

TRABAJO DE GRADO

Daniela Cardona Lopera

dcardo21@eafit.edu.co

Departamento de Ciencias de la Tierra

Escuela de Ciencias

Universidad EAFIT

Medellín, Colombia

2018

**ACTUALIZACIÓN DE LA MIGRACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA DE
ACANTILADOS BLANDOS TROPICALES ENTRE MINUTO DE DIOS Y PUERTO
REY, SUR DE LA COSTA CARIBE COLOMBIANA**

DANIELA CARDONA LOPERA

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

Asesor:

JUAN FELIPE PANIAGUA ARROYAVE, Ph.D.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

ESCUELA DE CIENCIAS

UNIVERSIDAD EAFIT

MEDELLÍN, COLOMBIA

2018

**ACTUALIZACIÓN DE LA MIGRACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA DE
ACANTILADOS BLANDOS TROPICALES ENTRE MINUTO DE DIOS Y PUERTO
REY, SUR DE LA COSTA CARIBE COLOMBIANA**

En preparación para la revista OCEAN & COASTAL MANAGEMENT

(ELSEVIER)

RESUMEN

El sur de la costa colombiana en el mar Caribe se caracteriza por problemas severos asociados con la erosión costera que, en algunos sitios, ha motivado proyectos de mitigación basados en un entendimiento limitado de los procesos responsables. Como avance en este entendimiento del retroceso litoral en el sur del Caribe colombiano, este trabajo actualiza la discusión sobre la migración de la línea de costa de acantilados suaves ubicados en la parte norte del municipio de Arboletes, entre los departamentos de Antioquia y Córdoba.

La migración de la línea de costa se calculó con base en datos históricos de 1938, 2009 y 2014, y a partir de una nueva línea de costa generada con fotografías aéreas tomadas con un vehículo aéreo no tripulado en 2017, por medio del programa *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) en ArcMap.

En coherencia con trabajos anteriores, se calcularon tasas de retroceso de la línea de costa en Minuto de Dios de ~ 1 m/a y en Puerto Rey de hasta -17 m/a. La comparación entre las tasas de retroceso de punto final y las obtenidas por medio de regresiones evidencia, por otra parte, tasas de retroceso constantes en el tiempo. Estos valores sugieren que la zona de acantilados suaves al norte de Puerto Rey ha presenciado quizá tasas de erosión entre las más altas en el mundo (con procesos aún no bien entendidos) y que no ha habido aceleración en el retroceso entre 2009 y 2017.

Los resultados de este trabajo evidencian el potencial del monitoreo multianual como método de estudio para entender los procesos naturales y antrópicos que influyen en la evolución de acantilados suaves tropicales. Asimismo, la comparación de las tasas

de retroceso calculadas con predicciones realizadas por otros autores sugiere la inminente desaparición de la vía Arboletes-Montería y los centros poblados en Minuto de Dios y Puerto Rey en escalas de tiempo relativamente cortas. Se argumenta que las distancias predichas para 2060 podrían muy probablemente alcanzarse en menos tiempo sin importar las soluciones de ingeniería que se han desarrollado. Entre los análisis futuros deberían incluirse el papel del cambio global, el aumento relativo del nivel del mar y el aporte de procesos marinos y subaéreos en el retroceso de los acantilados suaves en zonas tropicales. La influencia de estos factores, que fluctuarían de acuerdo con las temporadas húmeda-seca y oscilaciones decadales, no son bien entendidos en el sur del Caribe colombiano.

Palabras claves: Costa Caribe colombiana, Arboletes, retroceso de acantilados suaves tropicales, migración línea de costa, DSAS.

ABSTRACT

Southern Caribbean coast of Colombian is characterized by severe problems associated with coastal erosion, which has motivated mitigation solutions based on a limited understanding of processes responsible. As an advancement in the understanding of coastal erosion in that region, this work updates the discussion regarding coastline migration in the northern area of Arboletes municipality, between Antioquia and Córdoba departments. Shoreline migration was calculated based on historical data of 1938, 2009 and 2014, and on a new shoreline position generated by aerial photographs taken with a drone in 2017, with the use of the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) program in ArcMap.

Consistent with previous works, shoreline retreat rates at Minuto de Dios were ~ 1 m/a, with up to ~ 17 m/a at Puerto Rey. Comparison of end-point and linear regression rates further evidences retreat rates constant in time. These values suggest that the soft cliffs at Puerto Rey evidence erosion rates among the highest in the world (with processes not well understood) and that there was no acceleration in shoreline retreat between 2009 and 2017. The results of this study support the potential of multiannual monitoring as a method of study the natural and anthropic processes that influence the evolution on the tropical soft cliffs of the region.

Furthermore, the comparison of retreat rates herein presented with predictions proposed by other authors suggests the imminent disappearance of the Arboletes-Montería road and the populated center in Minuto de Dios y Puerto Rey in relatively short time scales. It is also argued that the distances predicted for 2060 could very likely be achieved in less time regardless of the engineering solutions that have been developed. Future analyses

should include the role of global change, the relative increase in sea level and the contribution of marine and sub-aerial processes in the tropical soft cliffs retreat. The influence of these factors, which would fluctuate according to wet-dry seasons and decadal oscillations, is not well understood in the southern Colombian Caribbean.

Keywords: Caribbean coast of Colombia, Arboletes, soft cliffs retreat, shoreline migration, DSAS.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Análisis de migración litoral y acciones de manejo

Las amenazas ambientales presentes en las zonas costeras conllevan a que el análisis de las causas y tendencias de la migración de la línea de costa continúe como tema prioritario en las agendas de manejo costero a nivel mundial (Charlier y Meyer, 1998; Jones and Phillips, 2011; Pranzini y Williams, 2013 y otros). La migración de la línea de costa puede implicar la pérdida definitiva de terrenos litorales que, a su vez, genera afectaciones importantes sobre las actividades antrópicas. Directamente pueden ser impactadas la economía con el turismo y el transporte (Rangel-Buitrago et al. 2015), la seguridad de la población, y en costas desarrolladas, el mercado inmobiliario (Karanci et al., 2018 y referencias allí encontradas).

