



1962 - 2023

Evolución morfológica en la franja litoral al sur de Puerto Colombia, Atlántico, durante el siglo XX

Morphological evolution in the coastal strip south of the municipality of Puerto Colombia, Atlántico, during the 20th century

Autor

Michelle Esthefany Gonzalez Campillo

Asesor

Juan Felipe Paniagua Arroyave

Proyecto de grado presentado para optar al título de Geóloga

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
PREGRADO DE GEOLOGIA
MEDELLÍN
2023

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	1
Abstract	1
1. Introducción	2
2. Dinámica costera y procesos erosivos: Factores y evolución en el siglo XX.....	4
2.1 Morfología y transporte de sedimentos	4
2.2 Actividades antrópicas.....	12
3. Perspectiva siglo XXI	16
4. Conclusiones	18
5. Bibliografía	20

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Cambios en el litoral del municipio de Puerto Colombia entre 1947 a 1987. Extraído y modificado de Martínez et al. (1990).	8
Figura 2. Comportamiento de la línea de costa entre los años 1935 a 1996. Extraído y modificado de Molina et al. (2001).	9
Figura 3. Evolución de la línea de costa entre los años 1930 hasta 2015, ilustrando los procesos de erosión y acumulación a lo largo del tramo litoral entre Salgar y Puerto Velero. Tomado de Sánchez-Moreno et al. (2019).	11
Figura 4. (a) Islas barreras formadas por la alta sedimentación de la desembocadura del Río Magdalena a principios del siglo XX, (b) construcción de los Tajamares de Boca de Ceniza, (c) Evolución de la línea de costa desde el año 1947 a 2004. Extraído y modificado de Abarca et al. (2020)	13
Figura 5. Evolución del bosque manglar y principales causas de los impactos naturales y antrópicos en distintos periodos. Extraído y modificado de Abarca et al. (2020).....	14
Figura 6. Medidas de control y mitigación contra la erosión costera. Extraído y modificado de Blanco y Rodríguez (2020).	18

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de causas antrópicas y sus efectos asociados. Extraído y modificado de Bolívar et al. (2019).	15
---	----

Resumen

En Colombia, el incremento de los procesos erosivos representa una amenaza para la infraestructura y el paisaje costero. Muchas de las soluciones implementadas para combatir la erosión costera tuvieron un impacto negativo en los ecosistemas y las comunidades locales. En Puerto Colombia, la construcción de los tajamares en Boca de Ceniza alteró la dinámica costera al obstruir el flujo de sedimentos del Río Magdalena. Esta obstrucción resultó en un déficit de sedimentos en las playas cercanas y cambió las condiciones oceanográficas en la celda litoral. La modificación en la dinámica costera ocasionó la migración de la barrera de arena conocida como Isla Verde hacia la franja litoral de Puerto Colombia. Este cambio condujo a la formación de pequeñas lagunas que con el tiempo evolucionaron hacia zonas de manglar, dando lugar a la Ciénaga de Balboa. Este humedal, ubicado en el sur del municipio se alimenta de afluentes que están siendo contaminados, como el Arroyo Grande, el cual atraviesa Puerto Colombia y recoge aguas residuales de la laguna de oxidación. Debido al cambio en la dinámica costera causado por el tajamar occidental de Bocas de Cenizas los sedimentos migraron hacia el suroeste, depositándose en la espiga de Puerto Velero en Tubará. Este fenómeno, combinado con las condiciones océano-atmosféricas han incrementado la frecuencia de eventos extremos, exponiendo la franja litoral a una mayor erosión. Por lo tanto, la elaboración de un plan de gestión y planificación de riesgo en desastres es esencial para garantizar la protección y sostenibilidad de las zonas costeras, especialmente de este humedal que es vital para la biodiversidad. Este plan debe tener en cuenta los factores naturales y antrópicos que contribuyen a la erosión costera, e incorporar medidas de mitigación y adaptación al cambio climático.

Palabras claves:

Línea de costa, transporte de sedimentos, actividad humana, clima marítimo y gestión costera.

Abstract

In Colombia, the increased in erosion processes poses a threat to both infrastructure and coastal landscape. Many of the solutions implemented to combat coastal erosion had a negative impact on ecosystems and local communities. In Puerto Colombia, the construction of the jetties in Boca de Ceniza altered coastal dynamics by obstructing the flow of sediment from the Magdalena River. This obstruction resulted in a sediment deficit on nearby beaches and changed the oceanographic conditions in the littoral cell. The modification in coastal dynamics caused the migration of the

sand barrier known as Isla Verde towards the coastal strip of Puerto Colombia. This change led to the formation of small lagoons that eventually evolved into mangrove zones, giving rise to the Balboa's swamp. This wetland, located in the south of the municipality, is fed by tributaries that are being contaminated, such as the Arroyo Grande, which crosses Puerto Colombia and collects wastewater from the oxidation lagoon. Due to the change in coastal dynamics caused by the western seawall of Bocas de Cenizas, sediments migrated to the southwest, depositing in the Puerto Velero spike in Tubará. This phenomenon, combined with ocean-atmospheric conditions, has increased the frequency of extreme events, exposing the coastal strip to greater erosion. Therefore, the development of a disaster risk management plan is essential to ensure the protection and sustainability of coastal areas, especially this wetland, which is vital for biodiversity. This plan should take into account the natural and anthropogenic factors that contributing to coastal erosion and adaptation measures to climate change.

Keywords:

Coastline, sediment transport, human activity, maritime climate, coastal management.

1. Introducción

La franja costera es un sistema dinámico complejo que está influenciado por una variedad de factores atmosféricos, terrestres y oceánicos. Estos procesos interactúan de forma interdependiente para dar forma a la morfología costera (Masselink et al., 2014). La evolución litoral está controlada por la respuesta de la acción de las olas, corrientes marinas, topografía submarina, formaciones rocosas que emergen en la región costera, la actividad humana como la construcción de puertos y extracción de arena, entre otros factores (Molina et al., 1999). Como consecuencia de esta dinámica, se encuentran una serie de características geomorfológicas como espigas, barras de arena, tómbolos y playas, las cuales nos indican sobre los procesos de erosión y acreción costera (Mendivelso et al., 2010). Los patrones de la morfodinámica litoral pueden ser causados por variaciones naturales como la erosión y la acreción costera, el aumento del nivel relativo del mar, altura y dirección de las olas, y la tasa de sedimentación de la deriva litoral que depende de la energía del oleaje, concurrente a la costa (Giraldo & Lonin, 1997).

A lo largo de la historia, las zonas costeras han sido los núcleos de establecimiento humano y de actividad comercial, impulsando el desarrollo de grandes ciudades costeras a nivel global (Franzen et al., 2011). Estas actividades antropogénicas, como la construcción de infraestructuras portuarias,

alteran el efecto de las condiciones oceanográficas en las celdas litorales, ocasionando un desequilibrio en el ambiente costero, lo cual puede verse observado en procesos de erosión/acreción de gran magnitud (Ferrucho al., 2022). Por ende, se han llevado a cabo numerosos estudios para analizar esta dinámica. Un ejemplo de esto es el estudio realizado por Méndez et al. (2004) en las costas españolas. En dicha investigación, se abordó la evolución de la dinámica costera a lo largo del siglo XX, analizando los factores globales y locales que han afectado la línea de costa. Así mismo, Hsu et al. (2007) analizaron el impacto de las actividades humanas en la franja litoral de Taiwán, concluyendo que estas han contribuido de manera significativa a la erosión costera. Ellos observaron un aumento considerable en los procesos erosivos durante los últimos 30 años.

