bajo el delta del río Magdalena y presenta dos direcciones estructurales diferentes: al este del Magdalena tiene una dirección preferencial este – oeste que caracteriza al sistema de fallas Oca; en tanto que al oeste del Magdalena las direcciones estructurales se orientan ~ 35° N y corresponden a la terminación del sistema de fallas Romeral (Vernette, 1985 en Molina, 1993; Vernet, 1986 en Gómez, 2015).

El estilo estructural del terreno Sinú – San Jacinto consta de anticlinales estrechos, pendientes y alargados, y de sinclinales amplios y suaves (Duque-Caro, 1983). Fallas activas, tales como las del sistema Santa Marta-Bucaramanga (SMBF), pueden desencadenar terremotos. En síntesis, *“estudios de desplazamiento en depósitos no consolidados sugieren que la SMFB ha tenido probablemente actividad Cuaternaria”* (Gómez, 2015).

2.1.3. Geología litoral

“En los relieves continentales aledaños al área de estudio afloran rocas sedimentarias del Paleógeno (Formación Las Perdices), Cuaternario (Formación La Popa) y depósitos no consolidados” (Barrera, 2001; Figura 3). A continuación, se presenta una breve descripción de las litologías presentes:

PgNgp: Formación Las Perdices, constituida por lodolitas, lodolitas arenosas, chert duro o capas silíceas y algunas areniscas. Las características litológicas y estructurales de estas rocas muestran una sedimentación marina restringida con aporte limitado de sedimentos terrígenos de tamaño limo, lodo y arena. También hubo precipitación de carbonatos que presentan invasión de organismos perturbadores del sustrato.

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

Qpp: Formación la Popa, conformada por caliza maciza de arrecifes coralinos, caliza porosa arrecifal, caliche amarillo con bloques de arrecifes coralinos, arcillas arenosas con bloques de calizas arrecifales y arcillas micáceas. De acuerdo con las características de estas rocas y la presencia de terrígenos se infiere un ambiente marino muy somero con influencia continental.

Qcal: Depósitos Coluvioaluviales, principalmente aluviales intermontanos y de derrubios. Su amplia distribución geográfica en el área hace difícil identificar su constitución litológica, en términos generales compuestas por gravas arenas, limos y arcillas de color pardo amarillento.

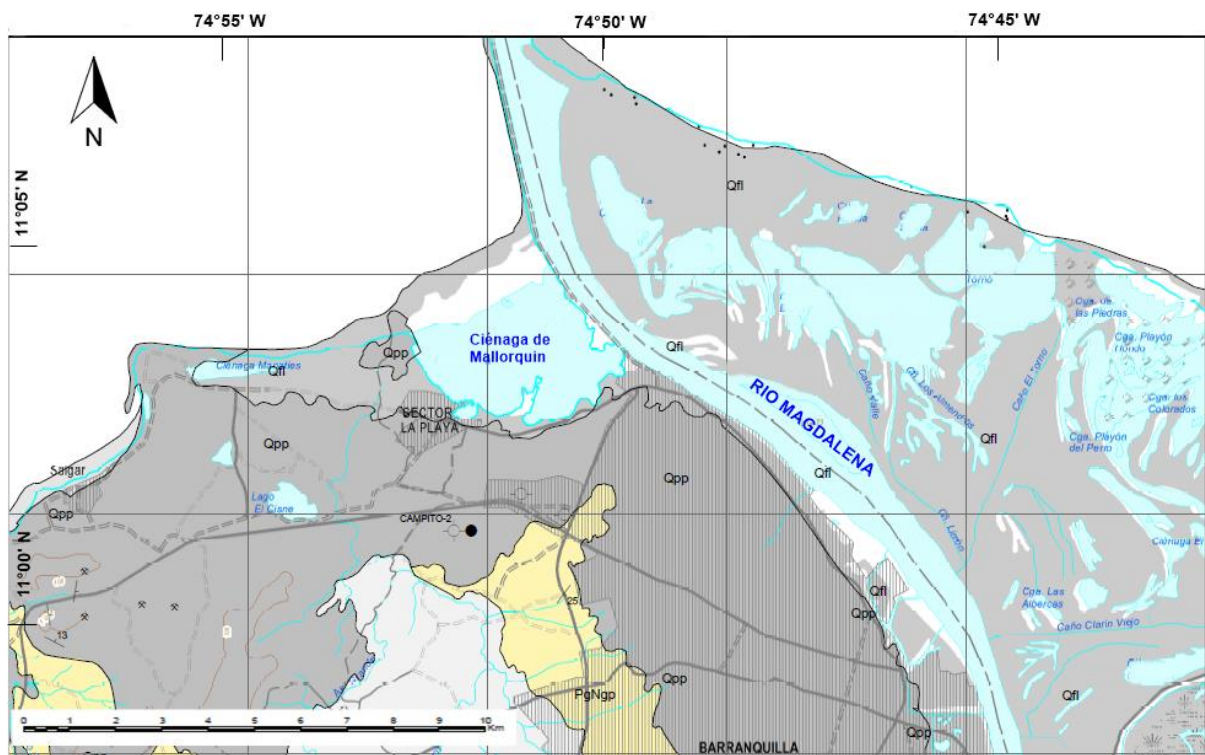


Figura 3. Mapa geológico de Barranquilla. Nótese que la mayor parte del relieve costero está formado por depósitos Cuaternarios. Tomado de Barrera (2001) con base en la plancha 17 del Servicio Geológico Colombiano.

Qfi: Depósitos Fluviolacustres, localizados en los márgenes del río Magdalena y en ciénagas asociadas. Los sedimentos del río están constituidos por arenas de grano medio a fino compuestas de cuarzo, y fragmentos líticos, mientras los de ciénaga son de tamaño arcilloso de color gris pardusco y con materia orgánica.

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

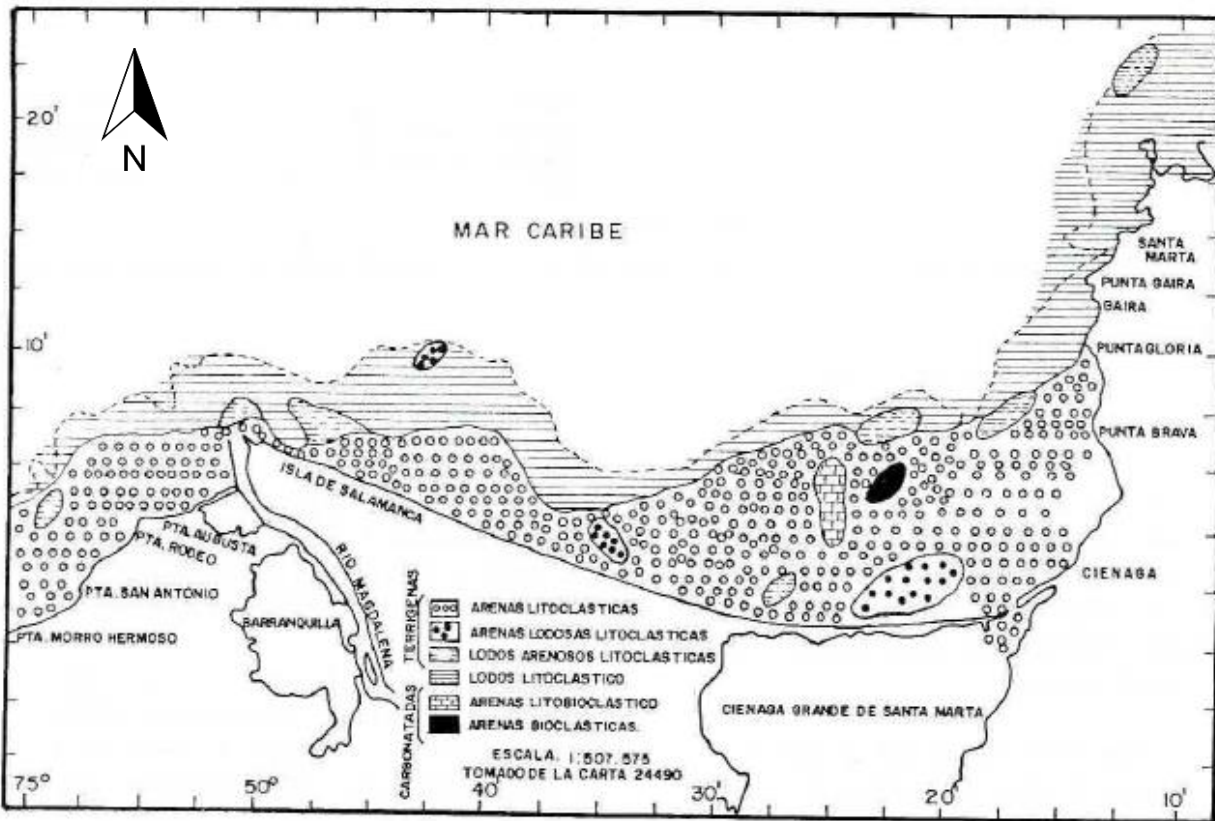


Figura 4. Caracterización litológica de la plataforma. Tomado de Molina (1993).

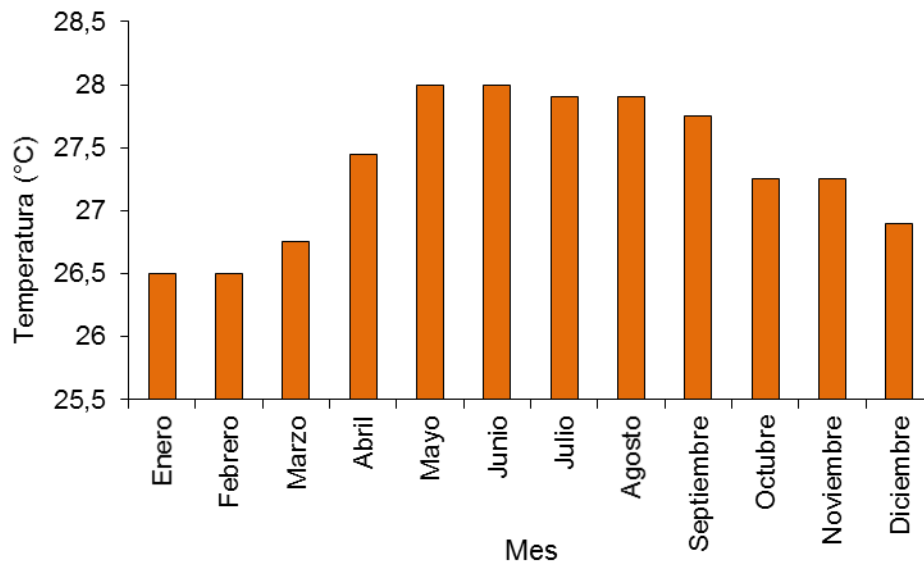


Figura 5. Temperatura promedio anual de la ciudad de Barranquilla. Tomado de CIOH, 2017.

Qmp: Depósitos marinos y de playa, principalmente sedimentos de playas y espigas. Están constituidos principalmente por arenas de grano fino a medio de color gris claro a oscuro por su alta presencia de minerales pesados.

En cuanto a la cobertura sedimentaria de la plataforma cercana al río Magdalena, Molina (1993) caracteriza las coberturas de sedimentos de la plataforma y define cuatro tipos de sedimentación terrígena (arenas litoclásticas, arenas lodosas litoclásticas, lodos arenosos litoclásticos y lodos litoclásticos). Estos tipos cubren el 96% del área, mientras los sedimentos carbonatados (arenas litobioclásticas y arenas bioclásticas) representan el 4% restante (Figura 4).

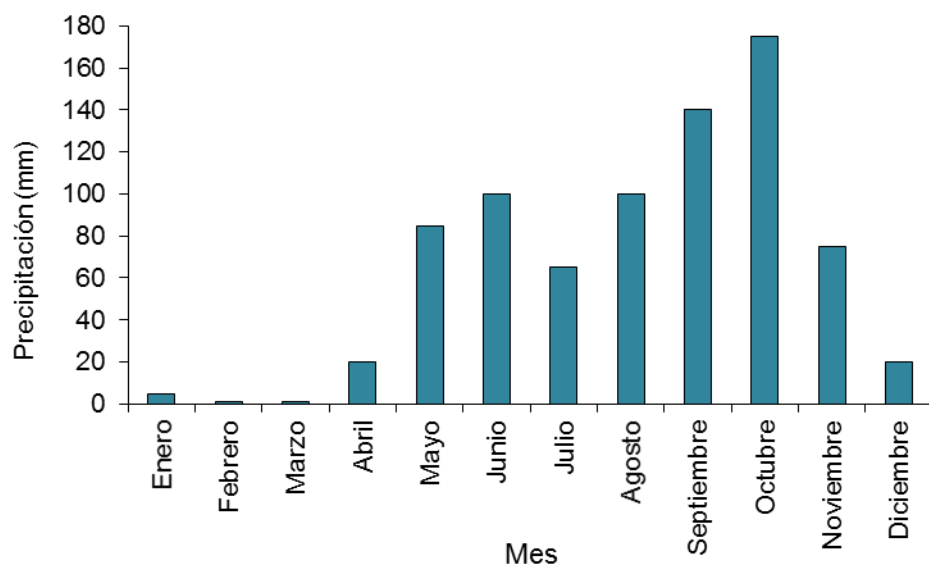


Figura 6. Precipitación promedio mensual de la ciudad de Barranquilla. Tomado de CIOH, 2017.

2.1.4. Clima

Los patrones climáticos en el Caribe colombiano están condicionados por la posición de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI). Cuando esta zona se posiciona hacia el sur del Ecuador, predominan las condiciones secas y de vientos; las condiciones de lluvia ocurren cuando la ZCI se desplaza hacia el norte del Ecuador. Este patrón temporal se debilita durante los eventos El Niño Oscilación Sur, durante los cuales la Costa Caribe se afecta por el déficit de precipitación durante El Niño, y por excesos de lluvia cuando ocurre La Niña (Ruiz & Pabón, 2013; Gómez, 2015). En la zona de estudio predomina el

clima árido a semiárido, con un régimen de temperaturas promedio de 27° (Figura 5) (Barrera, 2001; CIOH, s.f.).

Tal como en la parte central y oeste de Colombia, la región Caribe presenta un ciclo bimodal de precipitaciones con picos en los meses de mayo y octubre. El promedio de precipitación anual para la ciudad de Barranquilla es de 760 mm/año (Gómez, 2015, IDEAM s.f.). Las lluvias oscilan entre 70 y 178 mm/mes, siendo este último valor uno de los más altos índices de pluviosidad. El periodo seco transcurre entre los meses de diciembre a abril, con una precipitación entre los 1 y 35 mm/mes. El número de días de precipitación varía a lo largo del año entre los 0 y los 14 días (CIOH, s.f.; Figura 6).

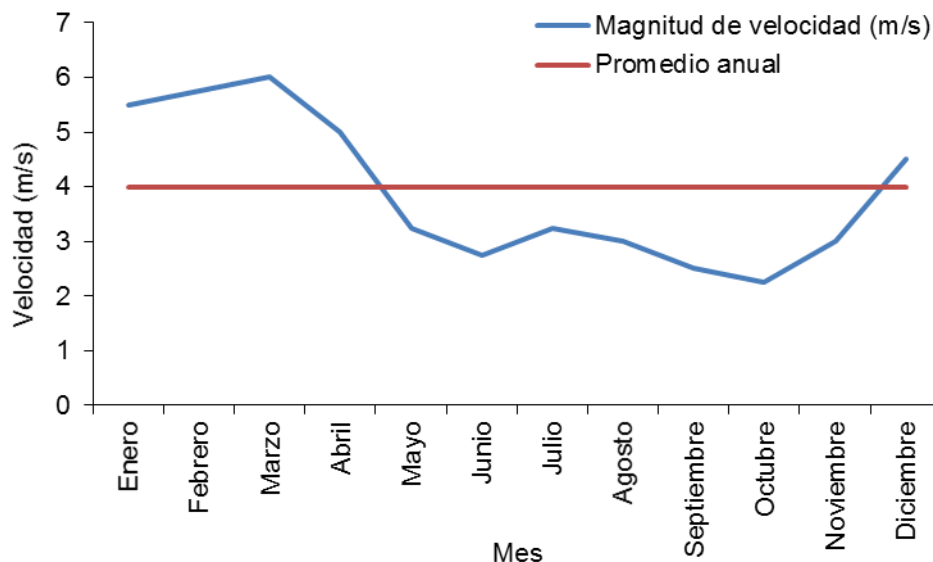


Figura 7. Magnitud de la velocidad promedio del viento. Tomado de CIOH, 2017.