La migración de las líneas de costa es un fenómeno relativamente complejo que involucra la interrelación de procesos geológicos y oceanográficos operando a escalas de tiempo de segundos a milenios y rangos de espacio entre centímetros y cientos de kilómetros (Cowell y Thom, 1994). Esta interacción está mediada por factores como los cambios relativos en el nivel del mar, las tasas de erosión y sedimentación en los ríos en sus desembocaduras y la configuración tectónica y topográfica (Passeri et al., 2015; Nienhuis et al., 2017;). Asimismo, eventos como inundaciones, huracanes y otras anomalías climáticas se involucran directamente en cómo se desarrollan las tasas de migración costera (Sallenger Jr. et al., 2002; Yao et al., 2017; Barnard et al., 2017; Young, 2018 y otros).

Precisar procesos relacionados con las tasas de migración litoral permite la identificación de acciones pertinentes para la mitigación de impactos asociados. Estas actividades de manejo costero han adquirido prioridad en las últimas décadas considerando que, por ejemplo, aproximadamente 10% de la población mundial vive en zonas costeras (Crowell et al., 2013) y se prevé una aceleración en el ascenso del nivel eustático del mar (Church et al. 2014). Las acciones de manejo han llevado a la construcción de obras duras y blandas de ingeniería, relocalización de poblaciones y, en algunos casos, la no intervención, con diferentes niveles de éxito (Correa y González, 2000; Dean y Dalrymple, 2004 Capítulo 14; Houston, 2013)

1.2. Migración litoral en el sur del Caribe colombiano

La parte sur de la costa colombiana sobre el mar Caribe se caracteriza por intensos problemas asociados con la erosión costera (Correa y Morton, 2010 y referencias allí encontradas). Estudios recientes (Rangel-Buitrago et al., 2015) sugieren que 33.2% (812,6 km) de la línea de costa es estable y 18,4% (450,5 km) de ella está avanzando. En contraste, los aproximadamente 1.182 km (48.3%) de línea de costa Caribe que están en retroceso sugieren la poca efectividad de las medidas de defensa adoptadas y resaltan la necesidad de soluciones racionales basadas en observaciones y análisis robustos (Rangel-Buitrago et al., 2018).

Un ejemplo de pérdida de terrenos litorales en la costa sur del Caribe se encuentra en el municipio de Arboletes, entre los departamentos de Antioquia y Córdoba. Estudios de esta zona han documentado los procesos naturales y las actividades humanas que causaron, como ejemplo más extremo, la erosión completa de la península de Punta Rey. La línea de costa en este sitio retrocedió cerca de 1,5 km de longitud entre 1957 y 2000

(Morton y Correa 2004, Correa y Vernette 2004). Este retroceso ha causado la eliminación de la protección de las olas proporcionada por la península, lo cual provocó a su vez una extensa erosión de acantilados y playas hacia el sur (Correa et al., 2007b).

Una de las localidades más afectadas por la erosión en el Caribe Colombiano es el municipio de Arboletes, ubicado en el departamento de Antioquia. En esta zona se han desarrollado estudios que registran significativas tasas de erosión costera (e.g., Correa y Vernette, 2004; Correa et al., 2007a; Correa et al., 2007b; Correa y Paniagua-Arroyave, 2012), con proyecciones del retroceso de la línea de costa superiores a 65 m para el año 2059 (Paniagua-Arroyave, 2013). Este problema ha sido atacado con soluciones ingenieriles como barreras, espolones y muros de contención. Sin embargo, estas obras únicamente han trasladado el problema de la erosión, agudizándolo en regiones puntuales (Correa y Vernette, 2004).

El sector Minuto de Dios (MD), un barrio que es habitado por 1.600 habitantes al norte del municipio de Arboletes da cuenta de la problemática erosiva reciente. En este sitio se han calculado tasas de retroceso de aproximadamente 2 m/a, con proyecciones que proponen un retroceso de línea de costa de 85 m entre 2010 y 2060 (Paniagua-Arroyave et al., in press). A pesar de que previos estudios han calculado las tasas históricas de retroceso costero cerca a Arboletes (e.g. Correa y Vernette, 2004; Correa y Paniagua-Arroyave, 2012; Paniagua-Arroyave et al., en prensa), la necesidad de incrementar el detalle y precisión de estas estimaciones se hace necesaria. No sólo la actual localización del barrio y la cantidad de personas afectadas en un futuro cercano, sino también el bien común que se evidencia en la posible pérdida de la vía que comunica Arboletes y la ciudad de Montería.

Este estudio actualiza la posición de la línea de costa y evalúa la variación en las tasas de erosión costera entre los años 1938, 2009, 2014 y 2017. Los datos del año 2017 son creados a través de ortomosaicos generados con fotografías Ultra HD 4k tomadas desde un vehículo aéreo no tripulado. Estas fotografías de alta resolución proporcionan nuevo conocimiento sobre la evolución litoral de esta región, el cual podrá ser integrado en la búsqueda de soluciones relacionadas al retroceso de las líneas de costa en el sur del Caribe Colombiano.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

La región del Caribe Colombiano se caracteriza por una continua actividad tectónica ligada a la interacción de las placas Caribe, Nazca y Suramericana (González et al., 1988). El margen noroccidental de Colombia, el cual comprende la zona sur del Caribe Colombiano, se localiza sobre una franja de rocas plegadas denominada “Cinturón plegado del Sinú”, el cual comprende secuencias sedimentarias con edades Paleogeno-Neogeno, depositadas sobre un basamento cristalino cuya composición no ha sido claramente determinada. La litología del Cinturón plegado del Sinú abarca *shales* y areniscas con material fosilífero en la base, suprayacidas por materiales de grano grueso como areniscas conglomeráticas y conglomerados en el techo (Duque-Caro, 1984). La región se encuentra afectada por un movimiento tectónico diferencial impulsado en parte por el diapirismo de lodo y fenómenos asociados (Vernette et al. 1992) además de interacciones cuaternarias entre el clima tropical y los procesos oceanográficos que hacen del caribe colombiano un litoral mixto inestable (Correa y Morton, 2011; Martínez et al., 2010; Rangel-Buitrago et al., 2015).