En el transcurso del último siglo, se ha evidenciado un aumento en los procesos erosivos en Colombia, lo que representa una amenaza tanto para las infraestructuras como para el entorno paisajístico (Ferrucho et al., 2022). Esto ha motivado la realización de estudios sobre los principales factores que afectan la línea de costa. Una de estas investigaciones fue llevada a cabo por Gaona-Currea (2014), en el cual se identificó que la construcción de infraestructuras costeras, la extracción de arena, el cambio climático y el desarrollo turístico insostenible contribuyen a la erosión costera en el Golfo de Morrosquillo. Cabe destacar que esta región está ubicada en una zona de subsidencia (Page,1982). Otro ejemplo de esto es el estudio realizado por Molina et al. (1999), donde investigaron las características geológicas y morfodinámicas de la franja litoral en el Caribe Colombiano.

Puerto Colombia, ubicado en el departamento del Atlántico al norte de Colombia, ha experimentado cambios significativos en su línea de costa a lo largo del tiempo. La estabilidad de la zona dependía en gran medida de los aportes del Río Magdalena, no obstante, las actividades antropogénicas como la construcción del muelle de Puerto Colombia, la instalación de varios espolones en la zona norte, junto con la canalización de los ríos y el aumento en la población, han provocado una pérdida de sedimentos en la zona sur del municipio (Sánchez-Moreno et al., 2019). En este contexto, Bolívar et al. (2019) llevaron a cabo un análisis de la evolución histórica de la franja litoral en el noreste de Puerto Colombia, centrándose en los impactos de las actividades humanas. Asimismo, Sánchez-Moreno et al. (2019) realizaron una investigación sobre los efectos de las actividades antropogénicas en los manglares, analizando la evolución del litoral sur que incluye la Ciénaga de Balboa, abarcando el periodo desde 1935 hasta el 2015.

Sin embargo, el alcance de dichos trabajos se encuentra localizados en la zona norte del municipio y no han sido exhaustivos en la identificación de los factores antrópicos que controlan la erosión morfológica en el sur de la franja litoral de Puerto Colombia ni como estos procesos han modificado el paisaje que observamos en el siglo XXI. Núñez (2017) subraya la importancia de enfocarse en los estudios de la evolución del relieve, los cuales no solo buscan comprender los factores y los procesos que influyen en esta dinámica, sino también para identificar posibles amenazas y riesgos a los que podrían estar expuestas las comunidades circundantes.

En ese sentido, el propósito de este estudio es recopilar la información más relevante sobre los resultados de las diferentes investigaciones acerca de I) Los procesos erosivos que han impactado la franja litoral al sur del municipio de Puerto Colombia. II) Los factores clave y cambios significativos en la evolución morfológica de la línea de costa al sur del municipio a lo largo del siglo XX. III) Estrategias y propuestas de gestión costera para mitigar la erosión y promover la conservación del bosque manglar en el sur del municipio.

2. Dinámica costera y procesos erosivos: Factores y evolución en el siglo XX.

Los ecosistemas costeros se ven afectados por procesos naturales tales como el aumento del nivel del mar y los procesos de acreción y erosión de la costa. También por fenómenos meteorológicos como los huracanes que provocan la pérdida de los sistemas ecológicos (Bolívar et al., 2019). Puerto Colombia, fue clasificada como costas bajas altamente erosivas, según Molina et al. (1999). Esta categorización se debe a la baja resistencia de los materiales presentes en la franja litoral, así como a la considerable intervención humana mediante la construcción de infraestructuras, lo que han dado lugar a la ocurrencia de procesos de pérdida de material y erosión costera en el litoral (Vargas, 2012). Al analizar la información recopilada, se pueden identificar dos procesos generales que controlaron la evolución morfológica en el sur del municipio de Puerto Colombia durante el siglo XX: 1) las dinámicas fuente-sumidero de la celda litoral definida por los ríos, y 2) la plataforma continental y la infraestructura costera asociada a las actividades antrópicas.

2.1 Morfología y transporte de sedimentos

A escala global, las áreas costeras están experimentando una serie de cambios geomorfológicos debido a factores climáticos globales como el aumento del nivel medio global del mar y los efectos de los eventos extremos más significativos, y a factores regionales como la disminución del transporte de sedimentos y la variación de la energía de las olas que inciden en la zona. Es

importante destacar que el aumento del nivel medio del mar ejerce una presión significativa, provocando una reconfiguración generalizada en la dinámica costera de áreas extensas. Por otro lado, la disminución en el suministro de sedimentos afecta el equilibrio entre los procesos erosivos y deposicionales que inciden directamente en la geomorfología, y la energía de las olas desempeñan un papel importante en la dirección de la deriva litoral y en la formación de los rasgos topográficos de un sitio de manera evolutiva (García, 2021).

A escala regional, la zona litoral del departamento del Atlántico se considera un ambiente tropical semiárido con temperaturas medias de 29°C y que cuenta con valores de precipitación de 2.500 mm/año (García, 2021). El litoral caribeño tiene un clima tropical húmedo (Sánchez-Moreno et al., 2019), influenciado por las fluctuaciones de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que a su vez está condicionada por los vientos alisios del noreste (Inger et al., 2015). Además, experimenta varios fenómenos macro climáticos como el evento El Niño/Oscilación Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) que provoca cambios en el sistema océano-atmósfera en el océano Pacífico Tropical, siendo un factor importante debido a su capacidad de modificar la costa (Oderiz et al., 2020).

La temperatura media anual de Puerto Colombia varía entre 25 y 33 °C, con una precipitación anual que oscila entre 684 y 730 mm/año (Rangel-Ch y Carvajal, 2012). En otro estudio, Bolívar et al. (2019) indican que la precipitación anual varía entre los 700 y 1.030 mm/año en la zona de estudio. Estos autores afirman que la mayor concentración de temporadas de lluvia se da en los meses de septiembre y octubre, y que se pueden registrar periodos de sequía con precipitaciones de menos de 100 mm/año.

En este litoral, interactúan dos corrientes de chorros superficiales opuestas en dirección. Por un lado, tenemos el chorro superficial de San Andrés, directamente influenciado por los alisios de noreste. Por otro lado, está el chorro superficial del Chocó, que está asociado directamente a los vientos alisios del sureste sobre el océano Pacífico oriental (Bernal et al., 2006).

El ciclo anual del oleaje presenta un comportamiento bimodal asociado con los vientos alisios del noreste, presentando dos periodos de oleaje y vientos fuertes desde los meses de diciembre-marzo y julio-septiembre. Por otro lado, hay dos periodos de oleaje y vientos débiles correspondientes a los meses de abril-mayo y octubre-noviembre (Anaya, 2022). Según Bernal et al. (2006), las dominancias de las dos direcciones de los vientos alisios y de los chorros están vinculadas con los desplazamientos de la ZCIT. Durante el periodo de diciembre a marzo, la ZCIT se encuentra

ubicada en Sudamérica, lo que da a lugar a la formación de centros de alta presión en el Caribe, generando vientos alisios fuertes en dirección noreste. Esto coincide con la época de sequía en el Caribe. Por otro lado, de julio a septiembre, la ubicación de la ZCIT cambia hacia el centro del Caribe, lo que resulta en una disminución de la intensidad de los vientos alisios, y prevalecen los vientos hacia el suroeste que, aunque son más débiles, pueden traer consigo ráfagas fuertes de vientos a la región del Caribe.