2.1.5. Vientos

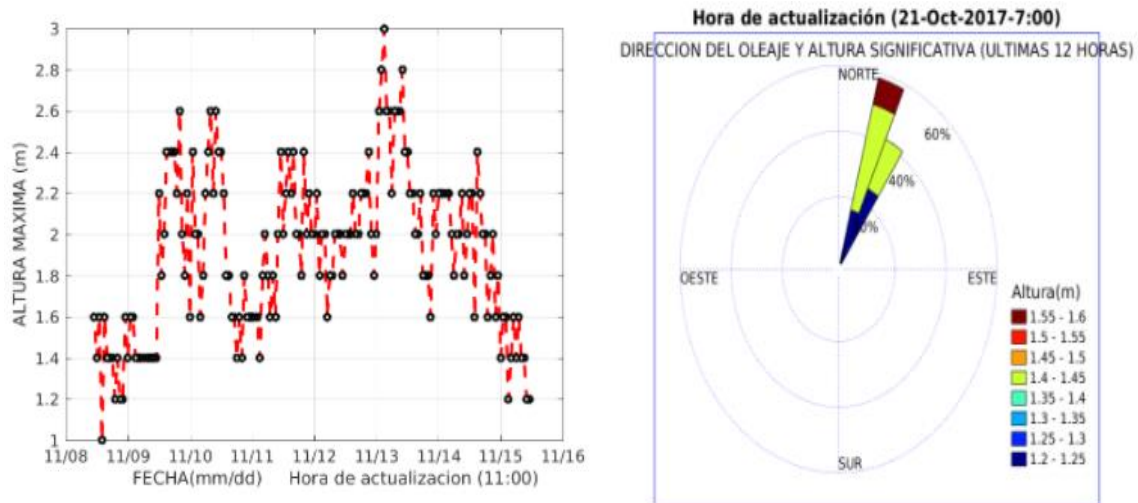
Durante la temporada seca, los vientos Alisios tienen una dirección de incidencia dominante norte-noreste. Estos vientos soplan constantemente durante el día, mientras que en la noche se debilitan permitiendo que la brisa marina predomine. En general, durante la temporada húmeda los vientos del norte disminuyen en velocidad (Gómez 2015).

La velocidad del viento promedio anual presenta un valor de 3.9 m/s, la cual depende del sistema de alta presión de las Azores y las fluctuaciones de la Zona de Convergencia

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

Intertropical. En temporada seca se dan condiciones de flujo constante de viento alcanzando valores de 4.5 a 6.1 m/s, mientras en la temporada húmeda la magnitud de la velocidad se reduce entre 2.7 y 3.2 m/s (CIOH, s.f.; Figura 7).



2.1.6. Oleaje, Marea y Deriva Litoral.

En el prodelta del río Magdalena, y en general en la Costa Caribe de Colombia, se evidencia marea del tipo semidiurno-mixto. Este tipo se caracteriza por dos mareas altas y dos mareas bajas en el día lunar, y ante una declinación mayor de la luna se observan desigualdades en las segundas mareas alta y baja que pueden expresarse débilmente (IDEAM, 2010). De acuerdo con la información del CIOH, en promedio la amplitud de la marea en la zona es del orden de 0.2 m, llegando a un valor máximo de 0.35 m. Basado en observaciones realizadas por Restrepo & López (2008), el oleaje cercano al delta del Magdalena para el periodo de 1963-2000 tuvo una dirección predominante noreste, con una altura promedio de 2.3 ± 1.2 m, y alturas significativas máximas entre 5.1 y 9 m. (Restrepo & López, 2008 en Gómez, 2015; Figura 8).

De acuerdo con la compilación hecha por Rangel & Posada (2005) de estudios regionales hechos en la zona, se ha reportado que la dirección predominante de la deriva litoral es hacia el suroeste (Vermette 1985; Javelaud, 1987; Molares 2001). La deriva

litoral se ve afectada por la contracorriente de Panamá, especialmente cuando los vientos Alisios disminuyen, generando corrientes con tendencias N-NE. Estos datos de la deriva litoral concuerdan con la acumulación de sedimentos en el margen este de estructuras de defensa costeras (Koopmans, 1971).

2.1.7. Cambios del nivel relativo del mar

Para el Caribe Colombiano se ha sugerido que se produce un aumento continuo en el nivel relativo del mar desde el Holoceno hasta el presente. El cambio de nivel relativo del mar se ve influenciado por el movimiento vertical neotectónico, glacioeustático e hidroisostático, así como la distribución dinámica de la masa de agua oceánica. Específicamente, los cambios relativos del nivel del mar pueden ser producidos por subsidencia, ya sea de la franja costera o de la superficie de la plataforma. Este caso se presenta a lo largo de deltas fluviales con abanicos de aguas profundas que contienen grandes volúmenes de sedimentos que causan subsidencia, lo que genera un aumento relativo en el nivel del mar (Stutz & Pilkey, 2011; Murray-Wallace & Woodroffe, 2014; Gómez, 2015).

2.2. Síntesis de los conocimientos físicos y la elaboración de los modelos 3D del área estudiada del Prodelta del Magdalena

Para sintetizar los conocimientos físicos del prodelta del río Magdalena se hizo una búsqueda bibliográfica de trabajos realizados con base en el Caribe Colombiano en general, específicamente en el sector de Bocas de Ceniza y aledaños. Para la búsqueda se usaron herramientas como *Science Direct* y *Scielo*, y se consultaron las bases de datos de la biblioteca de la Universidad EAFIT, de donde se extrajeron artículos de revista y tesis de pregrado y maestría. También se realizó una compilación de los rasgos morfológicos identificados en el sector por otros autores, con el objetivo de compararlos con las características morfológicas que pudieron ser descritas a partir de los modelos de elevación 3D realizados en el presente estudio.

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

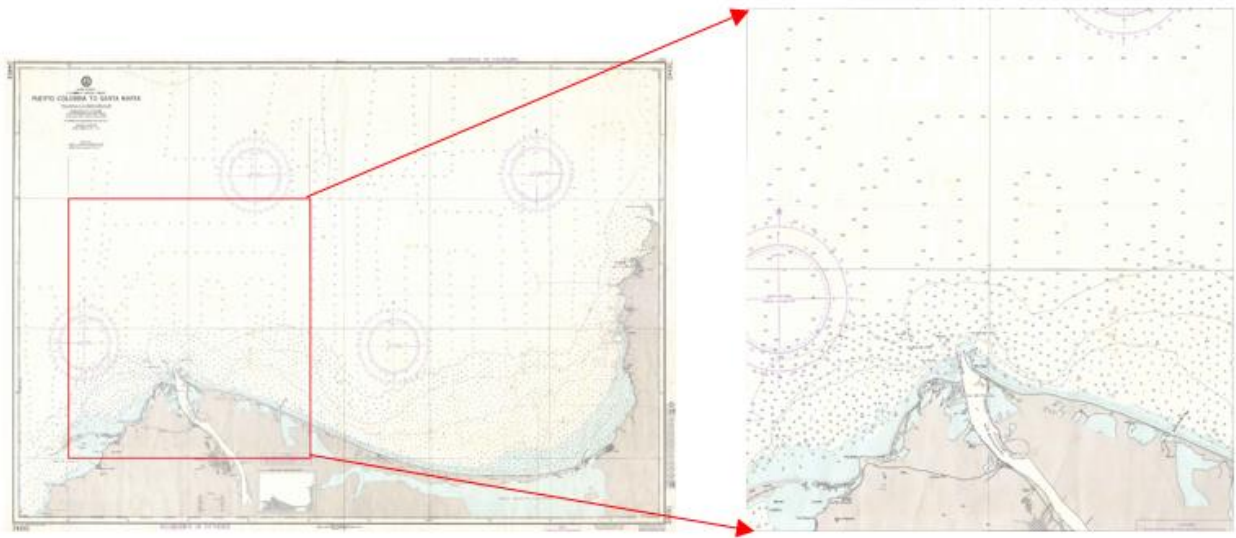


Figura 9. Carta de navegación 5688 de Puerto Colombia a Santa Marta, 1935. Recuperado de expedición Nokomis, 1935-36 (ver Anexo 5).

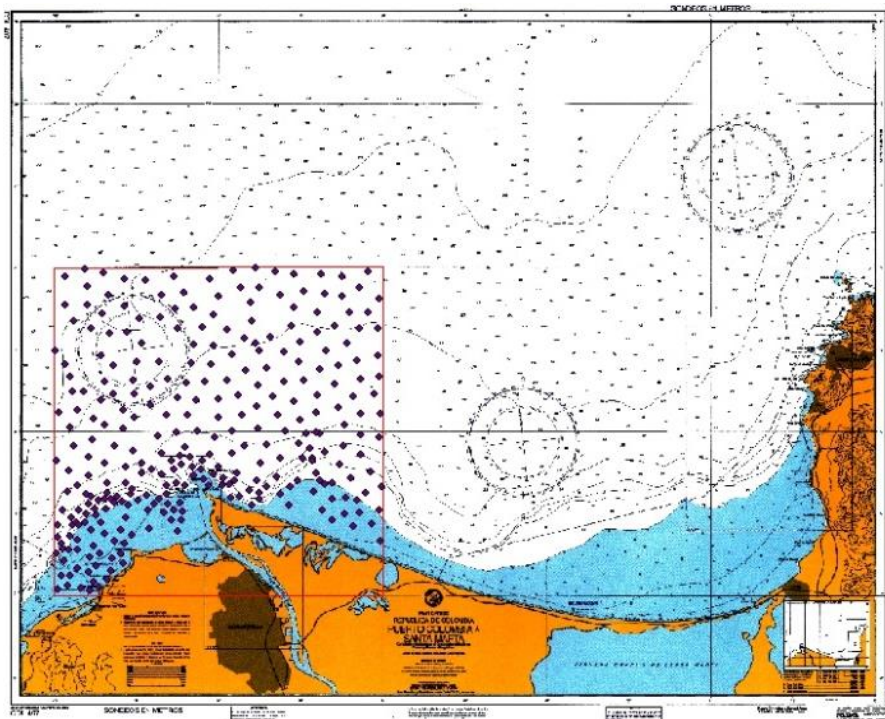


Figura 10. Carta de navegación Puerto Colombia a Santa Marta COL 407, 1999. El cuadro rojo enmarca la zona de estudio, los puntos en morado corresponden al archivo *shapefile* de profundidades que fue realizado en ArcGIS. Recuperado del Atlas Cartográfico de los Océanos y Costas de Colombia (ver Anexo 5).

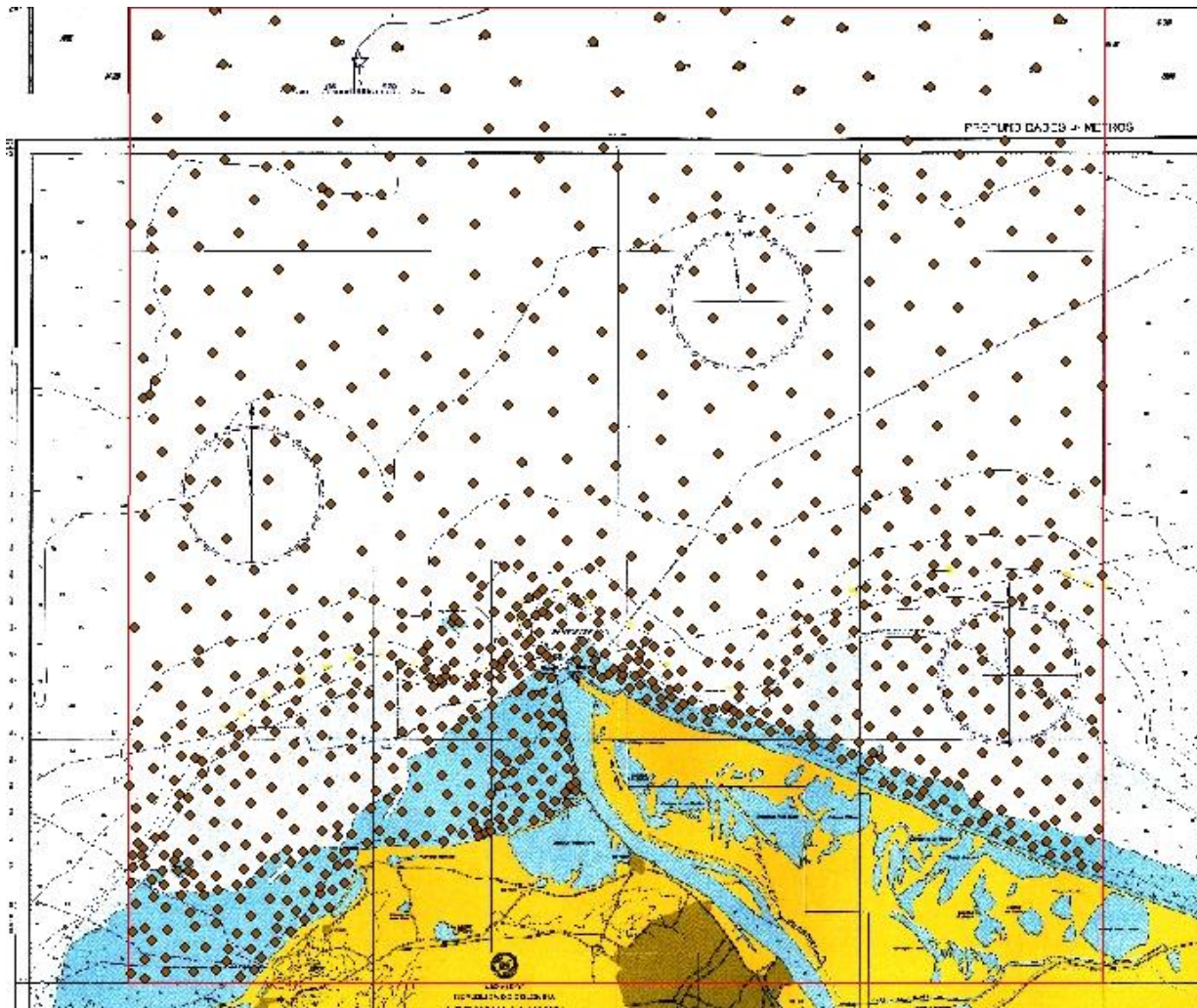


Figura 11. Carta de navegación COL 612, 2004. El cuadro rojo enmarca la zona de estudio, los puntos en marrón corresponden al archivo *shapefile* de profundidades que fue realizado en ArcGIS. Recuperado del Atlas Cartográfico de los Océanos y Costas de Colombia (ver Anexo 5).

El trabajo aquí presentado siguió la metodología presentada por otros autores (e.g., van der Wal 2002; 2003; Fontan et al., 2012; Restrepo et al., 2015). En estos trabajos se modelaron las batimetrías con base en datos de campo y digitalización de cartas batimétricas. La comparación de superficies de diferentes años permite posteriormente analizar las variaciones morfológicas de los patrones de acumulación y erosión en los fondos marinos. A continuación, se describen los procedimientos realizados para la creación de las superficies.