Este estudio se realizó entre los departamentos de Antioquia y Córdoba, entre los sectores Minuto de Dios (MD) y Puerto Rey (PR) (Figura 1). Su franja litoral incluye ~1.7 km de acantilados suaves (resistencia a la compresión <5 MPa) compuestos por rocas sedimentarias consolidadas que afloran a lo largo de la línea de costa actual. Las litologías presentes en este sector son: arcillolitas y lodolitas, altamente meteorizadas, plegadas y fracturadas, con lentes de areniscas y conglomerados (Correa y Paniagua-Arroyave, 2016 y sus referencias).

La morfología general del litoral entre los sectores MD y PR es clasificada por Correa y Vernet, 2004 como “costa abierta” en relación con los fenómenos asociados con la erosión costera. Este tramo tiene una configuración “en sierra”, dada por la sucesión de bahías amplias, separadas por puntas de mayor resistencia a la erosión asociadas a causas naturales y a la construcción de obras civiles. La morfología del litoral está dominada por terrazas marinas emergidas, con amplitudes (perpendiculares a la costa) de ~6 km y alturas máximas de 36 m. Los límites tierra adentro de estas terrazas son escarpes de paleo-acantilados con rasgos fósiles de línea de costa en sus bases, incluyendo peñascos aislados y barras de playa que evidencian el levantamiento costero durante el Holoceno (Raasveldt, 1958; Page, 1986; Correa y Vernet, 2004).

Las principales geoformas características son acantilados, arcos, cavernas y acanaladuras de erosión. Estos rasgos presentes a lo largo de toda la línea de costa facilitan la ocurrencia de movimientos de masa (deslizamientos, caídas de rocas, flujos de lodos y subsidencia), promovidos también por las aguas residuales y de escorrentía, sobre todo si las terrazas están desprovistas de vegetación protectora. A medida que las terrazas retroceden también se observa la formación de plataformas rocosas inclinadas hacia el mar y de masas rocosas menos alteradas y fracturadas que permanecen un tiempo como islotes y peñascos aislados (Correa et al., 2007b).

Influida por los desplazamientos periódicos de la Zona de convergencia intertropical, la región posee dos periodos climáticos típicos: (1) seco, de finales de diciembre a principios de abril con precipitaciones que alcanzan los 40 mm/mes y (2) lluvioso húmedo, de mayo a noviembre con precipitaciones que alcanzan los 100 mm/mes. Estas dos épocas, sin embargo, no están asociadas a cambios drásticos de temperatura (Thomas et al., 2007).

Los procesos oceanográficos de la zona dependen principalmente de las mareas, consideradas semi diurnas mixtas, de rango micromareal con amplitudes máximas del orden de 0.92 m y medias cercanas a 0.5 m (Thomas et al., 2007) y de las alturas medias significativas de las olas oscilando entre ~0.5 a ~1.6 m asociadas a la actividad de los vientos Alisios del N y NE en época seca, y del S en época húmeda. Con lo anterior, diferentes autores (Thomas et al., 2007; Osorio et al., 2016) sugieren que los procesos de oleaje dominan en las zonas litorales de Antioquia.

2.2. Migración histórica de la línea de costa

La evolución histórica del sector MD y PR en las últimas décadas ha sido drástica y es el ejemplo más dramático de erosión y pérdida de terrenos costeros en todo el litoral Caribe colombiano. Los inventarios de cambios de línea de costa disponibles (Figura 2) describen (vista en planta) las posiciones sucesivas de los contornos del área. Las fotografías IGAC fechadas 1962 y 1974 evidencian que la península desapareció prácticamente en su totalidad en un periodo cercano a 12 años, implicando por lo tanto velocidades de erosión de ~100 m/año (Correa et al., 2007b).

La cuantificación de las tasas de retroceso de la línea de costa se realizó utilizando datos históricos de la costa extraídos de tres fuentes: (1) una línea de costa trazada en el software Esri® ArcMap 10.4.1.586 a partir de un mosaico registrado basado en fotografías aéreas tomadas en 1938 (Hoyos et al., 2006); (2) un mosaico de fotografías aéreas ortorectificadas de 2009 (Prüssmann-Urbe, 2012); y (3) un mosaico de fotografías aéreas tomadas de 2014 con un vehículo aéreo no tripulado (Corpouraba, 2014). La concordancia de la fisiografía mostrada por las imágenes en el plano regional se verificó con el mapa trazado en 1789 por la comisión liderada el Brigadier español Francisco

Fidalgo (Domínguez et al., 2012). En este estudio se eligió la línea de vegetación estable como línea de referencia, que a su vez coincide con la posición de la línea de costa en la cima del acantilado (Boak y Turner, 2005). Este proxy de la línea de costa permite la ubicación de una línea común en diferentes imágenes (Moussaid et al., 2015).

2.3. *Imágenes aéreas de 2017*

La información histórica disponible fue complementada con orto-mosaicos creados a partir de imágenes aéreas tomadas en 2017 (Figura 3). La adquisición de estas imágenes se realizó con un vehículo aéreo no tripulado (unmanned aerial vehicle, UAV por sus siglas en inglés) Blade Chroma de cuatro helicópteros. Por medio del UAV se recolectaron 556 fotografías Ultra HD 4k durante 3 días aproximadamente, para un tiempo de vuelo de ~25 minutos por registro. Las fotografías fueron luego usadas para crear ortomosaicos que complementaron la información histórica disponible.

Entre las características técnicas de la toma de fotografías se incluyen: configuración vertical de despegue y aterrizaje, así como vuelos de forma autónoma por el UAV. Las partes principales del sistema aerotransportado incluyeron los motores, fuente de alimentación del actuador, el cual funcionó con motores sin escobillas, y la batería de polímero de litio (Papakonstantinou et al., 2016). Se utilizó un sensor YUNEEC CGO3 1.8.00(A) de 12 megapíxeles (3840x2160 píxeles). La configuración del UAV consistió en un sistema de piloto manual con información de vuelo actual, coordenadas y altura. Todo el registro fotográfico se realizó cada 4 segundos y la inclinación con la vertical fue cercana a 90° con alturas de vuelo de aproximadamente 210 ft (~64 m).