Por otro lado, Otero et al. (2016) atribuyen estos cambios en la dirección de los vientos a la intensidad de los chorros superficiales. Según estos autores, entre los meses de diciembre a mayo, se encuentra la estación seca en la región y se generan oleajes debido a los frentes fríos provocados por la intensificación de la corriente en el chorro de San Andrés, lo que coincide con los vientos alisios del noreste. Por otro lado, las estaciones lluviosas que comprenden de agosto a noviembre coinciden con el periodo en que los vientos de la corriente del chorro del Chocó son más fuertes que los de San Andrés, con excepción de los meses de junio y julio, conocidos como el “veranillo”. Dado que el viento influye en los factores oceanográficos que controlan la franja litoral a escala local, los cambios morfológicos estacionales se encuentran sujetos a dichos factores. Durante los periodos secos, se caracterizan por una alta energía del oleaje temporal, mientras que, en los periodos húmedos, la energía del oleaje es baja (Molina et al., 2001). En cuanto a las mareas en el área de estudio, son de tipo mixto semidiurno, con un rango micro mareal menor a 2 metros y variaciones que pueden oscilar entre los 20 y los 50 cm (Sánchez-Moreno et al., 2019).

La dinámica costera en la franja litoral de Puerto Colombia se encuentra controlada principalmente por la alta sedimentación que es generada por el delta del Río Magdalena de forma conjunta con las corrientes costeras provenientes del noreste. Estas corrientes inciden en el transporte de las barras de arena hacia el suroeste (Vargas, 2012).

Según Rangel-Buitrago et al. (2015), las altas tasas de erosión en el área de estudio están directamente vinculadas a la notable sensibilidad de la región a la influencia de los fenómenos climáticos como huracanes y frentes fríos. Aunque el departamento del Atlántico no se encuentra en una zona de alto riesgo para huracanes, su costa ha experimentado eventos relacionados con patrones cíclicos, como tormentas tropicales y ciclones, además de estar bajo la influencia de frentes fríos. Este fenómeno conlleva efectos secundarios en la costa, como el incremento de la velocidad de los vientos y la generación de oleajes más intensos (García, 2021).

Para comprender la dinámica costera en el área de estudio, es esencial tener conocimiento de los eventos más importantes que tuvieron lugar en el siglo XX. Martínez et al. (1990) llevaron a cabo un estudio con el fin de describir los cuerpos de arena que se depositaron después de la construcción de los tajamares de Bocas de Ceniza en el Río Magdalena en 1935. Según su investigación, entre 1937 y 1947 tuvo lugar la migración de una barra de arena que funcionaba como una especie de rompeolas natural, que protegía el litoral de la erosión. Las orillas costeras de esta geoforma se extendían desde Punta Sabanilla hasta Puerto Colombia. Isla verde, como se le conocía, era un brazo peninsular que estaba sujeto a las corrientes marinas continuas que depositaban grandes cantidades de sedimentos del Río Magdalena (Núñez, 2004). Para 1930, Isla Verde tenía una longitud de más de 10 kilómetros (Sánchez-Moreno et al., 2019). La migración de esta barrera, según Martínez et al. (1990), ocurrió entre 1948 y 1953, posiblemente como resultado de varias tormentas que inundaron el estrecho. Sin embargo, Molina et al. (2001) sostienen que la migración hacia el suroeste se dio entre 1935 y 1947, debido a la presencia del tajamar occidental de Bocas de Ceniza. Según Núñez (2004), en 1954, como resultado de diferentes tasas de velocidad de la migración, se formó un pequeño sistema de islas barrera interconectadas por una serie de bancos y canales de arena. Estas islas comenzaron a desempeñar un papel fundamental en la protección contra la fuerza de las olas a lo largo del litoral y contribuyeron significativamente a la estabilidad del puerto marítimo de Puerto Colombia. Entre estas islas se encontraban Isla Verde, Isla Sabanilla, Punta Belillo, Isla del Medio e Isla Carpintero. Aunque según Martínez et al. (1990) este sistema de islas estaba conformado por Isla Verde, Isla Sabanilla, Isla del Medio e Isla Arena. Para 1959, Isla Verde migró hacia el muelle de carga, impidiendo su funcionamiento y, como resultado, la función de Puerto Colombia como terminal portuaria cesó.

Una vez estas islas de barrera se unieron al continente (Martínez et al., 1990), se formaron pequeñas lagunas costeras que con el tiempo se conectaron, dando lugar a áreas de manglar de corta extensión. Estas se desarrollaron y se expandieron en los años posteriores (Abarca et al., 2020). En 1981, el bosque manglar ubicado al sur del municipio se encontraba protegido por una barra de arena, especialmente sus áreas centro y sur. En ese momento, el manglar se encontraba en buenas condiciones y cubría una vasta superficie de aproximadamente 86 km² (Sánchez-Moreno et al., 2019). Para 1986, este cuerpo de arena ya había desaparecido por completo (Molina et al., 2001). Ya que el cambio en la prolongación de la desembocadura del Río Magdalena favoreció este proceso (Núñez, 2004).

Para el noreste del municipio de Puerto Colombia, Molina et al. (2001) calcularon un retroceso costero de 345 m de la línea de costa para el intervalo de años de 1986-1996, estimando una tasa de erosión de 34 m/año. Esto da a entender que hubo cambios en el sistema fuente-sumidero, ya que antes de la intervención humana y el cambio en la dinámica fluvial del Río Magdalena, las islas barreras eran los sumideros de los sedimentos de esta fuente. Sin embargo, cuando estas comenzaron a migrar, el sumidero de estos sedimentos se desplazó a la franja litoral de Puerto Colombia. Finalmente, debido a la reconfiguración de la costa, los vientos y el oleaje, se depositaron sedimentos en el sumidero actual, la espiga de Puerto Velero, al suroeste del municipio de Tubará.

Esta geofoma, según Molina et al. (2001) se localiza a 1.337 metros al sur del municipio de Puerto Colombia. Su crecimiento lateral ha sido de aproximadamente 5 kilómetros desde 1973 hasta la actualidad (Galvis, 2021). Gracias a sus extensas playas, se ha convertido en un gran atractivo turismo.

En la **Figura 1** se puede observar la rápida migración del banco de arena conocido como Isla Verde y otras islas barreras menores desde 1947 hasta 1987, en dirección hacia la franja litoral. Esto ocasionó la migración de los sedimentos hacia el suroeste.