La información base estuvo conformada por tres cartas de navegación que incluyeron el sector estudiado del prodelta del río Magdalena. En primer lugar, se utilizó la carta

5688 de los años 1935 y 1936 (Figura 9). Esta carta a escala 1:80.000 (en sistema de proyección Mercator) se desarrolló con base en los datos de estudios hidrográficos realizados por el USS Nokomis de la Armada de los Estados Unidos en conjunto con el Instituto Geográfico Militar de Colombia. En segundo lugar, se digitalizó la carta COL 407 con escala 1:100.000 de 1999 (Figura 10). Los datos base de esta carta correspondieron a una compilación efectuada por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH) en el sistema de proyecciones Mercator y sistema geodésico mundial WGS-84. Por último, se utilizó la carta COL 612 a escala 1:50.000 del año 2004. Estos datos fueron compilados por el CIOH en los sistemas de geográfico WGS-84 y de proyecciones Mercator (Figura 11).

Para digitalizar la información de las tres cartas náuticas disponibles se realizó un proceso similar al usado por Ramis et al. (2008). Este método consiste en georreferenciar las imágenes dentro de un mismo sistema de coordenadas en un sistema de información geográfica (ArcGIS en este caso). Las cartas fueron georreferenciadas en el sistema de coordenadas geográfico WGS 84 acorde a la referencia original del mapa, y ubicadas de acuerdo a la zona de estudio. Posteriormente fueron proyectadas al sistema de coordenadas proyectado Magna Colombia Bogotá. Para la georreferenciación sobre el eje vertical se utilizaron como referencia la línea de costa (definida como el contorno con altura 0 m) y la posición vertical de los tajamares del sector de Bocas de Ceniza. Posteriormente se digitalizó la información de profundidades de las imágenes en *ArcMap*, se exportaron al software *Surfer*, y allí se realizaron las grillas del terreno y los modelos 3D para los años 1935, 1999 y 2004.

2.3. Variaciones morfológicas en los años 1935, 1999 y 2004

Para medir las variaciones temporales de los volúmenes de sedimentos se compararon los fondos marinos del área de estudio en dos tiempos distintos, y a partir de la comparación se determinan las variaciones que se han presentado en este (DGOA, s.f). Para decidir que método usar para la estimación de los volúmenes se hizo una compilación de las herramientas usadas por algunos autores (Tabla 1).

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

Tabla 1. Compilación de técnicas utilizadas por otros autores para el cálculo de volúmenes de sedimentos.

Autor	Datos e Insumos			Tecnología		Enfoque	
	Insumo (mapas, cartas, Años)	Periodo de tiempo	Software	Pre-procesos	Tamaño de celda Método de interpolación		Morfología Volumen (m ³)
Van der Wal(2003)	Cartas de navegación, 1847,1904, 1951, y algunos papers de 1994 estudios en la zona.	~150 años	SURFER	digitalización, georeferenciación	50x50m	Kriging, tambien desarrollan inverse distance quadratic interpolation entre otros, sin embargo el primero les da mejores resultados de las tasas de sedimentación. x	x
Fontán et al. (2012)	GeoAcoustic 250kHz ecosonda multibeam, tambien utilizaron estudios batimétricos anteriores hechos con ecosonda monobeam	~9 años	SURFER	georeferenciación, tambien revisan algunos datos de reflectividad de la zona para hacer un reconocimiento del sustrato	1x1m	Kriging fue escogido como el método de interpolación mas apropiado. x	x
Rowan et al. (1995)	Estudios batimétricos (fotos aerias y mapas historicos)	~140 años	SURFER	georeferenciación al mismo sistema de coordenadas	-	Kriging, para generar los modelos digitales de elevación x	x
Restrepo et al. (2015)	Datos batimétricos	~18 años	ArcGIS	TIN, por proveer gran exactitud relativa a la cantidad de datos de la fuente	2.5 m 8,5 m	DEM, tomados como superficie para comparar los cambios. x	x
Van der Wal(2002)	Cartas batimétricas, fuentes topograficas y datos de sensores remotos	~150 años	SURFER	MapInfo Pro, donde fue registrada y almacenada la información	50x50m	Kriging fue escogido porque provee buenos resultados con datos esparcidos x	x
Thomas et al. (2002)	Datos batimétricos historicos	~120 años	ArcGIS	Miden los levantamiento del nivel del mar, porque pueden generar errores en los volúmenes	-	DEM, tomados como superficie para comparar los cambios. x	x
Maillet et al. (2006)	Datos de ecosonda multi-beam, ADCP monobeam	~2 años	ArcView	TIN provee alta exactitud a los datos, cada red de triangulos fue convertida a un raster	20x20m	DEM, tomados como superficie para comparar los cambios. x	x
Wu et al. (2016)	Cartas de Navegación (ecosonda multibeam)	~12 años	ArcGIS	Los datos anomalos de la ecosonda fueron editados o removidos con PSD 2000 software	200x200m	Kriging seleccionado por ser una herramienta ampliamente usada en este tipo de estudios x	x

De acuerdo con Van der Wal et al. (2002) Kriging fue seleccionado como la técnica más apropiada de interpolación debido a los buenos resultados con datos diseminados. La Tabla 2 muestra la relación del método de interpolación, el espaciado de celda y el error, siendo los valores cercanos a cero los más exactos. Cabe anotar que la cuantificación del error total en los datos de salida, obtenidos agregando o desglosando datos de entrada de diferentes fuentes y escalas, resulta relativamente complicado (Gómez, 2015).

Se debe entonces tener en cuenta que, desde el momento de medición de los datos, los valores adquiridos pueden presentar errores. En las cartas batimétricas realizadas por el CIOH la precisión corresponde a ± 0.1 m en la vertical y ± 1 m en dirección horizontal (Restrepo et al., 2015). La misma georreferenciación puede inducir otro error a las medidas, sin considerar los errores que salen como resultado de la interpolación de los datos (Tabla 2).

La cuantificación de volúmenes y áreas se basó en las superficies batimétricas creadas a partir de las cartas de navegación. De estas superficies se tomó como referencia la línea de costa más tierra adentro para asegurar que las tres superficies tuviesen la misma área. Luego se realizó el procedimiento de comparación de superficies con las herramientas *Volume* y *Residuals* en *Surfer*, con el fin de corroborar si la similitud de los resultados. Los volúmenes se obtuvieron a partir de las propiedades de los raster en *ArcMap* (valor de sumatoria en la opción *classify* de la pestaña *simbology*). Este procedimiento se repitió para los tres periodos de tiempo considerando las superficies con volúmenes positivos, negativos, y netos.

Tabla 2. Errores resultantes de la interpolación realizada con cada método en *Surfer*. En rojo se resalta el método elegido.

Año	No. datos	<i>Kriging</i>			<i>TIN</i>			<i>Inverse distance quadratic</i>		
		Espaciamiento			Espaciamiento			Espaciamiento		
		10	25	50	10	25	50	10	25	50
1935	1.653	0,01	0,01	0,01	-0,38	-0,38	-0,39	3,54	3,54	3,53
1999	696	0,45	0,44	0,45	-1,1	-1,1	-1,11	5,99	5,99	5,98
2004	1.340	0,29	0,28	0,29	-0,42	-0,42	-0,43	3,93	3,93	3,92

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

El abanico submarino del río Magdalena es uno de los pocos abanicos con corrientes de turbidez activas en la actualidad. Está conformado por una serie de canales (diques), depósitos de flujos de masa a gran escala aportados principalmente por el río Magdalena, cañones y cicatrices de deslizamiento. Este abanico, el cual hace parte de la cuña de acreción formada por la colisión de las Placas Caribe y Suramericana, cubre cerca de 68,000 km², cuenta con un volumen de 180,000 km³ y se extiende hasta ~4,000 m de profundidad (Koopmans, 1971; Romero, 2009).

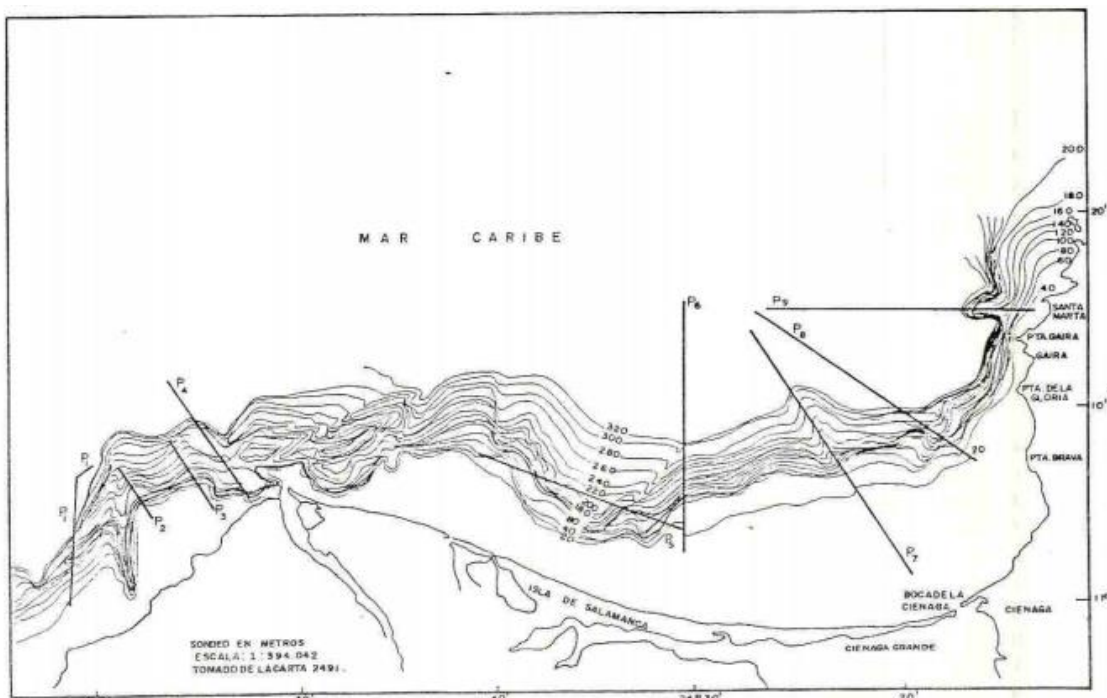


Figura 13. Mapa de ubicación de los perfiles batimétricos de los cañones. Tomado de Molina (1993).

Cerca de la desembocadura del río Magdalena hay un lineamiento estructural de dirección NE, el cual demuestra la influencia de la tectónica regional sobre la plataforma al desencadenar el deslizamiento de los aportes sedimentarios del río (Molina, 1993; Restrepo & López, 2008). El sedimento depositado en el cañón alimenta un sistema turbidítico a través de procesos de deslizamientos y corrientes desatadas por eventos sísmicos. Estos eventos han provocado la profundización del canal principal, particularmente en los años 1935 y 1963, además de la ruptura de cables submarinos (Hezzen, 1956; Restrepo et al., 2015). Estas corrientes, sumadas a los procesos de los

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

movimientos sísmicos y el oleaje, impiden el crecimiento del delta actual sobre la plataforma (Molina, 1993).

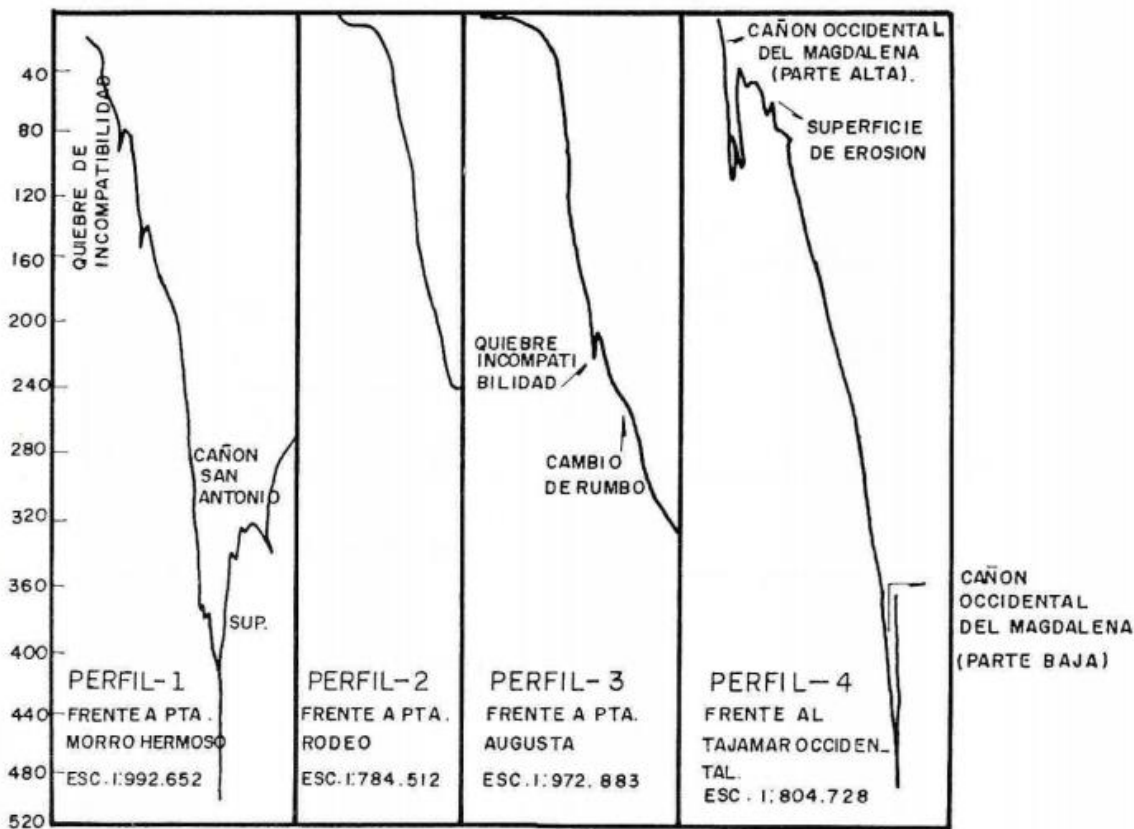


Figura 14. Perfiles batimétricos de los cañones identificados en cercanías del sector Bocas de Ceniza. Tomada de Molina (1993).

Algunas de las principales características morfológicas descubiertas por Shepard (1973) fueron: pliegues de desplome, cabalgamientos y valles parcialmente cubiertos por sedimentos, el valle sinclinal en el Golfo de Santa Marta, cañones submarinos, cicatrices de falla y dos concentraciones de diapiros con dirección de tendencia al noreste. En este sentido, el diapirismo intrusivo de esta zona es reconocible por la formación de domos que han sido encontrados en la margen oeste del delta. Dado que en los flancos de muchos de los domos las formaciones sedimentarias están plegadas hacia arriba, se infiere que algunos de los pliegues observados en el fondo corresponden a intrusiones diapíricas.

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

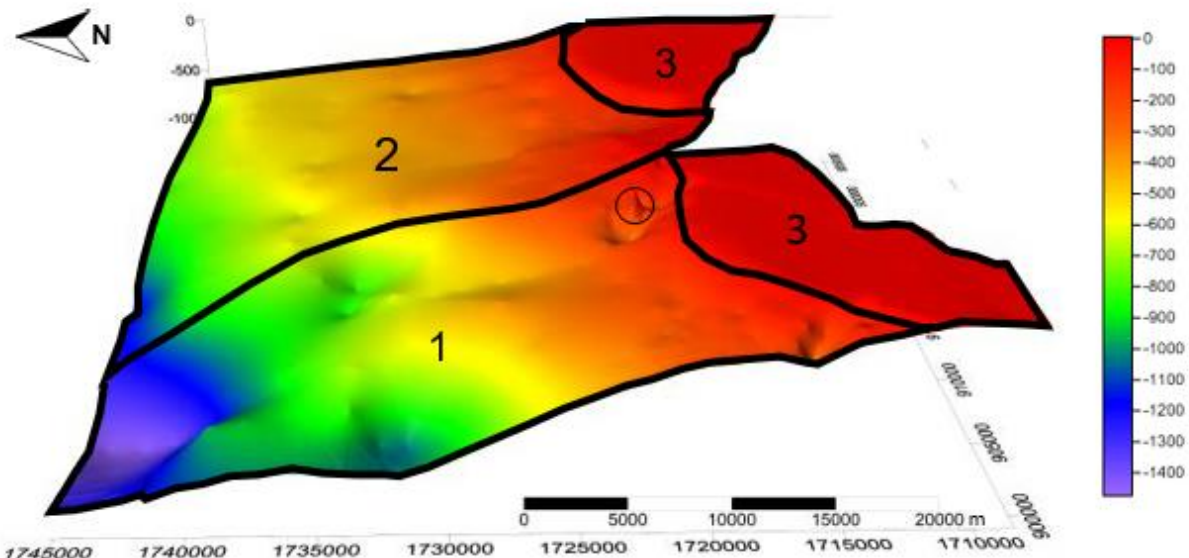


Figura 15. Modelo 3D de la superficie batimétrica del año 1935. Se muestran los tres tipos de polígonos identificados de acuerdo con la morfología (ver texto) y se encierra la geofoma interpretada como abombamiento.