Para la creación del mosaico de 2017 se utilizó Agisoft Photoscan V.1.2.0. Entre sus características se encuentran el control de errores en la intersección de las imágenes, la corrección del color y la conservación de la calidad inicial de las imágenes (Agisoft LLC, 2016). Para este estudio, el software detectó los puntos característicos de 470 fotografías depreciadas de las 556 tomadas y, según las coincidencias que encontró en cada una de ellas, produjo una nube de puntos dispersa que sirvió de base para generar la geometría de la escena en una nube de puntos densa (Mancini et al., 2013). Con la nube de puntos densa se generó una malla en 3D de la geometría de la escena y, a partir de ella, se obtuvieron los ortomosaicos de alta resolución. Adicionalmente, Agisoft Photoscan permitió calibrar la información de la cámara usada (YUNEEC CGO3 1.8.00A) para obtener no sólo precisión cartográfica, sino también la conservación del nivel de detalle de las fotografías iniciales.

La línea de costa generada presenta datos útiles para actualizar el inventario de obras civiles recientemente construidas. Espolones y enrocados descritos por Correa y Vernette (2004) y Prüssmann-Urbe (2012) han sido modificados, para el año 2017, debido probablemente a la actividad denudativa de la zona. Para el año 2012, en la zona de estudio se encontraban 7 espolones. Para 2017, 4 de estos espolones desaparecieron, a lo que la comunidad respondió con la construcción de 5 obras nuevas, así como enrocados en las zonas no-urbanizadas.

2.4. Incertidumbre en las posiciones de línea de costa

Diversos autores (Thieler and Danforth, 1994; Moore, 2000; Morton et al., 2004) han proporcionado estimaciones de los errores típicos de medición asociados con los métodos de mapeo y la digitalización de la línea de costa. Morton et al. (2004) mencionan,

por ejemplo, que las tasas de cambio costero calculadas son confiables si se tienen en cuenta parámetros como: (1) errores de medición que determinan la precisión de la posición de cada línea de costa, (2) errores de muestreo que tienen en cuenta la variabilidad de la posición de las líneas de costa y, 3) errores estadísticos asociados con la compilación y comparación de la posición de las líneas de costa.

Este trabajo considero los errores a partir de incertidumbres de medición fotográfica después de la corrección de distorsiones relacionadas con imágenes (Moore, 2000; Fletcher et al., 2003). El error total de posición de la línea de costa, E_t , se calculó usando (Genz et al., 2007)

$$E_t = \pm \sqrt{E_r^2 + E_d^2 + E_p^2}, \quad (1)$$

donde E_r se refiere al error de rectificación (7.5 m para 1938 y 1.5 m para 2010, 2014 y 2017), E_d al error de digitalización (3m para todos los casos) y E_p al error asociado al tamaño de píxel (0.5 m para 1938 y 0.3 para 2010, 2014 y 2017). No se consideraron incertidumbres posicionales relacionadas con mareas y variabilidad estacional debido a que la línea de vegetación se encuentra en la cima del acantilado.

2.5. Distancias y tasas de migración de la línea de costa

Para realizar el cálculo de distancias y tasas de migración fue necesaria la digitalización de tres de las cuatro líneas de costa utilizadas (2009, 2014 y 2017) en el software ArcMap®. El cálculo de migración de las líneas de costa se desarrolló usando la versión 4.0 del sistema digital de análisis de líneas de costa (*Digital Shoreline Analysis System*, DSAS por sus siglas en inglés, Thieler et al., 2009) en el sistema proyectado de coordenadas Magna Colombia Oeste. La metodología siguió cuatro pasos: (1) establecer

parámetros predeterminados y digitalización de las líneas de costa, (2) creación de línea de base, (3) generación de los transectos y (4) cálculo de la tasa de cambio (Figura 4.A).

Una línea base se digitalizó siguiendo la orientación de las líneas de costa analizadas, con los transectos de cálculo orientados de forma aproximadamente perpendicular desde la línea base hasta las líneas de costa. Si esta configuración se cumple, las distancias entre las líneas de costa y la línea base se asumen como representaciones confiables de las distancias del retroceso. En resumen, se utilizaron 736 transectos espaciados de 10 m aproximadamente de longitudes variables debido a que la migración es asimismo variable.

De los valores de tasas de cambio que DSAS genera automáticamente únicamente se utilizó la información entregada de “transectos” y a partir de las coordenadas de cada intersección, las distancias y las fechas de migración se calcularon 6 datos (figura 4.B) : (1) longitud total de la costa, (2) distancia entre las líneas de costa, (3) tasas de retroceso, (4) movimiento neto de la costa (NSM, por sus siglas en inglés), (5) tasa de punto final (EPR) y (6) tasa de regresión lineal (LRR).

Todos los cálculos de tasas de cambio se consideraron con el umbral de intersección de la costa igual a 4, debido a que los datos constan de cuatro posiciones históricas, por lo que cualquier transecto que no cruzará cuatro intercepciones no se incluye en los cálculos presentados.

3. RESULTADOS

3.1. Evolución de la línea de costa

El análisis de los cambios en la línea de costa del sector MD y PR entre 1938-2017 indicó que los acantilados y la plataforma continental han estado erosionándose a una velocidad promedio de ~1.07 m/a en 79 años. En general, las tasas de retroceso se presentan relativamente constantes y la erosión más alta y consistente se registra en el sector de PR (Figura 5). La Tabla 1 presenta los datos máximos y mínimos de las tasas de retroceso de toda el área. El retroceso anual, calculado según el promedio, evidencia que las cifras obtenidas no han tenido disminuciones significativas a pesar de las soluciones implementadas por los entes gubernamentales para frenar la erosión de la región.

Los valores obtenidos para el Movimiento neto de la costa (*net shoreline movement*, NSM) y el cálculo de la tasa de punto final (*end point rate*, EPR) se realizaron para conocer las distancias entre la costa más antigua y la costa más reciente a partir de los transectos generados en DSAS. En la imagen adjunta a la Tabla 2 se observa que los valores de EPR representan el cambio total de la línea de costa, mientras que la tasa de regresión lineal (*linear regression rate*, LRR) registró la variabilidad en el retroceso a lo largo del tiempo. La imagen presenta todos los valores en negativo debido a que las cifras más significativas en el tiempo han sido de retroceso (erosión).