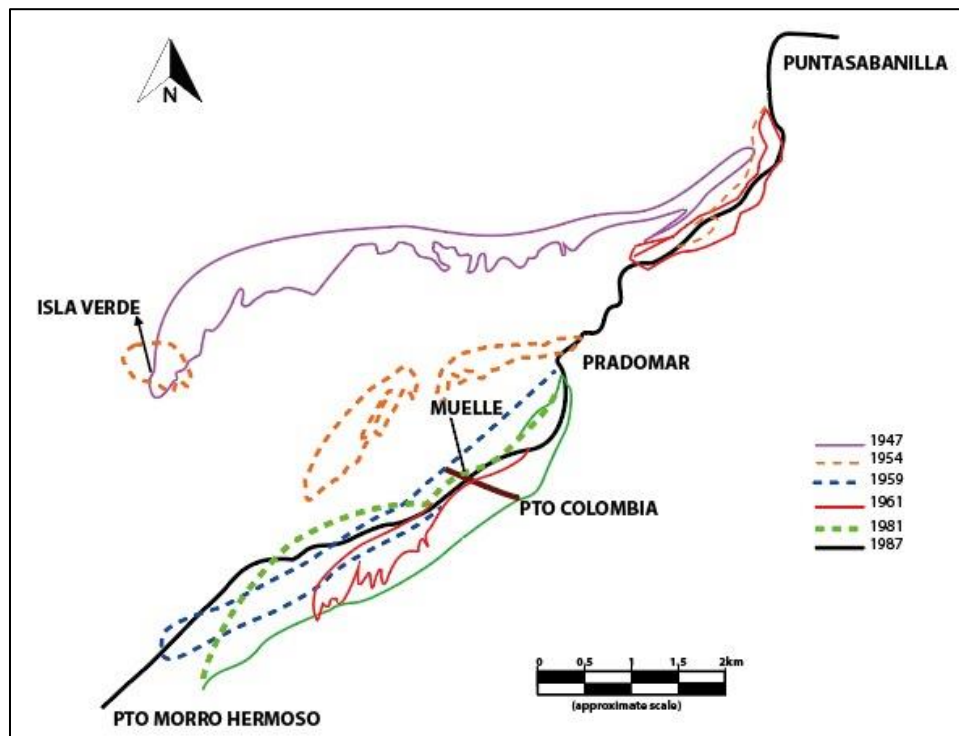


Figura 1. Cambios en el litoral del municipio de Puerto Colombia entre 1947 a 1987. Extraído y modificado de Martínez et al. (1990).

En la **Figura 2** se ilustra el comportamiento de la línea de costa desde los años 1935 hasta el año 1996. Esta comparación permite observar los distintos tiempos de migración de Isla Verde, así como analizar la evolución de la franja sur del municipio en relación con los diferentes procesos de acumulación y erosión a lo largo del siglo XX. Además, estos autores destacan la morfología submarina, ya que la zona de estudio se caracteriza por ser poco profunda, lo que facilita la dispersión de la energía del oleaje y favorece la acumulación de sedimentos.

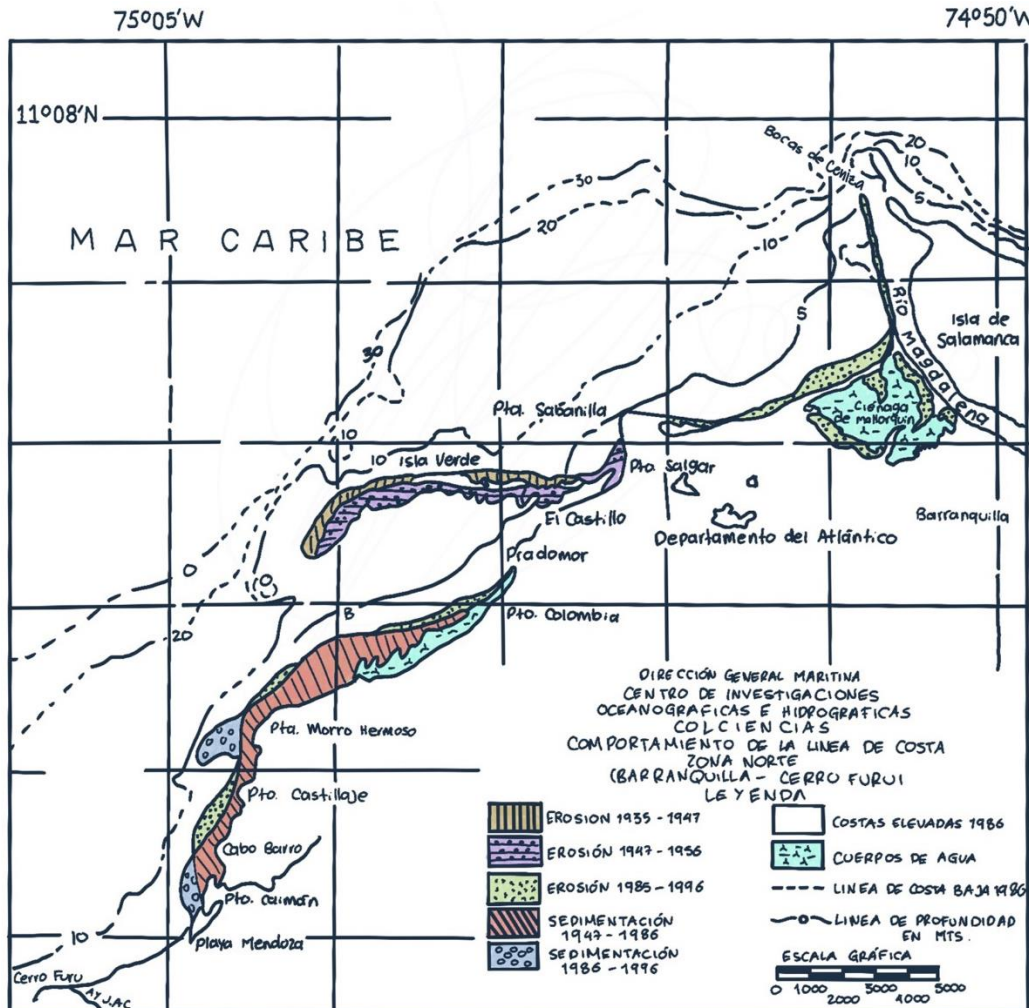


Figura 2. Comportamiento de la línea de costa entre los años 1935 a 1996. Extraído y modificado de Molina et al. (2001).

El clima marítimo es un fenómeno que puede presentar variaciones en periodos a corto, estacional y largo plazo (García, 2021). Dado que el viento es el principal factor que origina las olas, los cambios en el oleaje se ven determinados por este fenómeno (Otero et al., 2016).

Según Molina-Flórez (2014) la deriva litoral, como transporte de sedimentos a lo largo de la línea costera, es el proceso con mayor relevancia en el control de la evolución morfológica en la franja

litoral. Su importancia radica en su papel fundamental para determinar si la costa está experimentando retroceso, progradación o estabilidad. Este proceso complejo está condicionado por la interacción de diversos factores, entre los cuales se incluyen la dirección, velocidad de transporte, propiedades y disponibilidad del sedimento.

Para entender completamente la dinámica de la deriva litoral, es esencial considerar los gradientes espaciales que influyen en su comportamiento a lo largo de diferentes segmentos de la línea de costa. Estos gradientes espaciales incluyen elementos como la topografía submarina, las formaciones rocosas en la región costera y las condiciones climáticas locales, entre otros. Además, la deriva litoral se ve significativamente influenciada por la configuración de la dinámica costera, incluyendo factores como los niveles de marea y la pendiente litoral, como señalan Giraldo y Lonin (1997).

La dinámica del transporte de sedimentos está sujeta a las variaciones en el patrón del oleaje y su impacto en la geometría de la costa. Estos cambios pueden modificar la oblicuidad de las olas cerca de la línea de costa y el flujo de energía a lo largo de la misma. Este fenómeno es uno de los factores que puede afectar a la dirección y magnitud del transporte y acumulación de sedimentos (Ribó et al., 2020). La energía que impulsa los procesos costeros y dan forma a la distribución de sedimentos proviene principalmente de las olas (García, 2021).