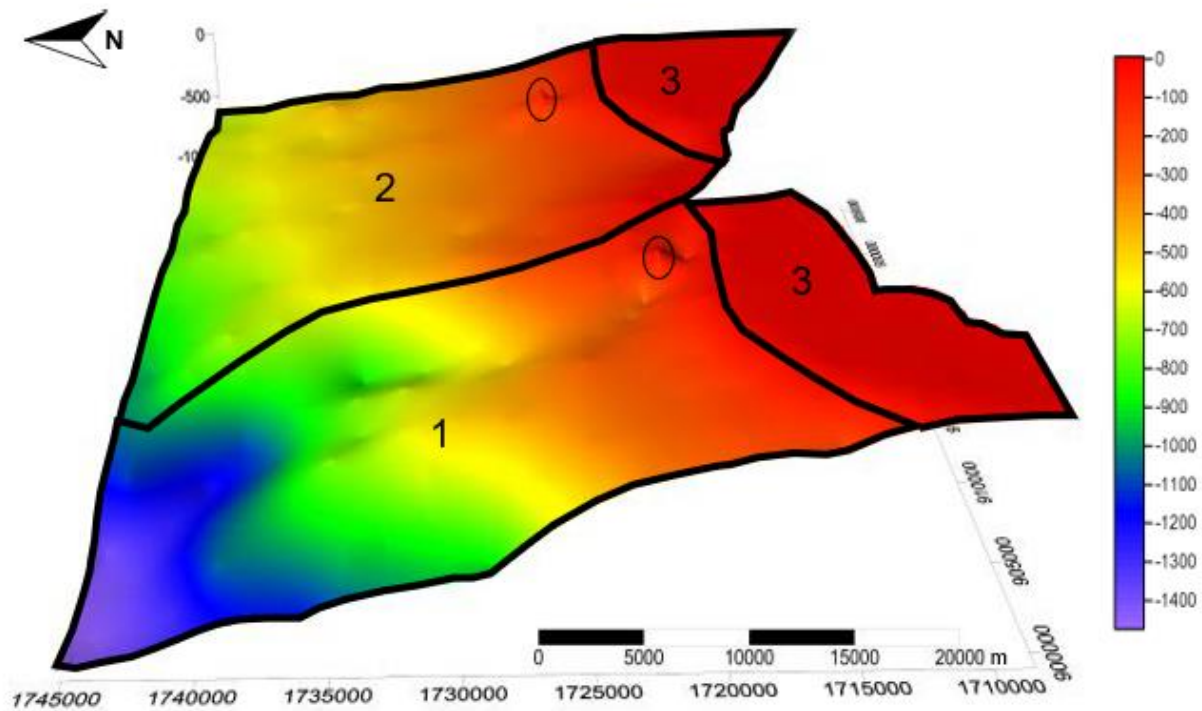


Figura 16. Modelo 3D de la superficie batimétrica del año 1999. Ver explicación en el rótulo de la Figura 15).

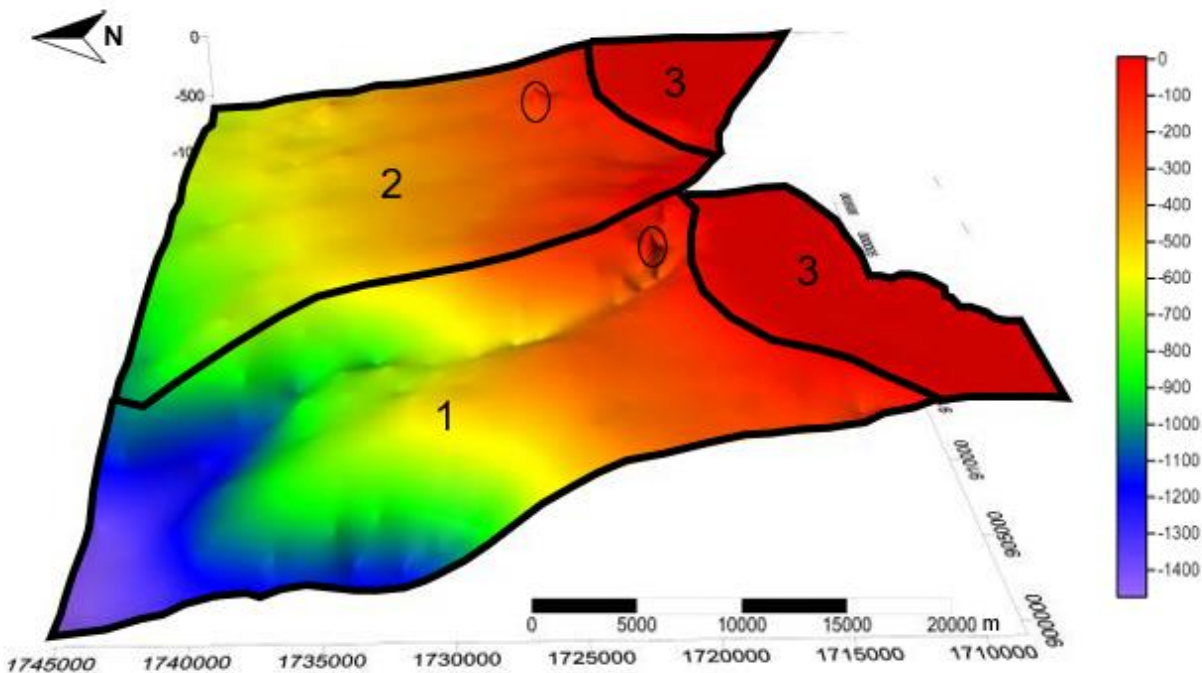


Figura 17. Modelo 3D de la superficie batimétrica del año 2004. Véase el rótulo de la Figura 15 para mayor información.

A continuación, se describen los modelos batimétricos para cada uno de los periodos de tiempo estudiados. Se muestran los modelos 3D graficados con el software *Surfer*, y se caracterizan las superficies a partir de cálculos de pendientes, curvaturas, aspecto, entre otras (ver Anexo 2).

3.1.2. Superficie batimétrica de 1935.

La Figura 15 muestra la superficie batimétrica del año 1935. A continuación, se describen la morfología con base en las unidades geomorfológicas propuestas por otros autores.

Unidad de cañones submarinos. Hacia la franja occidental (polígono 1) se observa algunas superficies alargadas de forma tubular, denominados también cañones de fuerte incisión, los cuales son angostos hacia el continente y se amplían mar. Esta zona se caracteriza por una morfología cóncava, con pendientes moderadamente altas (entre 10 y 18°), que debido a sus grandes extensiones se interpretan como las paredes de los cañones.

Unidad de colinas. Hacia la franja oriental (Polígono 2) se presenta una superficie irregular transversal a la pendiente, donde se identifican prominencias y hundimientos de forma alargada que no parecen tener ningún patrón de alineación. Las pendientes de esta zona son moderadamente bajas (entre 2 y 7°) con dirección de preferencia hacia el norte.

Unidad de pendientes bajas. Hacia la línea de costa, se presentan dos zonas (Polígono 3) que se caracteriza por superficies semirugosas a planas, con pendientes bajas (entre 0 y 2°) que no presentan una dirección preferencial. Debido a su poca inclinación, son geoformas relativamente fáciles de reconocer en los modelos 3D graficados.

Abombamientos. Se señala con un círculo negro en el polígono 1 (Figura 15) una geoforma que se eleva aproximadamente 100 m con respecto del fondo.

3.1.3. Superficie batimétrica de 1999

La superficie batimétrica de 1999 se muestra en la Figura 16. A continuación, se describen las unidades morfológicas.

Unidad de cañones submarinos. Hacia la franja occidental (polígono 1) se distinguen dos cañones de forma cóncava que presentan incisión moderada, divididos por colinas alargadas de forma convexa con topes redondeados. A medida que se profundiza el perfil, los cañones se hacen menos identificables. Las pendientes de los escarpes de estos cañones oscilan entre 7 y 16° de inclinación, siendo más escarpados hacia la margen izquierda con respecto a la línea de costa.

Unidad de colinas. Hacia la franja oriental (polígono 2) se observa una sucesión de superficies cóncavas y convexas, con pendientes entre 2 y 7°, con pendientes que se extienden hacia el norte donde la plataforma se profundiza.

Unidad de pendientes bajas. Hacia la línea de costa, se presentan dos zonas (Polígono 3) donde las pendientes son muy bajas (0 a 2°) y la superficie es moderadamente rugosa tendiendo a ser plana. Debido a esta rugosidad no es apreciable una dirección preferencial de la pendiente.

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

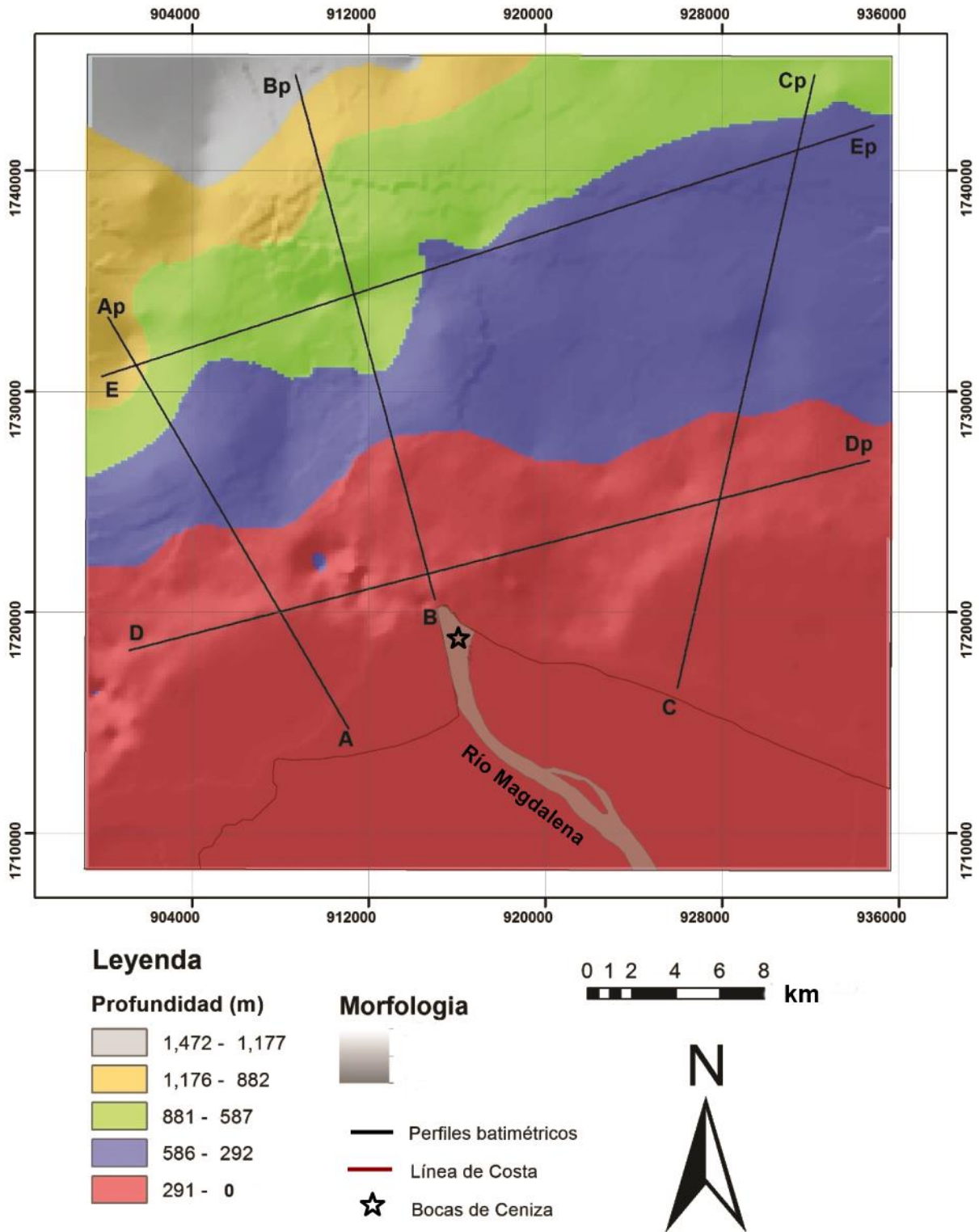


Figura 18. Mapa de la zona de estudio, con la ubicación de los perfiles batimétricos.

Abombamientos. Marcados como círculos negros en los polígonos 1 y 2 se observan dos cuerpos de forma redondeada que se describen como abombamientos. Estas geoformas se elevan aproximadamente 200 m con respecto al nivel relativo de la superficie.

3.1.4. Superficie batimétrica de 2004

El modelo del fondo del año 2004 se muestra en la Figura 17. Las unidades morfológicas se describen como sigue:

Unidad de cañones submarinos. Hacia la franja occidental (polígono 1) se encuentran una sucesión de cañones de forma cóncava que presentan incisión relativamente fuerte. Estos cañones, que están separados por colinas alargadas de forma convexa con topes redondeados, tienen pendientes entre 15 y 25° de inclinación, tendiendo a ser más alargadas hacia la margen derecha con respecto a la línea de costa.

Unidad de colinas. Hacia la franja oriental (polígono 2) se observa una superficie irregular en contra de la pendiente. Constituye una zona con intercalaciones de formas cóncavas y convexas, de pendientes relativamente bajas (entre 2 y 7°) y poco cortadas que apenas alcanzan a ser diferenciadas, con pendientes que se extienden hacia el norte donde la plataforma se profundiza.

Unidad de pendientes bajas. Hacia la línea de costa (polígono 3) se presentan zonas rugosas en forma de llanura, de pendientes entre 0 y 2°, que no presentan incisión. La pendiente en esta zona no tiene una dirección preferencial.

Abombamientos. Marcados como círculos negros en los polígonos 1 y 2 se observan dos prominencias, de forma abombada, en medio de zonas de profundidad relativamente alta. Estas geoformas podrían corresponder a cuerpos diapíricos.

3.2. Espesores y volúmenes de sedimento

Al asumir que los fondos corresponden a material no consolidado, la comparación de las superficies batimétricas permitió el cálculo de la variación en los espesores y volúmenes de sedimentos entre los periodos de tiempo modelados. Para facilitar la

comparación se utilizaron cinco perfiles, dos paralelos a la línea de costa y tres perpendiculares a esta.

Se logró con estos perfiles el reconocimiento de la altura del perfil batimétrico de los cañones en particular, y en general de toda la zona, así como el cálculo de la variación de los espesores de sedimento en relación con la línea de costa. En la misma vía, se compararon las tres superficies batimétricas para reconocer las zonas donde ha habido somerización o profundización del fondo, y así calcular las diferencias de volúmenes de sedimento entre los periodos de tiempo estudiados.

3.2.1. Perfiles batimétricos.

La Figura 18 muestra la ubicación de los perfiles batimétricos. Los datos de distancia y profundidad se pueden ver en el Anexo 3.