Para mayor claridad, y con base en los resultados obtenidos, los datos se dividieron en 3 tramos: (1) MD, (2) PR sur y (3) PR norte. Esta diferenciación está también relacionada con las orientaciones en la línea de costa que presenta PR. Esta orientación

está relacionada con el ángulo de incidencia del oleaje, lo cual a su vez influye en la variabilidad de las tasas de erosión (Tabla 3).

Entre las características fisiográficas de los tres puntos se observa que MD es limitado por zonas acantiladas sin presencia de playas. El sector ha evidenciado pérdidas del terreno hasta de 202,75 m desde 1938. Entre las causas se encuentra, por ejemplo, la construcción desorganizada de obras de defensa que retienen la erosión en puntos específicos y la agudizan en otros.

Puerto Rey sur registra, por otro lado, la mayor estabilidad de los 3 tramos definidos. Este tramo se caracteriza por la presencia de dos playas de anchos variables. Su estabilidad se debe muy probablemente a la acción de obras civiles (espolones) capaces de retener y acumular material arenoso para crear playas, caso contrario del sector de MD.

En el sector de PR norte, los datos obtenidos muestran pérdidas del terreno entre 11,1 y 1280,8 m desde el año 1938. La causa del retroceso en este tramo se debe probablemente a la concentración de energía del oleaje en la vecindad de Punta Rey. En general, toda el área (3 tramos) presenta rasgos geomorfológicos característicos similares. Sobre el techo de los acantilados presenta deslizamientos y vegetación inconstante que sugieren inestabilidad del terreno y edificaciones mar adentro que indican posiciones antiguas costeras.

3.2. Cambios en la línea de costa 1938- 2009

Los datos obtenidos para el año 2009 muestran valores variables para el retroceso de la línea de costa entre -0,8 y -17,2 m/a con un valor promedio de 3 m/a. Los valores

más bajos de retroceso de la línea de costa se observan en el sector de MD donde hay un promedio de 1.8 m/a, con valores entre -2.1 y -0.9 m/a. La desviación estándar de 0.3 m/a evidencia una variabilidad relativamente constante en el espacio de la línea de costa del sector MD respecto a la erosión.

El sector PR se caracteriza por tener un comportamiento respecto a la erosión de la línea de costa similar al sector MD. PR sur se identifica por un valor promedio de retroceso de la línea de costa de -1.6 m/a, resultante de la variación de datos entre -3.70 m/a y -0.8 m/a. La desviación estándar de 0.5 sugiere que la línea de costa ha tenido una tendencia regular respecto a la erosión costera que afecta el sector suroccidental de la costa Caribe Colombiana.

El sector PR norte se caracteriza por tasas de retroceso entre -17.172 y -9.8 m/a, promediando un valor de -11.1 m/a. La desviación estándar de 1.8 m/a sugiere un comportamiento homogéneo de la línea de costa del sector PR norte frente a la erosión costera y considerando los valores medios. Sin embargo, se observa una afectación notablemente mayor de esta área respecto de sus similares de PR sur y MD.

3.3. Cambios en la línea de costa 2009- 2014

Los datos obtenidos para el año 2009 muestran valores variantes para el retroceso de la línea de costa entre -8,2 y 3.8 m/a con un valor promedio de -2,4 m/a. La línea de costa del sector MD durante el año 2014 se caracteriza por un valor promedio de tasas de retroceso de -3.1 m/a, siendo el valor más alto en comparación con los otros tramos estudiados. La desviación estándar para este valor es de 2.1, caracterizando variaciones espaciales importantes en la erosión para los diferentes transectos del área de MD.

El sector de PR sur se identifica por un valor promedio de tasa de retroceso de -1.2 m/a, con una desviación estándar de 1.7 m/a. Estos cálculos caracterizan los valores más bajos de los tres tramos estudiados. El valor de desviación estándar, sin embargo, sugiere una variación espacial significativa.

El área de PR norte se caracteriza por un valor promedio de tasa de retroceso de -1.9 m/a, con desviación estándar de 2.13 m/a. Estos valores son intermedios respecto a los tramos de MD y PR sur, caracterizando una notable afectación por la erosión costera que es uniforme en toda la línea de costa de esta área.

3.4. Cambios en la línea de costa 2014- 2017

Los datos obtenidos para el año 2017 muestran valores variables para el retroceso de la línea de costa entre -12,1 y 9,3 m/a con un valor promedio de 1,7 m/a. Los valores más bajos de retroceso de la línea de costa se observan en el sector de MD donde hay un promedio de -2 m/a; valor obtenido de la variación de varios valores entre -7.1 y 9.30 m/a. La desviación estándar es de 2.72 m/a que evidencia relativamente alta variabilidad espacial.

El sector PR para 2017 presenta un comportamiento diferente al de los otros años debido a que el promedio de PR sur presenta tasa de retroceso de 0 m/a, resultante de la variación de datos entre -3,6 m/a y 2,7 m/a. La desviación estándar de 1.5, sugiere relativamente alta variabilidad espacial entre avance y retroceso.

El sector PR norte se caracteriza por altas tasas de erosión que van entre -12.14 m/a y -0.45 m/a, promediando un valor de -3.66 m/a para toda esta área. Lo cual sugiere

un comportamiento acelerado de la erosión frente a los otros años registrados. La desviación estándar para este tramo es de 2.81.

4. DISCUSIÓN

Las altas tasas de erosión costera presentes en muchos lugares del mundo son motivo de preocupación debido a las consecuencias económicas y humanitarias que implican. Mientras que en áreas de acantilados suaves se observan tasas de retroceso del orden de 1 m/a (Sunamura, 2015 y referencias allí encontradas), en el litoral del municipio de Arboletes en Colombia se evidencian valores de retroceso de hasta -17 m/a. Estos valores sugieren que la zona norte de Puerto Rey ha presenciado quizá tasas de erosión entre las más altas en el mundo.