Según Rangel-Buitrago et al. (2017), de noviembre a julio, las olas de tormenta o mareas meteorológicas prevalecen en dirección noreste. Este periodo se considera de alta energía, con alturas de las olas pueden alcanzar más de 2 metros, lo que las convierten en un riesgo para la comunidad cercana. Los meses de agosto a octubre, corresponden a periodos de baja energía y se pueden presentar olas provenientes del noroeste y suroeste, teniendo alturas inferiores a 1.5m (Rangel-Buitrago et al., 2015). Es importante considerar el comportamiento del viento y el oleaje durante los diferentes meses del año, ya que estos determinan las condiciones de flujo medio de la energía que controla la deriva litoral y, por ende, los procesos como la erosión o acumulación de sedimentos durante todo el año (García, 2021)

En el área de estudio, Molina et al. (1999) categorizaron la franja litoral de Puerto Colombia como costas bajas altamente erosivas, debido a que la deriva litoral se ve fuertemente influenciada durante las épocas de vientos alisios fuertes del noreste. En cuanto al transporte de sedimentos muestra una componente predominante en dirección suroeste; sin embargo, durante los periodos de lluvias, cuando los vientos del sur pueden prevalecer, se pueden presentar pequeñas inversiones

hacia el noreste (Rangel-Buitrago et al., 2017). Esto es resultado de las variaciones estacionales en los vientos y las olas, los cuales, son influenciados por la configuración de la costa y su batimetría. A pesar de que la topografía submarina es relativamente suave, lo que disminuye la energía del oleaje, se han registrado niveles significativos de erosión en la barra de arena que protege la Ciénaga de Balboa. Esto se debe al déficit sedimentario causado por la presencia del tajamar occidental de Bocas de Ceniza (Molina et al. ,1999)

Bolívar et al. (2019) llegaron a la misma conclusión. Para estos autores, la erosión crítica observada desde finales del siglo XX hasta la actualidad en el sur de Puerto Colombia se debe a la escasez de sedimentos, provocada por la interrupción de su transporte debido a las estructuras ubicadas en la desembocadura del Río Magdalena. Esto provocó un cambio en la dinámica fuente - sumidero y las condiciones oceanográficas permitieron la migración de estos sedimentos hasta su depósito actual en Puerto Velero, Atlántico.

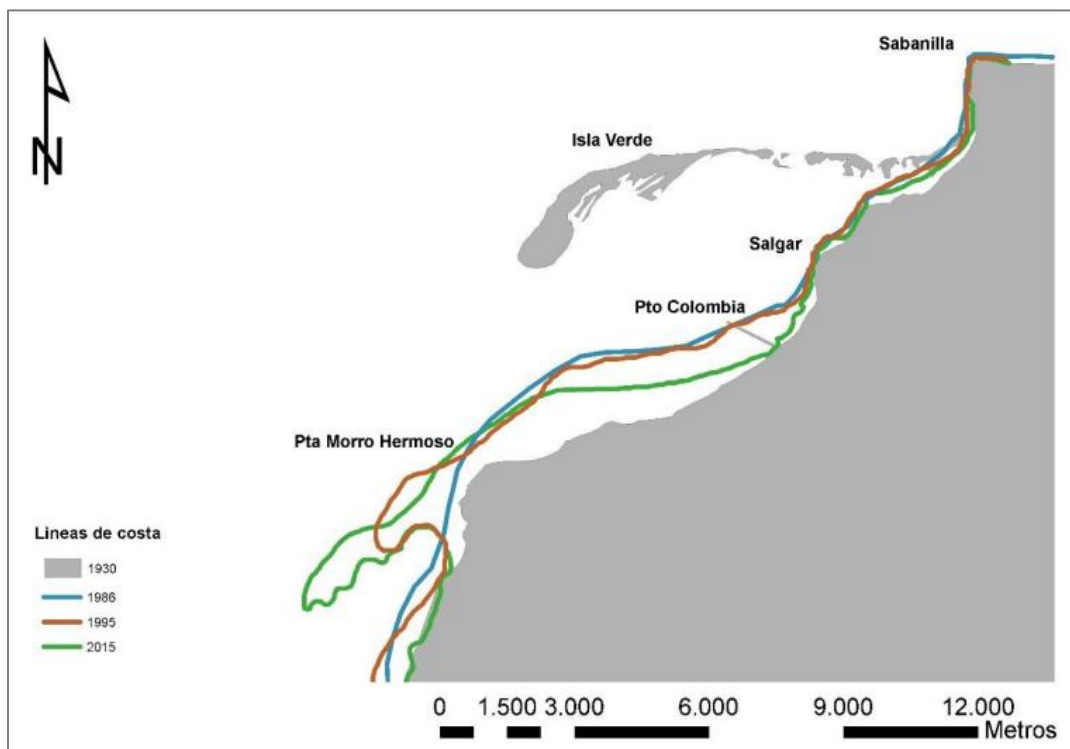


Figura 3. Evolución de la línea de costa entre los años 1930 hasta 2015, ilustrando los procesos de erosión y acumulación a lo largo del tramo litoral entre Salgar y Puerto Velero. Tomado de Sánchez-Moreno et al. (2019).

2.2 Actividades antrópicas

El diseño de la infraestructura de protección costera debe considerar tres aspectos importantes: 1) Los efectos morfológicos que generarán las construcciones de las obras a implementar, 2) los aspectos ambientales, y 3) el diseño final de la obra de protección (Giraldo & Lonin, 1997). En Colombia, muchas de las soluciones para la erosión costera, fueron mal diseñadas y construidas apresuradamente, afectando negativamente los ecosistemas (Rangel-Buitrago et al., 2018).

Los principales factores de estrés que se identificaron en el área de estudio, que impactaron la evolución de la franja costera según Sánchez-Moreno et al. (2019) fueron: 1) la alteración de los cauces de río debido a la disminución de aporte de agua dulce por la canalización en los arroyos en la zona norte y central; 2) el aumento de la erosión costera que afectó el área, provocado por la construcción de los tajamares de Bocas de Ceniza; 3) la laguna de oxidación de aguas residuales y, 4) el emplazamiento de varios espolones en el norte del municipio.

El muelle de Puerto Colombia, construido en 1888, representó el primer puerto comercial en Colombia, destinado principalmente a la exportación de tabaco y café (Posada- Carbó, 1997). Hoy en día, es considerado patrimonio nacional, en la categoría bienes de interés cultural (BIC), ya que en su época fue el segundo muelle más largo del mundo, con 4000 pies de longitud (Cubillos, 2017).

Durante el gobierno conservador de Carlos Eugenio Restrepo en 1914, se firmó un contrato con la Casa Julius Berger de Berlín para llevar a cabo estudios relacionados con el canal de navegación en Barranquilla y la defensa de Puerto Colombia. Según el informe de Julius Berger, el país atravesaba una época de sequía, con escasas lluvias y un aumento en los vientos alisios del noreste, lo que resultó en una disminución de la carga de sedimentos del río Magdalena hacia su zona deltaica (Núñez, 2004). Como parte de los esfuerzos para llevar a cabo la apertura de Bocas de Ceniza, en 1923 se recomendó la construcción de tajamares a ambos lados de la desembocadura de su cauce. A mediados de 1925, las firmas Ulen y Cía iniciaron las obras para el encauzamiento del río (Núñez, 2004). En 1935 se completó la construcción de la infraestructura, lo que empezó a provocar un retroceso de la línea de costa a altas velocidades, generando un cambio significativo de los cuerpos de arena hacia el suroeste (Martínez et al., 1990).