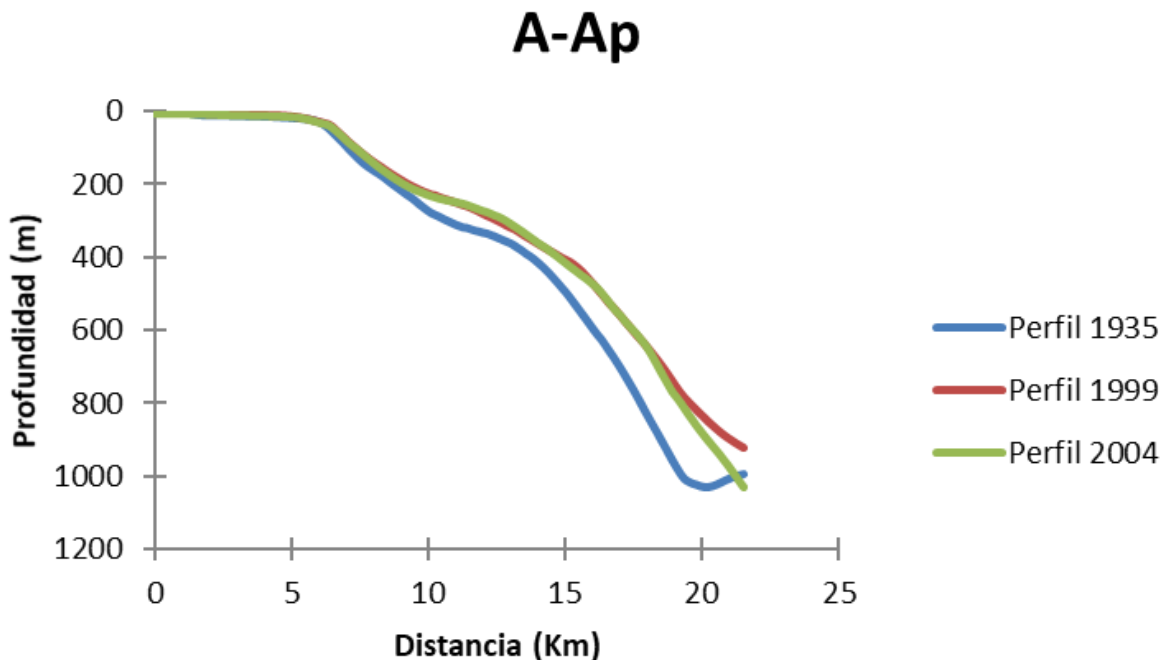


Figura 19. Perfiles batimétricos para el Corte A-Ap.

La Figura 19 muestra los perfiles del corte A-Ap. Se puede observar que, para los perfiles de 1935, 1999 y 2004, los primeros ~7 km de longitud tienen aproximadamente la misma profundidad de ~50 m. A partir de este punto se observa que el perfil de 1935,

en comparación con los de 1999 y 2004, es relativamente más profundo con entre 50 y 200 m de diferencia. Se evidencia a partir de los 20 km de distancia que ocurre una diferencia notable entre los perfiles de 1999 y 2004, profundizándose este último hasta los 1000 m (con una diferencia de espesores de ~100 m con respecto al perfil de 1999).

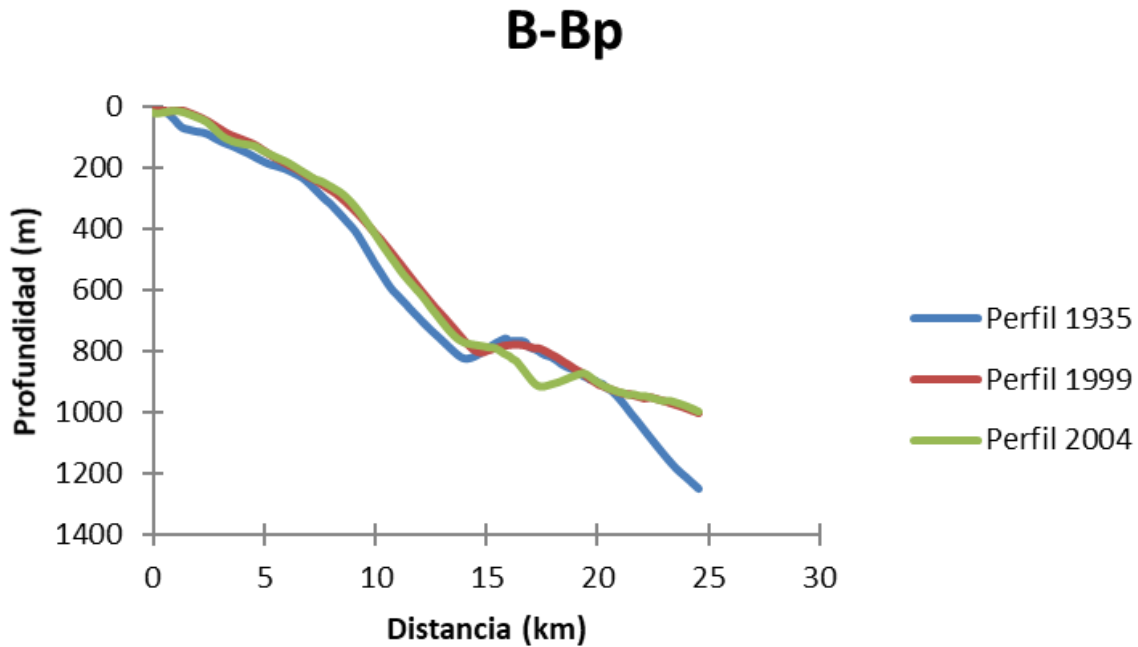


Figura 20. Perfiles batimétricos para el perfil B-Bp.

La Figura 20 muestra los perfiles batimétricos para el perfil B-Bp. Cercano al cañón principal del río Magdalena, entre los 0 y 15 km de longitud, los tres perfiles tienden a profundizarse relativamente rápido (pendiente de 19°) siendo el perfil de 1935 el más profundo (~50 m de espesor menos que los perfiles de 1999 y 2004). En el tramo entre los 15 y 20 km los perfiles de 1935 y 1999 tienen una curvatura positiva, llegando a incrementar ~50 m de espesor. Sin embargo, el perfil del 2004 se profundiza 100 m llegando a alcanzar una profundidad de 900 m. En el intervalo entre los 20 y 25 km, los perfiles de 1999 y 2004 siguen la misma trayectoria llegando a una profundidad de 1.000 m. Por su parte el perfil de 1935 alcanza profundidades de 1250 m, lo que sugiere que se acumuló en esta zona un espesor aproximado de ~250 m.

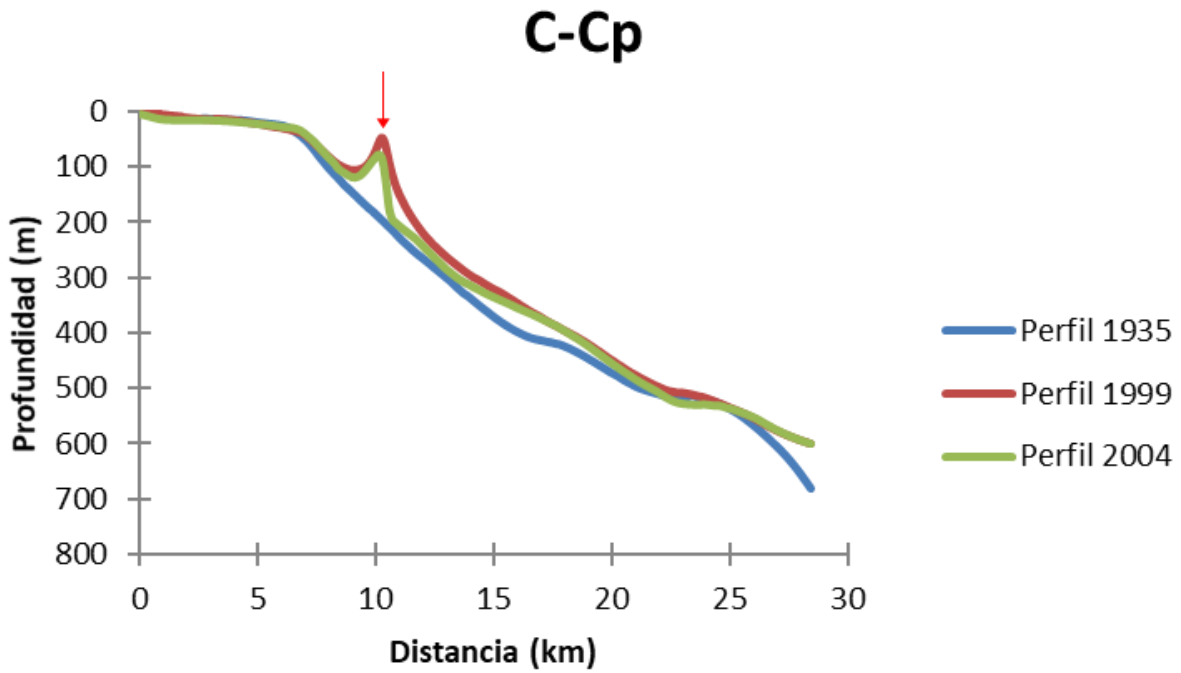


Figura 21. Perfiles batimétricos para el Corte C-Cp.

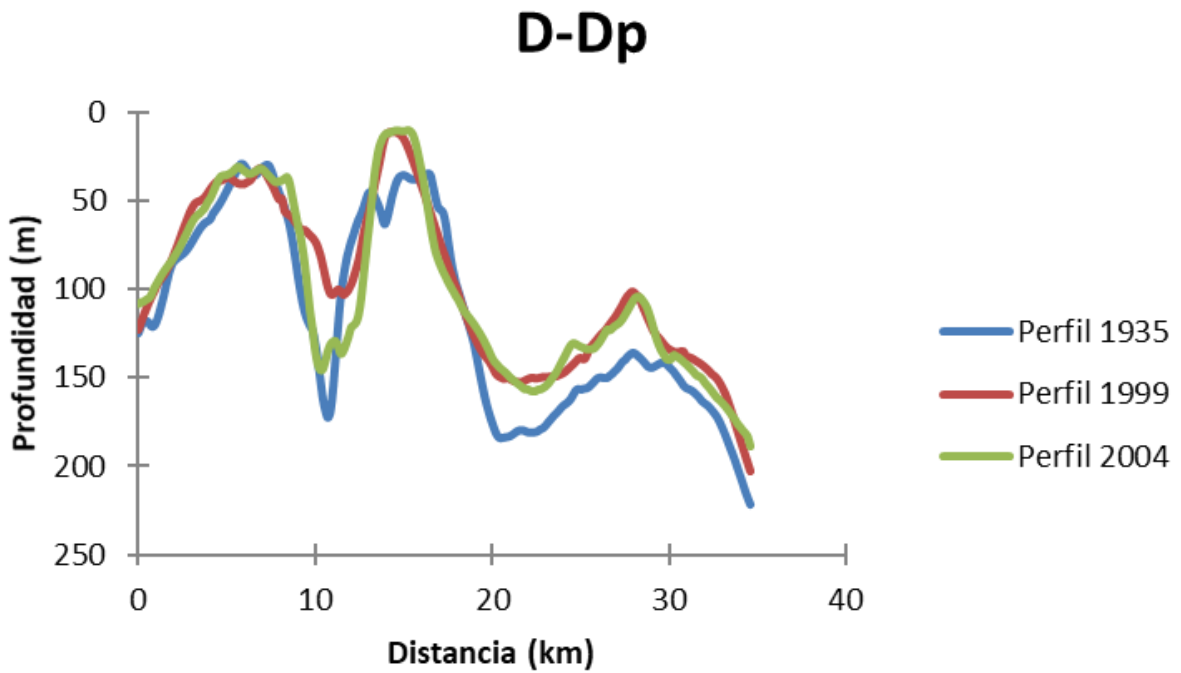


Figura 22. Perfiles de batimétricos para el Corte D-Dp.

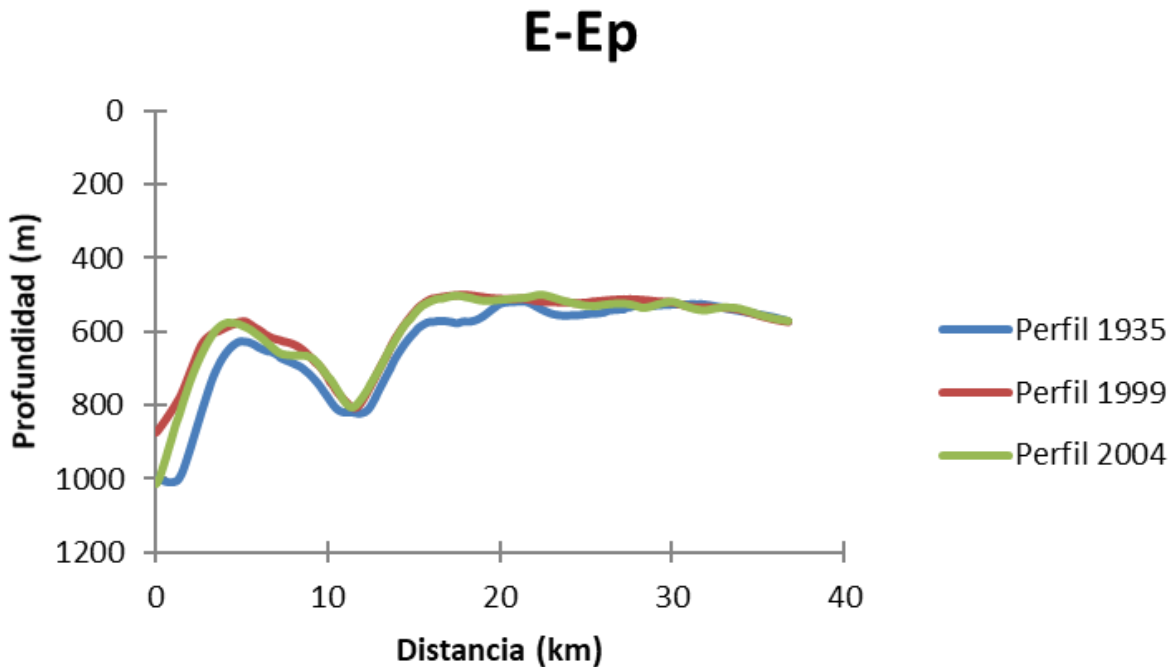


Figura 23. Perfiles batimétricos para el Corte E-Ep.

En el corte C-Cp todos los perfiles tienen una profundidad similar (~40 m) los primeros 7 km (Figura 21). A partir de este punto, la profundidad incrementa en los tres perfiles. Sin embargo, en 10 km de longitud los perfiles de 1999 y 2004 muestran una disminución de profundidad de ~50 m y ~25 m, respectivamente (Ver flecha en gráfico). El perfil para el año 1935 muestra la mayor profundidad a lo largo de todo el corte, seguido por los perfiles de 2004 y 1999. Para el perfil del año 1999 se evidencia un aumento promedio en los espesores de ~75 m. con respecto al perfil de 1935. El perfil del 2004 presenta una disminución promedio de los espesores de ~15 m teniendo como nivel base el perfil de 1999.

En la Figura 22 se muestran los perfiles batimétricos paralelos y cercanos a la línea de costa donde se puede evidenciar los tres cañones submarinos principales del río Magdalena. El perfil de 1935 es el más profundo, seguido en sucesión por el perfil del 2004 y 1999. Con respecto al perfil de 1935, se observa que en el 2004 hay un aumento promedio de los espesores de ~25 m. Para el perfil de 1999 se tiene una relación de

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

aumento de espesor similar (~25 m), sin embargo, en comparación con el perfil del 2004 la acumulación de sedimentos en el cañón es mayor por aproximadamente 30 m.

Tabla 3. Cuantificación de área superficial y volúmenes de sedimentos para los tres periodos de tiempo comparados. La casilla diferencia muestra el porcentaje de diferencia entre los resultados de los dos métodos de cálculo usados, i.e. funciones *Volume* y *Residuals*.