Los procesos erosivos en Puerto Rey están relacionados con factores naturales como la posición geográfica del área de estudio, la dirección de los vientos y olas que llegan al Caribe Colombiano, las rocas sedimentarias altamente meteorizadas presentes en cercanía a la línea de costa, y las tasas de emergencia-subsidencia dadas por el diapirismo de lodos y la neotectónica. Las tasas de migración sugieren que la erosión en las áreas de MD y PR ha alcanzado niveles críticos, esto muy probablemente debido a factores como el aumento del nivel del mar, la erosión subaérea y las obras civiles realizadas en las proximidades al área de estudio (Figura 6). Estudios anteriores proveen evidencias en este respecto basadas en batimetría en la plataforma somera, inventarios de construcciones e intervenciones antrópicas y análisis de retrocesos de la línea de costa histórica.

En ambientes geológicamente inestables como MD y PR, ubicados cerca de lugares afectados por el diapirismo de lodos y la neotectónica, la inestabilidad litoral alcanza en muchos casos expresiones máximas (Correa y Morton, 2008). La evolución de los paisajes litorales en esta zona puede llegar a ser violenta y rápida en extremo, y

se caracteriza, entre otros aspectos, por la erosión acelerada de las playas, por hundimientos de terrenos y pérdidas importantes y definitivas del relieve litoral.

4.1. Retroceso costero y plataforma litoral

Estudios realizados por Restrepo et al. (2006) sugieren que la erosión en Arboletes no solo se presenta a lo largo de la línea de costa sino también en la plataforma de abrasión. Análisis batimétricos (Correa, et. al. 2007b) sugieren asimismo que la plataforma somera al frente de MD y PR se caracteriza por presentar un perfil plano, sin irregularidades mayores, alcanzando la profundidad de 10 m a distancias entre 6 y 7,2 km desde la línea de costa. En este sector las isobatas tienen una orientación dominante NE-SO y una cobertura sedimentaria (ausente en otros sitios de esta zona) compuesta por sedimentos finos (lodos) dispuestos en capas de entre 30 cm y 1,5 m de espesor, con “parches” de arenas lodosas (porcentajes de arena menores al 16% en peso) ubicados a menos de 2 m de profundidad. Los datos de tasas de retroceso que se obtuvieron muestran que en este tramo de MD y PR sur los valores promedios son del orden de -1,7 m/a y -5,3 m/a, respectivamente. Cabe anotar que la cobertura sedimentaria lodosa podría suponer una fuente de protección ante la acción del oleaje dada la disipación de energía que esta implica (Elgar y Raubenheimer, 2008).

Correa et. al. (2007b) también describe en los perfiles batimétricos al frente de PR norte. La batimetría de este sector se observa mucho más irregular, y las isóbatas cambian bruscamente de dirección hacia el norte, definiendo un relieve positivo submarino elongado, con irregularidades y bajos circulares a las profundidades de 2 y 3 m. Las profundidades máximas registradas en el área de la desaparecida península de Punta Rey son del orden de los 3,5 a 4 m, y marcan fondos predominantemente rocosos

que se elevan bruscamente hasta emerger en los islotes de Isla Rey. Para esta zona, las tasas de retroceso son en promedio de -4,3 m/a y -11,9 m/a. Estas tasas podrían evidenciar una relación directa entre la simetría del fondo marino y el retroceso de la línea de costa.

4.2. Efectos del oleaje en Minuto de Dios y Puerto Rey

Para comprender el retroceso de los acantilados suaves de Arboletes y las tasas de retroceso que se evidencia allí, es necesario identificar otros factores además de la morfología del fondo marino. Sunamura (2015) sugiere al oleaje como el factor principal en el retroceso de acantilados (Figura 7). Estudios anteriores en la región (Correa y Vernet, 2004) han identificado el ángulo de incidencia de las olas como factor clave.

El oleaje típico en el área de estudio presenta dos ángulos de aproximación (Figura 8). Hacia la zona de PR norte, las olas rompen en los acantilados de forma casi perpendicular, mientras que en los sectores de MD y PR sur presenta ángulos entre 30° y 40°. Esta observación sugiere una conexión entre el ángulo de incidencia y las tasas de retroceso.

Otro factor influyente en las tasas de retroceso del área es el transporte de sedimentos relacionado con la deriva litoral. A pesar de que se registran aportes bajos, los sedimentos resultantes de la erosión de los acantilados y de algunos drenajes forman depósitos de playa que influyen en la transformación de las olas. Estos depósitos se vinculan no sólo con el re-trabajamiento de las partículas en suspensión y posterior socavación al momento de generar contacto con la línea de costa (Kline et al., 2014). De hecho, estudios futuros deberían enfocarse, entre otros, en el análisis de los anchos de

playa óptimos en relación con la capacidad erosiva de las olas (Limber y Murray, 2011, su Fig. 2), lo que muy probablemente indicaría la pertinencia en la construcción de obras de defensa en sitios de acantilados blandos.

Murray y Ashton (2013) describen que el transporte de sedimentos a lo largo de la costa domina la evolución de la línea de costa. Aunque su trabajo se enfoca en costas depositacionales, las ideas presentadas podrían explicar las diferencias en el retroceso de acantilados blandos en función del ángulo de aproximación.

Según los datos, a mayor ancho de playa, mayor deposición de sedimentos. Lo que implica menor energía del oleaje y menor socavación. Contribuyendo a la generación de costas acrecionales. Caso contrario en costas erosionales como MD y PR donde el ancho de la playa es prácticamente nulo (Figura 8.A). En estas zonas la energía con la que rompen las olas que a su vez transportan sedimentos es más fuerte y genera socavación y posterior erosión. Sectores específicos de la zona estudiada en este proyecto presentan relación con ambas descripciones (puntos de acreción y puntos de erosión) en relación a la construcción de obras de defensa como espolones y enrocados (Figura 9). La reducción de las tasas de erosión dadas en una parte de las obras de defensa hace que al sector opuesto de la misma genere drásticos aumentos erosivos.

La iniciativa de construcción de estas obras se presentó para la mitigación del fenómeno de erosión costera entre 1997 - 2000. Sin embargo, la efectividad de estas intervenciones de corto plazo ha sido foco de discusión, debido a los constantes efectos contraproducentes que presentan. Esto puede ser observado específicamente gracias a la construcción de una obra civil en el área norte del sector MD. Allí, un complejo turístico

hace que en el sector inmediatamente situado al sur evidencie socavamientos (Figura 9.C).