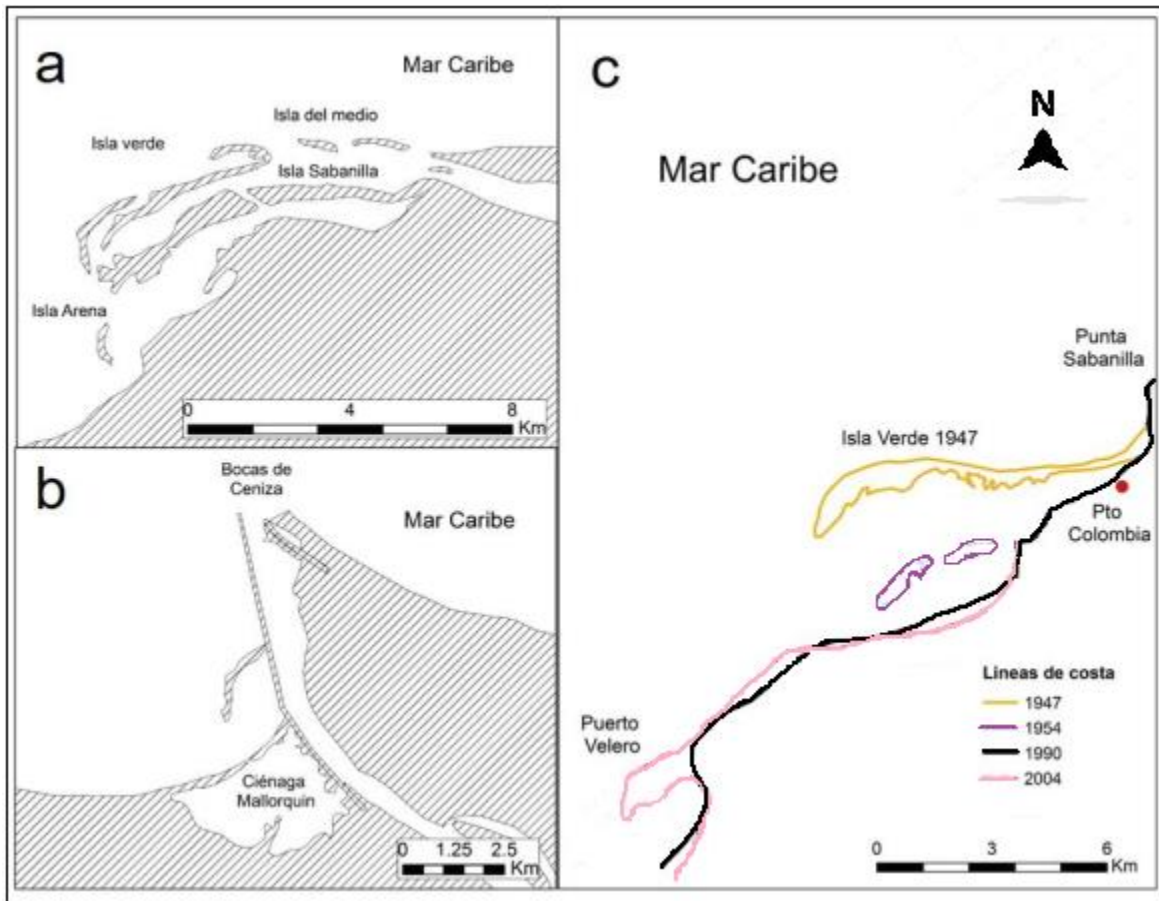


Figura 4. (a) Islas barreras formadas por la alta sedimentación de la desembocadura del Río Magdalena a principios del siglo XX, (b) construcción de los Tajameres de Boca de Ceniza, (c) Evolución de la línea de costa desde el año 1947 a 2004. Extraído y modificado de Abarca et al. (2020)

Desde entonces, Puerto Colombia ha experimentado importantes cambios en su morfología, especialmente en cuanto a la morfodinámica. Varios autores señalan que estos cambios fueron desencadenados por la construcción del canal de navegación de Tajameres en Bocas de Ceniza, en la desembocadura del río Magdalena. Este evento provocó la migración de la antigua barra de arena conocida como Isla Verde hacia el continente (Bolívar et al., 2019). Según Núñez (2004) la desaparición total de la isla fue acelerada por perforaciones petroleras realizadas en los años 1947-1948.

A raíz de la migración de Isla Verde, los sedimentos depositados en la franja litoral dieron origen a pequeñas lagunas costeras que con el tiempo expandieron sus áreas de manglar (Abarca, 2020).

En 1998, se puso en funcionamiento una laguna de oxidación diseñada para tratar las aguas residuales de un número limitado de habitantes. Esta se encuentra ubicada a 1.6 kilómetros al sureste del muelle portuario de Puerto Colombia (Sánchez-Moreno et al., 2019). y debido al

crecimiento poblacional, su capacidad fue sobrepasada, por lo que ahora estas aguas llegan al mar sin ser tratadas completamente (Patiño et al., 2021).

Las aguas residuales que provienen de la laguna de oxidación desembocan en el Arroyo Grande, que nace en las montañas del municipio. En su curso inicial, este arroyo recoge agua de pequeños afluentes formados por lluvias y manantiales provenientes de estos cerros, así como de municipios cercanos como Tubará (Cubillos, 2017). Este canal recibe diversos vertimientos de aguas domésticas y, al ser de cielo abierto, actualmente contiene restos de plástico y desechos arrojados por la comunidad. Finalmente, desemboca en la Ciénaga de Balboa y luego llega al mar Caribe (Sánchez-Moreno et al., 2019).

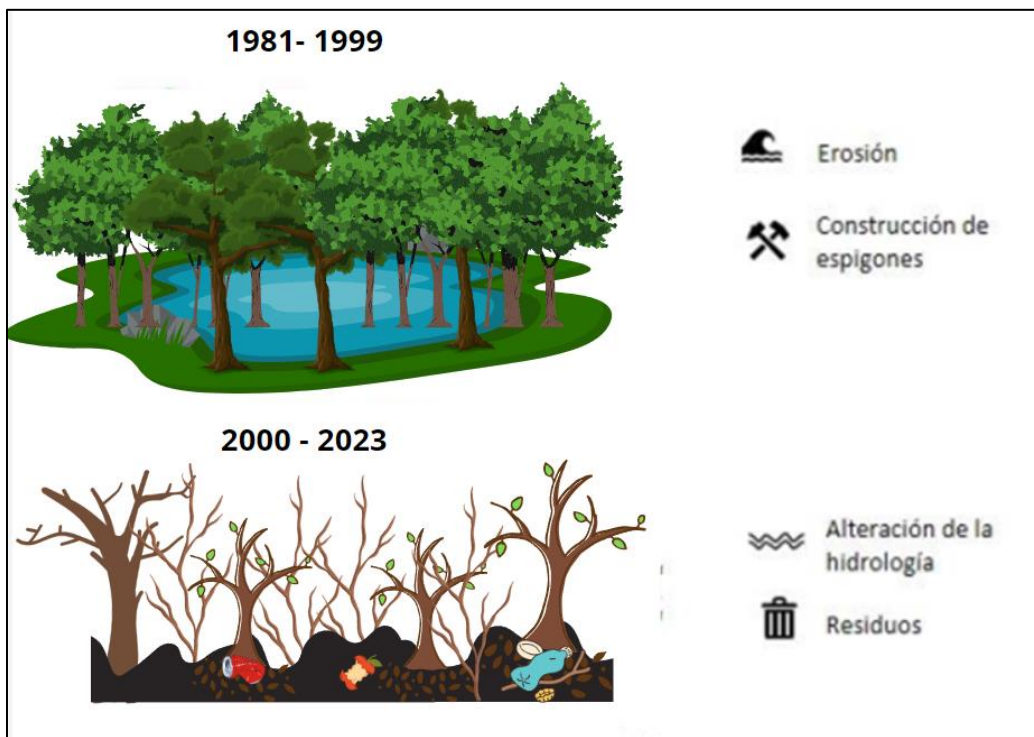


Figura 5. Evolución del bosque manglar y principales causas de los impactos naturales y antrópicos en distintos periodos. Extraído y modificado de Abarca et al. (2020)

La protección de la línea de costa puede provocar alteraciones negativas en la configuración costera, la hidrodinámica local y regional, así como en la morfología de las playas y los ecosistemas costeros (Bolívar et al., 2019). En este sentido, Sánchez-Moreno et al. (2019) en su estudio, analizaron el impacto antropológico en el humedal, el cual reveló que el exceso de infraestructura portuaria, presencia de poblaciones humanas y una pérdida en el equilibrio dinámico provocó la pérdida parcial del ecosistema.