Año	Función en <i>Surfer</i>	Volumen (km ³)			Área (km ²)
		Positivo	Negativo	Neto	
1935-1999	Función <i>Volume</i>	33,15	4,23	28,91	1143,65
	Función <i>Residuals</i>	32,89	3,56	29,32	1142,29
	Diferencia (%)	0,79	15,88	1,43	0,12
1935-2004	Función <i>Volume</i>	30,85	5,79	25,05	1143,65
	Función <i>Residuals</i>	30,04	5,55	24,49	1142,51
	Diferencia (%)	2,62	4,30	2,23	0,06
1999-2004	Función <i>Volume</i>	2,67	6,53	-3,86	1143,53
	Función <i>Residuals</i>	2,73	6,77	-4,04	1143,53
	Diferencia (%)	2,08	4,68	4,68	0,00

Tabla 4. Promedio del cambio de volumen por área unitaria. Nótese que los volúmenes netos de las comparaciones con la superficie de 1935 son positivos, mientras la comparación de las superficies 1999 y 2004 entre sí da un balance negativo.

Periodo	Cambio volumétrico por área unitaria (m ³ /m ²)		
	Positivo	Negativo	Neto
1935 - 1999	28,99	3,71	25,28
1935 - 2004	26,99	5,07	21,91
1999 - 2004	2,34	5,71	-3,38

En los perfiles del corto E-Ep se observa el cañón principal del Magdalena, con una profundidad aproximada de 200 m con respecto al nivel medio del perfil (Figura 23). A su izquierda se ve un hundimiento de casi 400 m correspondiente posiblemente a un cañón antiguo, aunque no se ve su continuidad. Hacia la zona este de los cañones se observa un perfil con un carácter semiplano. Mientras que los perfiles de 1999 y 2004 son relativamente similares en su batimetría, el perfil de 1935 sigue el mismo patrón, pero con mayor profundidad (en promedio ~50 m).

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

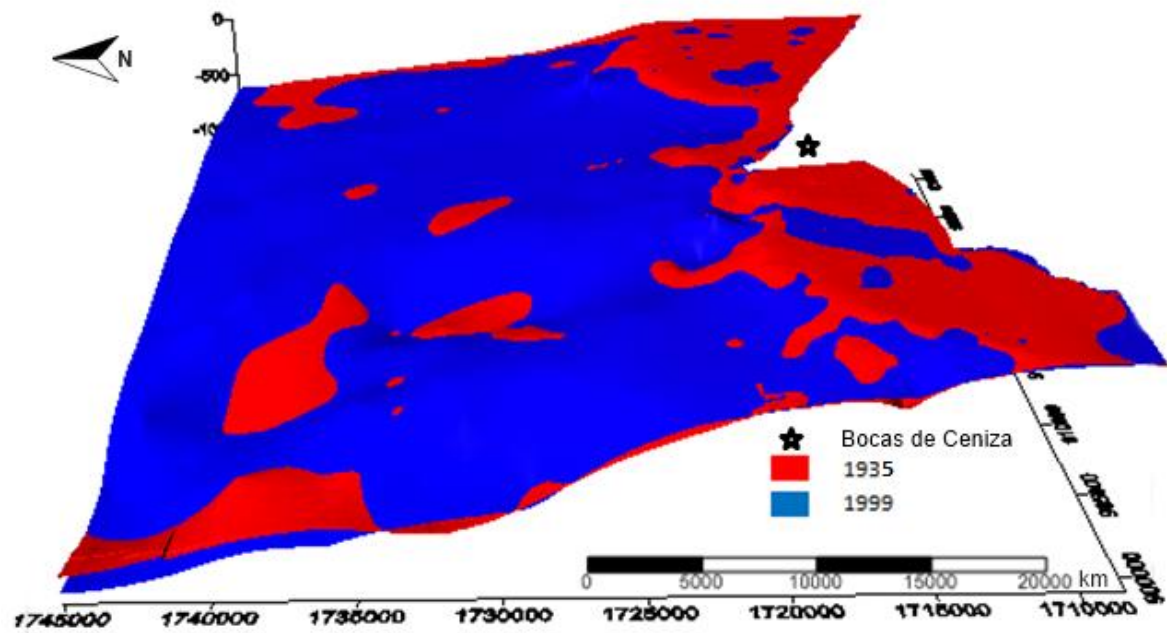


Figura 24. Comparación de las superficies batimétricas de los años 1935-1999.

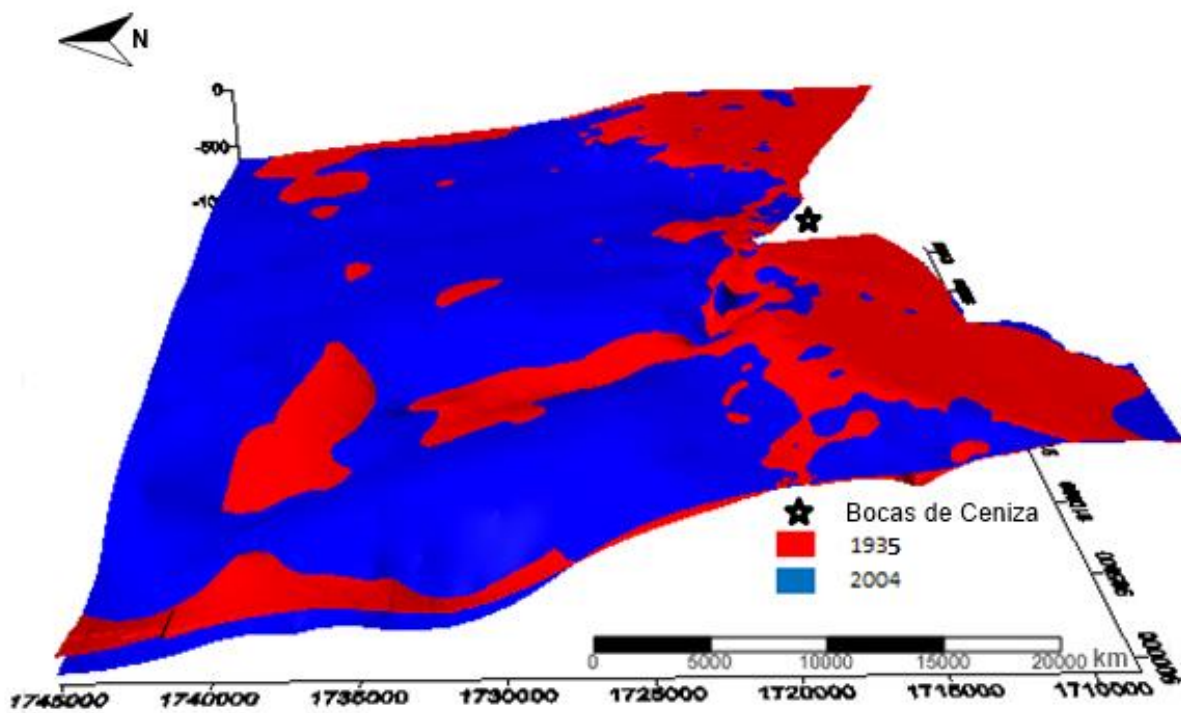


Figura 25. Comparación de las superficies batimétricas de los años 1935-2004.

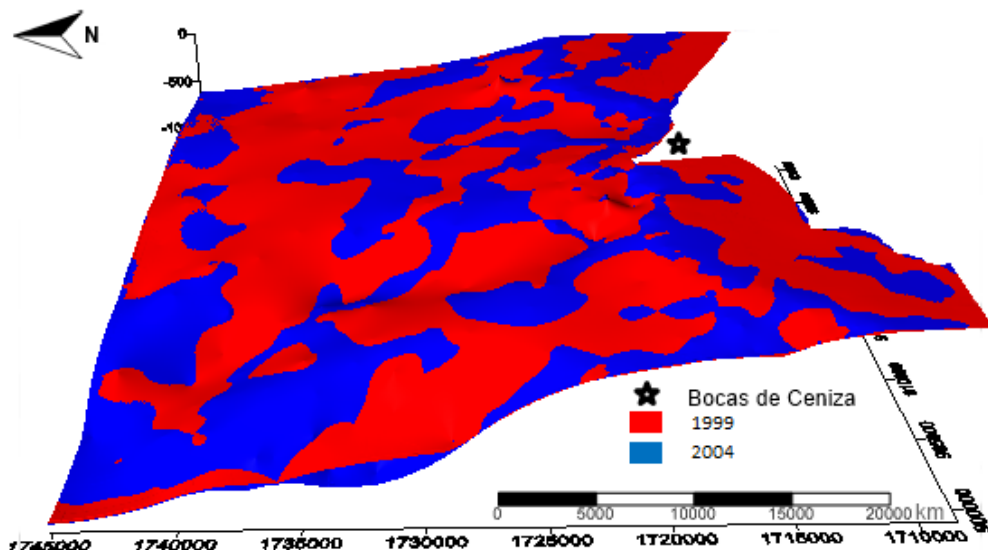


Figura 26. Comparación de las superficies batimétricas de los años 1999- 2004.

3.2.2. Volúmenes

Las diferencias en los volúmenes proveen una aproximación al balance de sedimentos entre los años correspondientes a las superficies del fondo marino. En general, hubo ganancia de sedimentos a largo plazo, i.e. $\sim 28 \text{ km}^3$ entre 1935 y 1999, y $\sim 25 \text{ km}^3$ entre 1935 y 2004. Los cambios volumétricos recientes (entre 1999 y 2004), sin embargo, sugieren una pérdida de sedimentos de $\sim 4 \text{ km}^3$ (Tabla 3).

Las Figura 24, Figura 25 y Figura 26 muestran la comparación de las superficies para los periodos 1935-1999, 1935-2004 y 1999-2004, respectivamente. En estas figuras las zonas de color rojo representan pérdida, mientras que el color azul señala ganancia de sedimentos. En otras palabras, la parte de la superficie en rojo corresponde al año más antiguo y la azul el más reciente, lo que significa que aquellas zonas donde el rojo se observa sobre el azul muestran que el año más antiguo era más somero y el fondo profundizo hacia el año más reciente. En general, en las superficies batimétricas de 1999 y 2004, en comparación con la superficie del año 1935, hay un incremento en el volumen de sedimentos de aproximadamente $20 \text{ m}^3/\text{m}^2$. En la misma vía, la comparación de las superficies modeladas para los años 1999 y 2004 muestran una reducción promedio de $\sim 3 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Tabla 4).

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

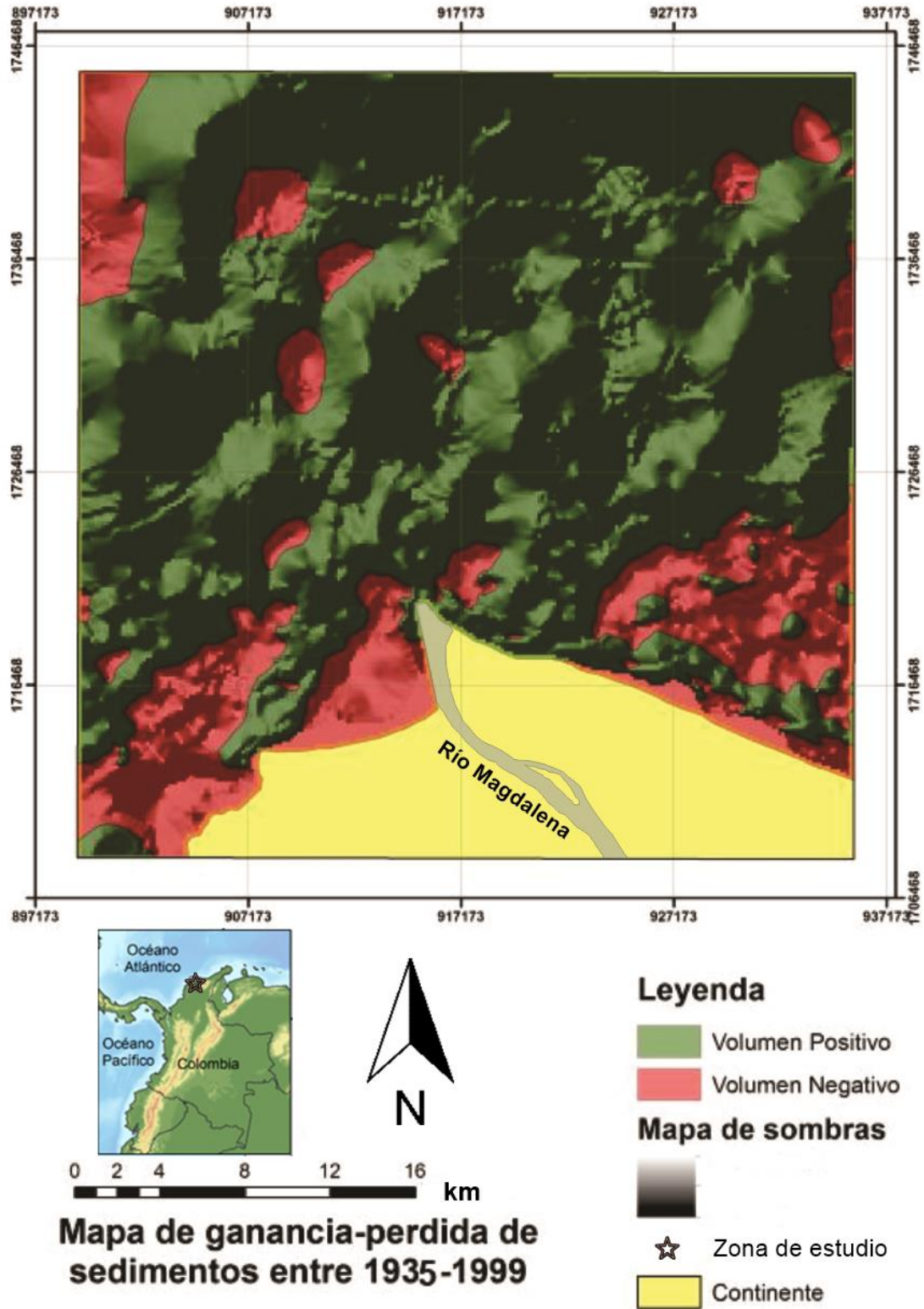


Figura 27. Diferencia en la superficie batimétrica entre los años 1935 y 1999.