A todo esto, se suma también la importancia de los procesos subaéreos sobre la acción marina. Autores como Correa et al., 2007; Sunamura, 2015 y Paniagua-Arroyave et al., in press. Comparten hipótesis de que incluso con la ausencia hipotética de la acción de las olas, los acantilados suaves continuarían erosionándose. En relación con esto, este estudio considera que en efecto el retroceso seguiría, pero presentaría disminuciones significativas.

4.3. *Tasas de retroceso pasadas y futuras*

Los primeros datos obtenidos de tasas de erosión en MD y PR fueron descritos por Correa y Vernet (2004), que presentan cifras del orden de -5 m/a en MD y -40 m/a en PR. Trabajos posteriores (e.g., Paniagua-Arroyave, 2013) presentan datos de retrocesos con valores promedios para MD del orden de -3,1 m/a y predicciones de futuros cambios en las distancias de la línea de costa del orden de -121,9 m para MD en 2059, y para PR de -350,1 m en 2054. Estudios más recientes (Paniagua-Arroyave et al., en prensa), presentan predicciones para el año 2060 con retrocesos promedios de 1.7 ± 0.4 m. Asumiendo que las tasas de retroceso históricas permanecen constantes, las distancias de retroceso serán de aproximadamente 85 ± 35 m para el 2060.

La figura 10 presenta la comparación de las líneas de costas históricas, actuales y futuras (proyectadas). Los datos del año 2017 con tasas del orden de -12,1 m/a y 9,3 sugieren que los modelos predictivos para el año 2060 se presentan imprecisos en

consideración con los nuevos datos registrados. Asumimos que el modelo predictivo cambiaría debido a la cercanía de la línea de costa actual con la proyectada.

Todos estos datos se respaldan por registros fotográficos en los cuales el impacto visual es evidente. La Figura 11. Presenta los cambios drásticos y las notorias afectaciones sociales. Esto sugiere que las consecuencias de las tasas de erosión continuarán afectando la región significativamente, las cuales muy probablemente aumentarán considerando los escenarios de ascenso del nivel del mar previstos (e.g., Nerem et al., 2018) a pesar de las obras de mitigación que implementen en la región.

Los impactos del retroceso de la línea de costa incluyen la pérdida de infraestructura urbana entre MD y PR, así como el desplazamiento forzado de los habitantes de la zona. Entre los impactos futuros se resalta la pérdida de ~3 km de longitud de la carretera Medellín-Montería (Figura 12). Las medidas de mitigación que se propongan requerirían de monitoreos multi-anales de la posición de la línea de costa que disminuyan el margen de incertidumbre de los cálculos de migración (Kennedy et al., 2017). El trabajo aquí desarrollado se considera una primera aproximación en ese sentido.

5. CONCLUSIONES

- Se actualizó la posición de la línea de costa entre Minuto de Dios (MD) y Puerto Rey (PR) entre los departamentos de Antioquia y Córdoba, en la parte sur de la costa Caribe colombiana. Gracias a los datos presentados en este estudio, se cuenta ahora con posiciones para los años 1938, 2009, 2014 y 2017.
- Se identificaron tres zonas: MD, PR sur y PR norte. La zona de PR norte evidenció mayor retroceso costero en comparación con MN y PR sur.
- De mantenerse las tasas de retroceso, la vía Arboletes-Montería y los centros poblados cercanos desaparecerán en escalas de tiempo relativamente cortas. Por esto, se considera prioritarias observaciones que incluyan el papel del cambio climático, el aumento del nivel del mar y el aporte relativo de procesos marinos y subaéreos en el retroceso de los acantilados, incluyendo la influencia de la morfología de la plataforma somera.
- Los espolones agudizaron la erosión en conjunción con los detonantes naturales, como era de esperarse. Según valores obtenidos, zonas que involucran acreciones y erosiones significativas se relacionan con estas estructuras. Los enrocados, por otro lado, no trasladan ni agudizan el retroceso.
- Más allá de los valores de *end point rate* (EPR), que sólo tienen en cuenta la costa más antigua y la más reciente, la inclusión de líneas de costa en años intermedios permite una primera aproximación a estudios de monitoreo de la migración. Este tipo de análisis permitirán el estudio de tendencias cíclicas y episódicas en la migración de acantilados blandos, sus depósitos de playa y plataforma somera asociados.

- Las predicciones de retroceso propuestas por otros autores para el año 2060 podrían alcanzarse en menos tiempo.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una pequeña contribución a los estudios realizados por Iván Darío Correa Arango a lo largo de toda su vida investigativa. Gracias profesor por inspirarme y transmitirme la magia y la pasión por el mar.

Agradezco a Juan Felipe Paniagua por todo el empeño que puso para ayudarme a cumplir esta meta. A mis padres, constantes motivadores y financiadores del proyecto. Al laboratorio de Geología de la universidad EAFIT (Jose, Ana, Wilton y Leidy) a Santiago Echeverry y Daniel Felipe Arroyave por su compañía en campo. A Sergio Andrés Pérez, Daniel Álvarez, Víctor Piedrahita, Juliana Mendoza y David Cuellar, por la ayuda y las recomendaciones.

A mi hermana, Alexandra y mis amigos, Esteban G., Luis Miguel O., Camila L., Daniel B., Sara G., Francisco B., Ana Ma. C y Santiago C. por ser fieles motivadores personales en la realización del manuscrito y de mi camino Universitario.