A principios del siglo XXI, con el objetivo de proteger el muelle de Puerto Colombia, se construyeron una serie de espolones en la zona norte del municipio con longitudes que van de 70 a 250 metros (Sánchez-Moreno et al., 2019). Estos espolones favorecieron la acumulación de sedimentos en la zona norte, pero provocaron una fuerte erosión aguas abajo (Rangel-Buitrago et al., 2018).

En la **Tabla 1** se resumen los efectos y causas de los problemas de erosión costera asociadas a actividades humanas en Puerto Colombia, Atlántico.

Tabla 1. Resumen de causas antrópicas y sus efectos asociados. Extraído y modificado de Bolívar et al. (2019).

PROBLEMAS COSTEROS EN PUERTO COLOMBIA	
CAUSAS	EFFECTOS
Muelle de Puerto Colombia	Disminución de la energía del oleaje
Construcción de los Tajamares de Boca de Ceniza	Obstrucción del flujo de sedimentos del Río Magdalena.
Laguna de oxidación	Contaminación del agua, malos olores, problemas de mosquitos
Desarrollo poblacional	Modificación del ambiente costero
Sobrepesca	Diversidad de especies
Construcción infraestructura dura	Intensidad de los procesos erosivos
Uso del suelo	Reducción del área costera
Extracción de arena	Déficit de sedimentos

La deriva litoral es una dinámica que afecta principalmente a los sedimentos no consolidados, como las espigas transitorias o los sedimentos de origen fluvial, lo que permite procesos de socavamiento y acumulación. La construcción de obras de protección marítima, como los espolones y tajamares, han provocado una rápida erosión con retroceso en la franja litoral, resultando en una disminución y pérdida de los sistemas ecológicos (Lage y Robertson, 2001). Esta pérdida afecta principalmente a los manglares, cuya función como servicios ecosistémicos fundamentales se extienden al aporte de materia y energía a otros sistemas. Además, los manglares actúan como grandes evapotranspiradores y desempeñan un papel crucial como sumideros de CO₂. También proporcionan protección contra la erosión costera al amortiguar la energía del viento y las olas (Sánchez-Moreno et al., 2019).

En la actualidad, al sur del municipio de Puerto Colombia se extiende el bosque de manglar con una forma alargada en sentido norte-sur, abarcando una longitud de 470 metros y un ancho de 95

metros. Este bosque se encuentra ubicado frente a la parte inicial del malecón de hormigón, una zona completamente urbanizada y de tránsito vehicular (Sánchez-Moreno et al., 2019). La Ciénaga de Balboa, se alimenta de tres cuencas que aportan caudales de escorrentía superficial. Entre los afluentes más importantes se encuentran el Arroyo Grande y el Arroyo Puerto Colombia, junto con otros ríos de menor tamaño como el Juaruco, Caña, Cucambito y El Volcán (Bolívar et al., 2019; Campuzano & Arana, 2019). Sin embargo, Estos cuerpos de agua están siendo contaminados por las aguas residuales no tratadas vertidas en ellos y la presencia de desechos plásticos arrojados la comunidad.

Según el estudio de Galvis (2021), realizado con imágenes satelitales desde 1973 hasta la actualidad, se ha observado un retroceso costero de hasta 1090 metros en la Ciénaga de Balboa. Bolívar et al. (2019) calcularon una pérdida de más de 700 metros de playa en el sur del municipio. Este proceso ha resultado en una reducción de más de 73% del área originalmente ocupada por esta ciénaga, y ha ocasionado daños parciales en la infraestructura portuaria de Puerto Colombia.

De acuerdo en la investigación realizada por García (2021), entre los años 1990 y 2000, el proceso de erosión se concentró principalmente en la Ciénaga de Balboa, con una pérdida de área de más del 65,05%. En contraste, se observó un fenómeno de acreción en la espiga de Puerto Velero, que experimentó un aumento de área equivalente al 34,95%. A partir del análisis de comportamiento, se puede inferir que la disminución de sedimentos en el tramo costero adyacente al bosque manglar y las condiciones oceanográficas facilitaron la migración hacia el suroeste, dando lugar a la acumulación de sedimentos que actualmente conforma la espiga.

3. Perspectiva siglo XXI

La dinámica costera está siendo afectada por diversos factores, tanto naturales como antrópicos. Entre los elementos naturales, destacan el aumento del nivel medio global del mar y los eventos meteorológicos extremos. Además, la baja resistencia de los materiales a procesos erosivos también desempeña un papel importante en estos cambios.

Por otro lado, las actividades humanas en la desembocadura del Río Magdalena, la construcción del muelle portuario y espolones en el norte del municipio de Puerto Colombia, así como el manejo deficiente de las aguas residuales provenientes de la laguna de oxidación y ríos contaminados que desembocan en el humedal de Balboa, están intensificando el impacto de la erosión costera.

Es esencial, considerar los impactos sociales, económicos y ambientales que pueden derivar de la construcción de infraestructura portuaria. Las Naciones Unidas propusieron en el 2015 un nuevo

modelo de desarrollo, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que buscan poner fin a la pobreza, proteger el medio ambiente, entre otros objetivos. En este contexto, el ODS N°6 se centra en agua limpia y saneamiento, en donde se espera que para el 2030 “se protejan y restablezcan los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos el bosque, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos”, mientras que el ODS N°14 busca prevenir y proteger la vida submarina, en el cual se indica que “se debe conservar al menos el 10% de las zonas costeras y marinas, de conformidad con las leyes nacionales y el derecho internacional. Y sobre la base de la mejor información científica disponible” (CEPAL, s.f)

En el caso de Colombia, se están estableciendo alianzas para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible al 100% para el año 2030. Según el informe del Departamento Nacional de Planeación (DNP), en el 2020 se había avanzado un 45,2% en la implementación de la Agenda 2030 y los ODS. Sin embargo, aún queda un 54,8% de la meta por alcanzar para el año 2030 (DNP, 2022)

Es importante destacar que, en el Plan de Ordenamiento Territorial para el área de interés, aun no se han incluido medidas relacionadas con el manejo de aguas residuales, ni se han abordado las amenazas y vulnerabilidades ante la erosión costera en el sur del municipio de Puerto Colombia. Por lo tanto, resulta esencial reconocer y evaluar tanto las condiciones naturales como aquellas influenciadas por la actividad humana. Este análisis proporciona información crucial para orientar a los encargados de la toma de decisiones en la formulación de políticas, programas para la planificación y mitigación de riesgos, así como estrategias para la adaptación del territorio (García, 2021).

La implementación de infraestructura verde podría representar una solución significativa para mitigar la intensidad de la erosión costera en la zona sur del municipio y, a su vez, contribuir a la restauración y conservación del bosque manglar ubicado en la Ciénaga de Balboa. Para elaborar un plan de restauración del humedal, es fundamental identificar los procesos presentes en la zona y comprender su impacto. Bolívar et al. (2019) sugieren alternativas para restablecer la estabilidad y la capacidad de recuperación de los ecosistemas, como la instalación de trampas de sedimentos, aprovechando la madera que es transportada por el Río Magdalena.