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

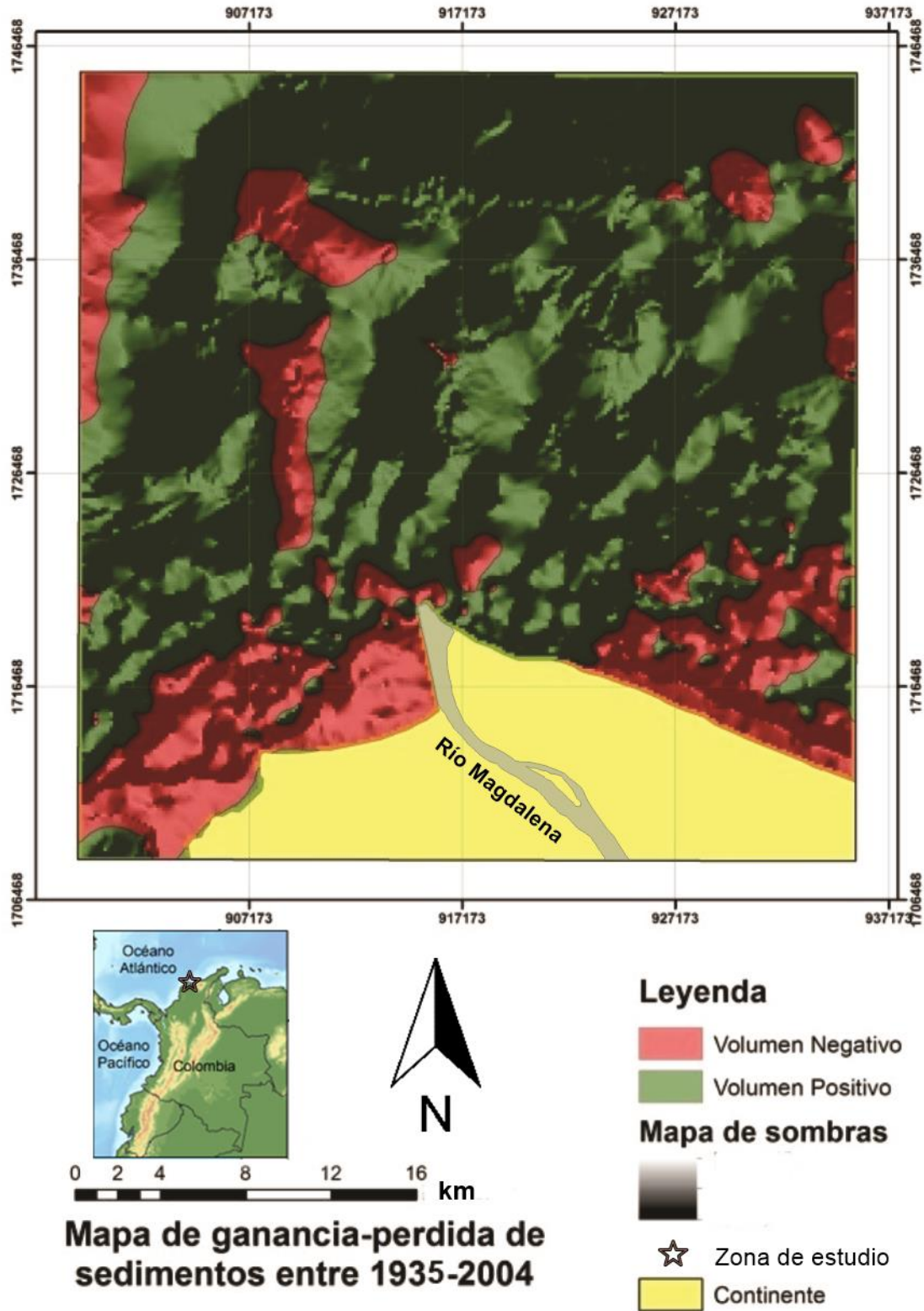


Figura 28. Diferencia en la superficie batimétrica de los años 1935 y 2004.

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

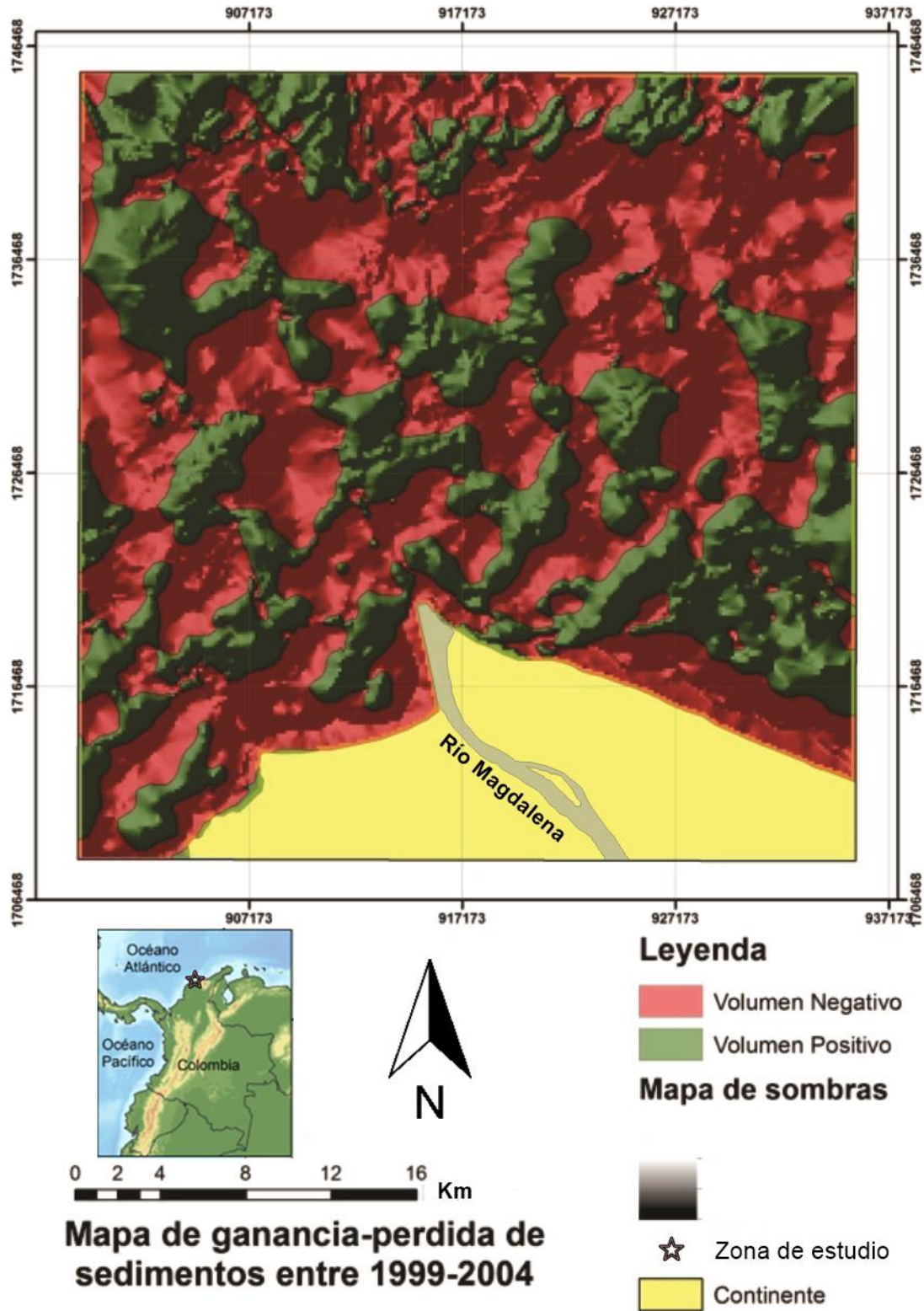


Figura 29. Diferencia en la superficie batimétrica de los años 1999 y 2004.

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

Tabla 5. Promedio de volumen para los tres periodos de tiempo.

Volumen (km ³)	1934-1999	1934-2004	1999-2004
Positivo	42,25	39,61	2,62
Negativo	3,08	4,33	6,85
Neto	38,77	34,84	-4,51

Con respecto a la diferencia de volúmenes, se observa que para los lapsos de tiempo de 1935-1999 y 1935-2004 el balance de sedimentos positivos es mucho mayor al negativo, por lo cual se infiere un aumento en los volúmenes de sedimentos depositados (Tabla 5, cf. Figura 27 y Figura 28). Sin embargo, para el lapso de tiempo entre 1999-2004 (Figura 29) los valores negativos de volumen son mayores que los positivos, lo que sugiere pérdida en el volumen neto de sedimentos.

Se cuantificó una diferencia de aproximadamente 20% entre el aumento en los volúmenes calculados con ArcGIS y Surfer. Esta diferencia se refleja también en un desbalance en el volumen neto. Una de las explicaciones posibles para esta variación radica en la manipulación de los datos durante los cálculos en *ArcGIS*. En este caso, algunos de los procedimientos intermedios requirieron la manipulación de los datos lo cual pudo haber inducido errores que se acumularon hasta la obtención del resultado final. Debido a esto, se sugiere utilizar como valores de referencia los resultados de *Surfer*.

Las salidas gráficas de ambos softwares fueron similares. Los polígonos de valores positivos y negativos para los tres periodos de tiempo corresponden entre sí. Sin embargo, se puede observar que en el lapso de tiempo de 1999-2004 las zonas de la margen oriental, donde ocurrían las ganancias de sedimentos para los otros periodos comparados, son zonas donde aumentó la pérdida de sedimentos.

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

4. DISCUSION

4.1. Interpretación a partir de los rasgos morfológicos descritos.

La morfología analizada en el prodelta del río Magdalena con base los modelos batimétricos 3D es congruente con la descrita por Molina (1993). De acuerdo con este autor, además de la relativamente corta amplitud de la plataforma, esta zona se encuentra “cortada” por cinco cañones, de los cuales tres son apreciables en los modelos de elevación digital. Cabe apuntar que una limitante para esta descripción es la escala de trabajo. Los insumos de por sí ya están en escalas relativamente grandes (1:100.000), la información en algunas zonas es muy dispersa, y al ser un modelo interpolado, puede haber generado algunas formas de fondo que no corresponden con la superficie que existe en realidad. Sin embargo, corroborando los modelos realizados con trabajos como los de Heezen (1956) o Shepard (1973) se evidencia que los modelos corresponden relativamente bien a la morfología allí descrita. Para este trabajo se utilizan las cuatro clasificaciones anteriormente descritas, de las cuales se resalta que están influenciadas por procesos diferentes.

La unidad de cañones submarinos (e.g., polígono 1 en Figura 15) está descrita principalmente como una sucesión de colinas y cañones de fuerte incisión. Se sugieren principalmente dos procesos que influyen. Primero, durante la última glaciación (116.000-26.000 años BP), el nivel del mar global estaba entre los 60-80 m por debajo del nivel actual (Yokoyama, 2007 en Yokoyama & Esat, 2011). En tanto que los ríos modernos ya labraban su cauce, estos cañones pueden estar asociados entonces al antiguo cauce del río Magdalena. Posteriormente, fueron parcialmente cubiertos por sedimentos que se acumulan en la etapa de transgresión, o ascenso del nivel del mar. Segundo, la Costa Caribe Colombiana es una zona tectónicamente activa propensa a sismos, los cuales pueden generar corrientes de turbidez (Restrepo et. al 2007; Duque-Caro, 1980, Vernet, 1991 en Restrepo et. al 2007). Estas corrientes, si se concentran en un solo sitio, pueden generar erosión en los cañones submarinos (Heezen, 1956). La zona donde el río ya había labrado su cauce puede ser interpretada como una zona de debilidad hacia donde pueden converger varias de estas corrientes, y estas a su vez, nuevamente erosionar las zonas que habían sido cubiertas por sedimentos. Estos procesos podrían

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

estar vinculados a los cañones de incisión fuerte que se observan en los modelos batimétricos.

La unidad de colinas (e.g., polígono 2 en la Figura 16) se describe como una sucesión de prominencias y hundimientos con cambios sutiles, así como algunos abombamientos en forma de domo y con mayor densidad costa afuera. Estas prominencias en forma de colinas alargadas podrían ser interpretadas como bancos de arena, y su morfodinámica asociarse a diferentes factores como la geología (fallas), aumentos del nivel del mar, disponibilidad de sedimentos, vientos y oleajes (Allard et al., 2008 en Pradhan et al., 2015). En las zonas correspondientes en los modelos de elevación digital se infiere la formación de estos bancos de arena por ser una zona que presenta condiciones favorables para la acumulación de sedimentos: pendientes son relativamente bajas y superficies.

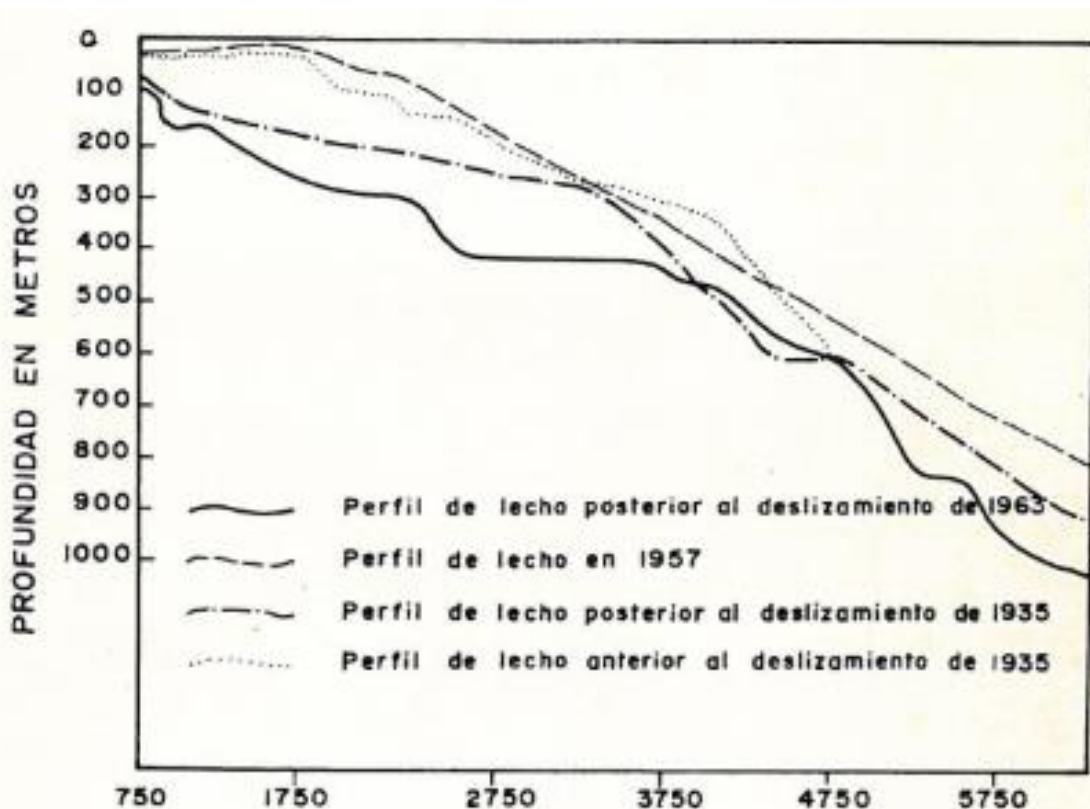


Figura 30. Comparación de perfiles batimétricos en la desembocadura del Magdalena entre periodos de deslizamientos. Tomado de Koopmans (1971).

La unidad de pendientes bajas (polígonos 3 en la Figura 17) corresponde a zonas que, al ser relativamente planas con pendientes entre los 0°- 2°, son denominadas aquí como plataformas. Estas zonas, con profundidades someras (entre 0 y 200 m) son afectadas por el oleaje y por factores antrópicos, lo cual podría explicar la profundización de estas en los años más recientes del estudio (1999 y 2004). En el trabajo de Shepard (1973) se enuncia que la plataforma mejor desarrollada se encuentra entre el delta del Magdalena y la costa del municipio de Ciénaga, Departamento del Magdalena.

Por último, los abombamientos (e.g., círculos en la Figura 16) dómicos que se encuentran en los polígonos 1 y 2 costa afuera pueden interpretarse como diapiros. Estos cuerpos han sido encontrados a lo largo de la Costa Caribe (Carvajal-Perico & Mendivelso, 2011). En el área de estudio se han reportado intrusivos diapíricos en forma de domos, que se extienden en dirección noreste, cerca al relieve formado tectónicamente en la zona de *ridge* (Shepard, 1973). Con respecto a los abombamientos cerca de la línea de costa, se encuentran dos cambios abruptos en la superficie que también pueden ser interpretados como diapiros de lodo (Shepard, 1973; Restrepo et al., 2007). En la costa caribe suroccidental de Colombia muchos autores muestran volcanes de lodo tanto en tierra como costa afuera (Verneette, 1983, 1991; Javelaud, 1987 en Restrepo et. al 2007; Carvajal-Perico & Mendivelso, 2011).

4.2. Cambio en los espesores y volúmenes de sedimentos

Los cambios en los espesores y volúmenes del prodelta del río Magdalena se pueden asociar al aporte de sedimentos del río, el cual transporta una de las más grandes cargas de sedimentos por área de cuenca en el mundo. Este río transporta más sedimentos en suspensión que los ríos Orinoco y Paraná (Molinares et al., 2012). De acuerdo a lo que reportan Koopmans (1971) y Restrepo et al. (2015), en total entrega un 38% (144×10^6 ton/año) de la carga total de sedimentos al Mar Caribe.