7. REFERENCIAS

- Boak, E.H., Turner, I.L., 2005. Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research* 21, 688–703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- Charlier, R. H., De Meyer, C. P. 1998. Coastal erosion: response and management (Vol. 70). Springer Science & Business Media.
- Corpouraba, 2014. Mosaico ortorrectificado entre Puerto Rey y Minuto de Dios. Registro Aéreo Digital.
- Correa, I.D., Vernet, G., 2004. Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo) Costa Caribe Colombiana. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 33, 5–26.
- Correa, I., Ríos, A., Gonzalez, D., Toro, M., Ojeda, G., Restrepo, I. 2007a. Erosión litoral entre Arboletes y Punta San Bernardo, Costa Caribe Colombiana. *Boletín de Geología*, 29(2).
- Correa, I. D., Acosta, S., Bedoya, G., 2007. Análisis de las causas y monitoreo de la erosión litoral en el departamento de Córdoba, Convenio de Transferencia Horizontal de Ciencia y Tecnología No. 30, Corporación Autónoma de los Valles del Sinú y San Jorge -CVS- y Universidad EAFIT.
- Correa, I. D., Acosta, S., Bedoya, G., 2007b. Análisis de las causas y monitoreo de la erosión litoral en el Departamento de Córdoba. Corporación Autónoma regional de los valles del Sinú y del San Jorge. Universidad EAFIT, Área Ciencias del Mar, 128.
- Correa, I.D., Morton, R.A., 2011. Coasts of Colombia. U.S. Department of the Interior, USGS, St. Petersburg, Florida. Available from: <http://coastal.er.usgs.gov/coastscolumbia/>.
- Correa, I.D., Paniagua-Arroyave, J. F., 2016. The Arboletes-Punta Rey Littoral, Southern Caribbean Coast. In: Hermelin M. (eds) *Landscapes and Landforms of Colombia*. World Geomorphological Landscapes. Springer, Cham
- Cowell P, Thom B., 1994. *Morphodynamics of coastal evolution*. Cambridge University Press, Cambridge, UK\NY
- Domínguez, C., Salcedo, H., Martín-Merás, L. (Eds.), 2012. *Derrotero y Cartografía de la Expedición Fidalgo por el Caribe Neogranadino (1792-1810)*. El Áncora Editores.

- 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, 1-29 p.
- Fletcher, C., Rooney, J., Barbee, M., Lim, S.-C., Richmond, B., 2003. Mapping Shoreline Change Using Digital Orthophotogrammetry on Maui, Hawaii. Journal of Coastal Research SI 38, 106–124.
- Genz, A.S., Fletcher, C.H., Dunn, R.A., Frazer, L.N., Rooney, J., 2007. The Predictive Accuracy of Shoreline Change Rate Methods and Alongshore Beach Variation on Maui, Hawaii. Journal of Coastal Research 23, 87–105.
- Himmelstoss EA, 2009. DSAS 4.0 Instrucciones de instalación y guía del usuario.
- Hoyos, N., Acosta, S., Correa, I.D., 2006. Sistema de información geográfica para el estudio de la erosión litoral en el Departamento de Córdoba. Gestión y Ambiente 9, 147–156.
- Kennedy, D. M., Coombes, M. A., & Mottershead, D. N. 2017. The temporal and spatial scales of rocky coast geomorphology: a commentary. Earth Surf. Process. Landforms, 42, 1597–1600.
- Limber, P. W., & Murray, A. B., 2011. Beach and sea-cliff dynamics as a driver of long-term rocky coastline evolution and stability in Geology; 39 (12): 1147–1150. doi: <https://doi.org/10.1130/G32315.1>
- Morton, R. A., Correa, I. D. 2004. Introducción al Uso de los Geoindicadores de Cambios Ambientales en Costas Húmedas Tropicales: Geología Norandina, Vol. 12, 1, pp 1-56.
- Moussaid, J., Fora, A.A, Zourarah, B., Maanan, M., Maanan, M. 2015. Using automatic computation to analyze the rate of shoreline change on the Kenitra coast, Morocco. Ocean Engineering 102, 71–77.
- Murray, A. B., Ashton, A. D. 2013. Instability and finite-amplitude self-organization of large-scale coastline shapes. Phil Trans R Soc.
- Paniagua-Arroyave, J. F., Correa, I. D., 2012. Predicción de las magnitudes de retroceso de algunos sectores acantilados de Antioquia en condiciones de ascenso del nivel del mar—Resultados para el sector de Arboletes. XX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Barranquilla, Colombia, agosto 8 al 10 de 2012.

- Paniagua-Arroyave, J. F., Correa, I. D., Anfuso, G., & Adams, P. N. In Press. Soft-cliff retreat in a tropical coast: the Minuto de Dios sector, Caribbean Coast of Colombia. *Journal of Coastal Research*, 81, 1-10.
- Passeri, D.L., Hagen, S.C., Medeiros, S.C., Bilskie, M.V., Alizad, K., Wang, D., 2015. The dynamic effects of sea level rise on low-gradient coastal landscapes: A review. *Earth's Future* 4, 159–181.
- Pranzini, E., Williams, A. T. (Eds.). 2013. *Coastal erosion and protection in Europe*. Routledge.
- Prüssmann-Urbe, J., 2012. *Nuevos Elementos para el Manejo Integrado de la Región de Urabá, Costa Caribe Colombiana, Base de Datos Espacial Geomorfológica de la Franja Litoral de los Departamentos Antioquia y Chocó (MSc Thesis in Earth Sciences)*. Universidad EAFIT.
- 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-Buitrago, N., Williams, A., & Anfuso, G. 2018. Killing the goose with the golden eggs: Litter effects on scenic quality of the Caribbean coast of Colombia. *Marine Pollution Bulletin*, 127, 22-38.
- Restrepo, I. 2006. *Rasgos Geomorfológicos de la Plataforma Continental Somera del Departamento de Córdoba. Tesis de Maestría en Ciencias de La Tierra, Departamento de Geología, Universidad EAFIT*, 68p.
- Papakonstantinou, A., Topouzelis, K., Pavlogeorgatos, G., 2016. Coastline Zones Identification and 3D Coastal Mapping Using UAV Spatial Data. *international journal of geo-information*. ISPRS 5(6), 75; doi:10.3390/ijgi5060075
- Sunamura, T. 2015. Rocky coast processes: with special reference. *Proceedings of the Japan Academy. Series B, Physical and Biological Sciences*, 91 (9), 481-500.
- Thieler, E.R., Danforth, W.W., 1994. Historical Shoreline Mapping (I): Improving Techniques and Reducing Positioning Errors. *Journal of Coastal Research*. Vol. 10, No. 3, pp. 549-563.

- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L. y Ergul, A., 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.
- Yao, Z., Xue, Z., He, R., Bao, X., Xie, J., Ge, Q., 2017. Climate Projections of Spatial Variations in Coastal Storm Surges Along the Gulf of Mexico and U.S. East Coast. Journal Ocean University of China 16, 1–7. <https://doi.org/10.1007/s11802-017-3>