Concordando los modelos batimétricos con lo enunciado por Restrepo et al. (2015) la desembocadura del Magdalena en el sector Bocas Ceniza está alineada con un cañón submarino de gran pendiente ($\sim 40^\circ$). Los sedimentos depositados en el cañón alimentan un sistema turbidítico a través de procesos de deslizamientos y corrientes desatados por

eventos sísmicos (Molina, 1993; Ercilla et al., 2002; Restrepo et al., 2015). Al desatarse estas corrientes y concentrarse en un mismo cañón, se pueden generar la profundización del mismo, que a su vez causaría un desplazamiento importante de los sedimentos a mayores profundidades con consecuencias en la infraestructura de comunicaciones submarinas (Heezen, 1956; Molina, 1993; Ercilla et al., 2002; Restrepo et al., 2015; ver Figura 30).

Para evitar la sedimentación en la desembocadura y promover la navegación comercial hacia el Puerto de Barranquilla, en 1935-36 se construyeron dos tajamaraes que concentraron a una sola salida la desembocadura del río Magdalena. En 1949 y 1951 los tajamares fueron extendidos a 120 m y 53 m respectivamente (Restrepo et al., 2015). Al ser canalizado el cauce, la velocidad del caudal aumentó y la carga de sedimentos se desplazó hacia mayores profundidades. Este cambio evitó que parte de los sedimentos se depositasen en la zona proximal a la línea de costa, provocando una profundización del perfil batimétrico cercano a esta zona. Cabe anotar que la tectónica regional que afecta esta zona está produciendo un levantamiento general de la plataforma (Molina, 1993). Sin embargo, el cambio que se genera a corto plazo (~80 años) no resultaría significativo para asociar estos aumentos del espesor y volumen en la zona de estudio.

El aumento a largo plazo de los espesores y volúmenes en la desembocadura del Magdalena pueden ser explicados por el aumento en la carga de sedimentos aportada por el río Magdalena. Esta descarga de sedimentos ha aumentado en las últimas décadas debido al incremento de la erosión de los suelos producto de la deforestación y minería (Restrepo et al., 2015) y por las condiciones morfológicas de la zona (i.e. coincidencia de desembocadura con cañón submarino) (Molina, 1993; Restrepo & López, 2008). Estos factores del río, en conjunto con la construcción de obras ingenieriles, han desplazado los aportes sedimentarios del río a mayores profundidades, desencadenando la profundización de la zona más cercana a la línea de costa. En la misma vía, la disminución a corto plazo de los volúmenes (entre 1999 y 2004) podría vincularse con una menor descarga de sedimentos en comparación con la tendencia entre 1935 y 2004.

5. CONCLUSIONES

Las principales características físicas del prodelta del río Magdalena incluyen su cobertura predominantemente terrígena, su amplitud relativamente menor (entre ~ 0.9 y 16 km), y su fuerte grado de disección por cinco cañones submarinos. En estos cañones comúnmente se desencadenan corrientes turbidíticas que han profundizado el perfil submarino por más de ~200 m y desplazado gran cantidad de sedimentos hacia aguas profundas. Se definen, con base en los modelos digitales propuestos, morfologías de relieves positivos correspondientes a canales (diques) submarinos y a intrusiones diapíricas.

Con base en la comparación de modelos digitales de profundidad se identificaron patrones morfológicos en el prodelta del río Magdalena en los periodos comprendidos entre los años 1935, 1999 y 2004. Entre estos, se identificó: (1) una zona de cañones hacia el oeste, con pendientes relativamente elevadas e incisión fuerte producto de las corrientes turbidíticas; (2) una unidad de colinas y hundimientos de forma alargada hacia el este que puede corresponder a la acumulación de bancos de arena; (3) un sector de pendientes bajas (de 0 a 2°) que se caracteriza por rugosidad relativamente moderada y podría identificarse como plataforma; y (4) abombamientos que posiblemente son producto del diapirismo presente en el área del Caribe Colombiano.

La zona de estudio ha presentado entre 1935 y 2004 (69 años) un aumento del volumen de sedimentos de fondo entre 25 y 29 km³, asociados con 30 m³/m². Relacionado con esta ganancia, se observa que hacia la línea de costa los perfiles se han profundizado, mientras que costa afuera se presenta somerización. Esta tendencia fue contraria entre 1999 y 2004 (5 años), con pérdidas de ~4 km³ (3 m³/m²). Trabajos futuros se enfocarían en la distribución espacial de estos cambios volumétricos para identificar patrones que podrían vincularse con los procesos que posiblemente desencadenaron estas tendencias de acumulación y erosión.

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

6. REFERENCIAS

Aguilera, R., 2011. Sinú and San Jacinto basins, in: *Petroleum Geology of Colombia*. Universidad EAFIT, p. 112.

Alfaro, E., & Holz, M. (2014). Review of the chronostratigraphic charts in the Sinú-San Jacinto Basin based on new seismic stratigraphic interpretations. *Journal of South American Earth Sciences*, 56, 139-169

Alvarado, M. (2005). Cartagena y el plan de restauración ambiental del Canal del Dique, y Barranquilla y las obras de profundización del canal navegable de acceso a la zona portuaria: Visión general. En Restrepo, J.D. (Ed.): *Los Sedimentos del Río Magdalena: Reflejo de la Crisis Ambiental*. EAFIT University Press, Medellín, Colombia, 217-254.

ArcGIS Pro, (s.f). Cómo funciona Kriging. Environmental System Research Institute, Inc. Recuperado de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>

Barrera, R. (1998) Geología de la Plancha 016-017 Galerazamba-Barranquilla. Ingeominas.

Barrera, R. (2001) Geología de las Planchas 16-17, Galerazamba y Barranquilla, Memoria explicativa. Ingeominas, 55 p.

Boggs, S. (2012). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. 5th edition. Pearson Education. 600 p.

Carvajal-Perico, J.H., & Mendivelso, D. (2011). *Catálogo de Volcanes de Lodo Caribe Central Colombiano*. Publicación Especial del Servicio Geológico Colombiano.

Cediel, F., Shaw, R. P., & Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the northern Andean block.

CIOH, (2017). Gráficas multianuales principales parámetros meteorológicos sobre la ciudad de Barranquilla. Recuperado de <https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/ResumenBarranquilla4.php>.

Coleman, J. M. (1976). *Deltas: processes of deposition & models for exploration*. Continuing Education Publication Co.

Cuadrado, D. G., & Gómez, E. A. (2010). Geomorfología y dinámica del canal San Blas, provincia de Buenos Aires (Argentina). *Latin American journal of sedimentology and basin analysis*, 17(1), 3-16.

Cowell P, Thom B (1994) *Morphodynamics of coastal evolution*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

DIMAR, (1999). COL 407 Puerto Colombia a Santa Marta. Atlas Cartográfico de los Océanos y Costas de Colombia, Segunda Edición. p30

DIMAR, (1999). COL 612 Aproximación a Barranquilla. Atlas Cartográfico de los Océanos y Costas de Colombia, Segunda Edición. p38

Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA), Ministerio de medio ambiente y recursos naturales. Erosión Costera. El Salvador. Recuperado de <http://mapas.snet.gob.sv/oceanografia/erosionCostera.pdf>

Duque-Caro, H. (1984). Estilo estructural, diapirismo y episodios de acrecimiento del terreno Sinú-San Jacinto en el noroccidente de Colombia. *Boletín Geológico INGEOMINAS*, 27(2), 1-29.

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

Elliott, T. (1986). Deltas, in Reading, H. G. (ed.), *Sedimentary environments and facies*, 2nd ed., Blackwell Scientific Pub., Oxford, p. 113-154.

Ercilla, G., Alonso, B., Estrada, F., Chiocci, F. L., Baraza, J., & li Farran, M. (2002). The Magdalena Turbidite System (Caribbean Sea): present-day morphology and architecture model. *Marine Geology*, 185(3), 303-318.

Farjas, M., (s.f). Levantamientos Batimétricos. Universidad Politécnica de Madrid, OCW. España. Recuperado de http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-ii/Teoria_Batimetria_Tema_13.pdf

Fontán, A., Alcántara-Carrió, J., & Correa, I. D. (2012). Combined beach-inner shelf erosion in short and medium term (Maspalomas, Canary Islands). *Geológica Acta*, 10(4), 411-426.

GEASUNP, Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. (2011). Creación de un modelo conceptual hidrogeológico. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/5141/1/hernanrojaspalacios.2011.pdf>

Gómez, J., (2015). DUNE AND COASTAL EVOLUTION IN ISLA SALAMANCA NATIONAL PARK, COLOMBIA (Tesis de Maestría). Wilfrid Laurier University, Waterloo, Canadá.

Guzmán, G., 2007. Stratigraphy and sedimentary environment and implications in the Plato basin and the San Jacinto Belt northwestern Colombia. University of Liège.

Heezen, B. C. (1956). Corrientes de turbidez del río Magdalena, Colombia. *Sociedad Geografica de Colombia*, 16, 1-22.

Hessner, K., Reichert, K., & Rosenthal, W. (1999). Mapping of sea bottom topography in shallow seas by using a nautical radar. In 2nd Symposium on Operationalization of Remote Sensing.

IDEAM, (s.f). Batimetría. Gobierno de Colombia. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/batimetrias>

IDEAM, 2010. Régimen de la marea en diferentes puntos de las costas colombianas. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/23877/Caracterización+de+la+Marea+%282010%29.pdf/a8ed71d8-3d7f-4a88-bed5-796c542aff4f>

Inman, D. L., Nordstrom, C. E. (1971). On the tectonic and morphologic classification of coasts: *Jour. Geology*, v. 79, p. 1-21.

Koopmans, B. N. (1971). Interpretacion de fotografias aereas en morfologia costera: relacionada con proyectos de ingenieria. Ministerio de obras públicas, Centro Interamericano de Fotointerpretacion (CIAF).

Maillet, G. M., Vella, C., Berné, S., Friend, P. L., Amos, C. L., Fleury, T. J., & Normand, A. (2006). Morphological changes and sedimentary processes induced by the December 2003 flood event at the present mouth of the Grand Rhône River (southern France). *Marine Geology*, 234(1), 159-177.

Martínez del Pozo, J., & Anfuso, G. (2008). Spatial approach to medium-term coastal evolution in south Sicily (Italy): implications for coastal erosion management. *Journal of Coastal research*, 33-42.

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

Mendoza, M., & Ortiz Pérez, M. A. (2000). Caracterización geomorfológica del talud y la plataforma continentales de Campeche-Yucatán, México. *Investigaciones geográficas*, (43), 7-31

Molina, A. (1993). Estudio sedimentológico y morfológico de la plataforma continental Caribe entre el sector de Santa Marta y Punta Morro Hermoso. *Bol. Cient. CIOH*, 14, 67-78.

Molina, M., Giraldo, O., & Barrera, O. (1999). Características estratigráficas y morfodinámicas de la franja litoral Caribe colombiana (sector Barranquilla (Bocas de Ceniza)-flecha de Galerazamba). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, 28(1), 61-94.

Murray-Wallace, C. V., & Woodroffe, C. D. (2014). *Quaternary sea-level changes: a global perspective*. Cambridge University Press.

Navarro Lozano, J. O. (2009). Caracterización sedimentológica y geomorfológica de los ambientes costeros en la bahía San Lucas, Baja California Sur, México (Doctoral dissertation).

Ordaz Hernández, A., Hernández Santana, J. R., Estévez Cruz, E., & Méndez Linares, A. P., (2016). Morfodinámica costera en la playa Bailén, costa sur del occidente de Cuba, entre los años 2003-2013. *Investigaciones Geográficas*.

Pradhan, U., Mishra, P., Mohanty, P. K., & Behera, B. (2015). Formation, growth and variability of sand spit at Rushikulya river mouth, south Odisha coast, India. *Procedia Engineering*, 116, 963-970.

Ramis, M. À. C., Pons, P., Prat, N. L., Gallegos, P. R., & Bauzá, F. R. (2008). Evolución de la línea de costa de la Playa de Palma-Arenal (1956-2004). *Territoris*, 2007(7), 193-202.

Rangel-Buitrago, N. G., Anfuso, G., & Williams, A. T. (2015). Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean & Coastal Management*, 114, 129-144.

Rangel, N. G., & Posada, B. O. (2005). Geomorfología y procesos erosivos en la costa norte del departamento de Córdoba, Caribe colombiano (Sector Paso Nuevo-Cristo Rey). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, 34(1), 101-119.

Restrepo, I. C., Ojeda, G. Y., & Correa, I. D. (2007). Geomorfología de la plataforma somera del Departamento de Córdoba, costa Caribe colombiana. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 20, 39-52.

Restrepo, J. D., & López, S. (2008). Morfodinámica de los deltas de Colombia. *Deltas de Colombia: Morfodinámica y vulnerabilidad ante el cambio global*. Medellín, Colombia: Fondo editorial Universidad EAFIT, 75-100.

Restrepo, J. C., Schrottke, K., Traini, C., Ortíz, J. C., Orejarena, A., Otero, L., & Marriaga, L. (2015). Sediment Transport and Geomorphological Change in a High-Discharge Tropical Delta (Magdalena River, Colombia): Insights from a Period of Intense Change and Human Intervention (1990–2010). *Journal of Coastal Research*, 32(3), 575-589.

Romero, G. A. (2009). Deepwater sedimentary processes in an active margin, Magdalena submarine fan, offshore Colombia (Doctoral dissertation, THE UNIVERSITY OF OKLAHOMA).

Rowan, J. S., Goodwill, P., & Greco, M. (1995). Temporal variability in catchment sediment yield determined from repeated bathymetric surveys: Abbeystead Reservoir, UK. *Physics and Chemistry of the Earth*, 20(2), 199-206.

Cambios morfológicos del prodelta del río Magdalena

Diego Alexander Madrid Montes -- Proyecto de Grado en Geología, Universidad EAFIT

Ruíz, A. D. C., & Pabón, J. D. (2013). Efecto de los fenómenos de El Niño y La Niña en la precipitación y su impacto en la producción agrícola del departamento del Atlántico (Colombia). *Cuadernos de Geografía-Revista Colombiana de Geografía*, 22(2).

Santos-Barrera, Y., 2015. Morfología del margen continental del Pacífico colombiano en los sectores de Bahía Solano y Tumaco. *Bol. Cient. CIOH*, 33: 169–186.

Shepard, F. P. (1973). Sea floor off Magdalena delta and Santa Marta area, Colombia. *Geological society of america bulletin*, 84(6), 1955-1972.

Stutz, M. L., & Pilkey, O. H. (2011). Open-ocean barrier islands: global influence of climatic, oceanographic, and depositional settings. *Journal of Coastal Research*, 27(2), 207-222.

Syvitski, J. P., Kettner, A. J., Correggiari, A., & Nelson, B. W. (2005). Distributary channels and their impact on sediment dispersal. *Marine Geology*, 222, 75-94.

Thomas, C. G., Spearman, J. R., & Turnbull, M. J. (2002). Historical morphological change in the Mersey Estuary. *Continental Shelf Research*, 22(11), 1775-1794.

USS Nokomis Chart 5688, (1935-1936), hydrographic surveys data.

Van der Wal, D., Pye, K., & Neal, A. (2002). Long-term morphological change in the Ribble Estuary, northwest England. *Marine Geology*, 189(3), 249-266.

Van Der Wal, D., & Pye, K. (2003). The use of historical bathymetric charts in a GIS to assess morphological change in estuaries. *The Geographical Journal*, 169(1), 21-31.

Wright, L. D. (1978) Sediment transport and deposition at river mouths: A synthesis: *Geol. Soc. America Bull.*, v. 88, p. 857-868.

Wu, S., Cheng, H., Xu, Y. J., Li, J., & Zheng, S. (2016). Decadal changes in bathymetry of the Yangtze River Estuary: Human impacts and potential saltwater intrusion. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 182, 158-169.

Yokoyama, Y., & Esat, T. M. (2011). Global climate and sea level: Enduring variability and rapid fluctuations over the past 150,000 years. *Oceanography*, 24(2), 54-69.