En la **Figura 6** se observan diferentes medidas y estrategias para la mitigación de la erosión costera, con el objetivo de proteger a las comunidades, infraestructuras y ecosistemas vulnerables a los efectos de la erosión. Estas pueden abarcar desde las infraestructuras de protección dura hasta restauración de los ecosistemas, pasando por medidas no estructurales.

En el caso específico de Puerto Colombia, se recomienda considerar especialmente las medidas de restauración de ecosistemas y las no estructurales. Estas medidas son fundamentales para restaurar el equilibrio en la dinámica costera, además abogar por acciones como la recuperación y reforestación del bosque manglar ubicado en el sur de Puerto Colombia. Esta opción cobra aún más relevancia considerando que los principales vertimientos de aguas contaminadas llegan a este humedal. Si Colombia desea cumplir con los objetivos establecidos en la Agenda 2030, es necesario iniciar la implementación de las medidas requeridas para proteger y recuperar la franja sur del municipio junto con los ecosistemas que la componen.

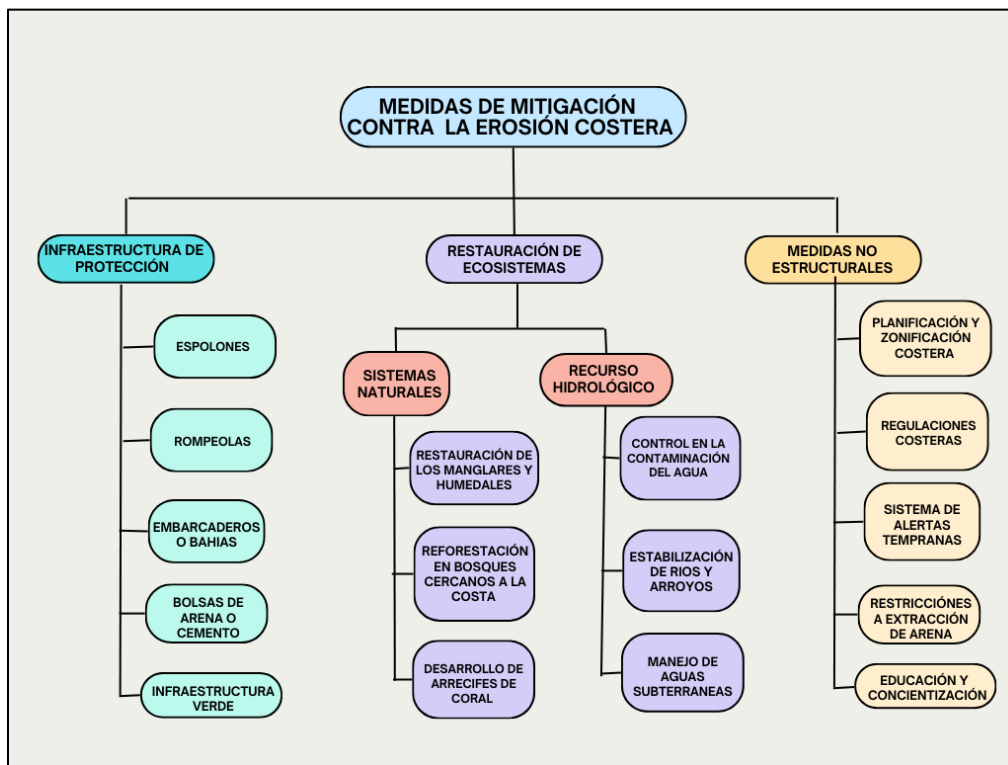


Figura 6. Medidas de control y mitigación contra la erosión costera. Extraído y modificado de Blanco y Rodríguez (2020).

4. Conclusiones

En Puerto Colombia, la construcción de los tajamares de Boca de Ceniza, en Barranquilla, fue un factor determinante en el retroceso de la línea de costa. Estas estructuras alteraron la dinámica costera al funcionar como barreras que obstaculizan el flujo de sedimentos provenientes del Río Magdalena, interrumpiendo el suministro de sedimentos hacia el litoral costero. El tajamar occidental provocó un déficit de sedimentos que alimentaban las playas de los municipios cercanos.

Este cambio afectó el sistema fuente-sumidero en la celda litoral. La alteración de la desembocadura del Río Magdalena provocó el desplazamiento de una barrera de arena, conocida como Isla Verde. Debido a la modificación en la dinámica costera, provocada por la intensidad de los vientos, el déficit de sedimentos y la infraestructura portuaria, el sumidero migró hacia el suroeste, adosándose a la franja litoral del municipio de Puerto Colombia. Esto ocasionó que el puerto marítimo dejara de operar, ya que los barcos quedaban atrapados en los sedimentos arrastrados por la corriente costera.

Las condiciones climáticas y oceanográficas, como el aumento relativo del nivel del mar y el cambio climático, que han provocado un aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos, como tormentas tropicales e inundaciones han expuesto a la franja litoral a una mayor erosión. Además, la presencia de estructuras antrópicas como tajamares y muelles ha tenido un impacto significativo en la evolución de la costa durante el siglo XX, dando forma a los paisajes que observamos en el siglo XXI.

La Ciénaga de Balboa, ubicada en el sur del municipio, presenta un aumento en su nivel de contaminación debido a los múltiples vertimientos de aguas residuales que desembocan en este importante bosque manglar sin recibir un tratamiento adecuado. Para abordar esta problemática, se sugiere implementar medidas de mitigación de la erosión costera que incluyan las acciones de restauración y reforestación, así como la protección del bosque manglar. Además, es crucial incorporar medidas no estructurales, como la planificación y zonificación de las áreas costeras, la imposición de restricciones a la minería a cielo abierto en el área de estudio y, por último, fomentar la concientización y la educación para involucrar a la comunidad en el proceso de toma de decisiones. Estas acciones integrales buscan no solo contrarrestar la contaminación actual, sino promover la sostenibilidad ambiental y la participación de la comunidad en la preservación de este ecosistema costero.

La elaboración de un plan de gestión y planificación de riesgo en desastres es algo necesario para garantizar la protección y sostenibilidad de zonas costeras, especialmente en casos como la Ciénaga de Balboa, un humedal de vital importancia para la biodiversidad y que desempeña un papel significativo en las actividades económicas y la vida de las comunidades locales. Para llevar a cabo estos estudios de manera efectiva, es necesario analizar y determinar cómo es el clima marítimo, ya que es uno de los principales factores para comprender de la dinámica costera y su área de influencia.

5. Bibliografía

- Abarca, S. C., Serrano, M. C., Bolívar-Anillo, H. J., Daza, D. A. V., Moreno, H. S., & Anfuso, G. (2020). Bosques de manglar del Caribe Norte Colombiano: Análisis, evolución y herramientas de gestión. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 16(1), 31-54.
- Anaya Vásquez, Y. (2022). Evolución morfodinámica en el sector costero Santa Verónica-Salgar (Atlántico) en el periodo 1985-2020 y perspectivas a mediano plazo (2030). Universidad del Norte.
- Bernal, G., Poveda, G., Roldán, P., & Andrade, C. (2006). Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la costa Caribe colombiana. *Revista Academia de Ciencias Colombianas*, 30(115), 195-208.
- Blanco Álvarez, D. A., & Rodríguez Villalba, M. (2020). La bella y la bestia: valoración de servicios ecosistémicos en conflicto en una playa del caribe colombiano. Universidad de la Costa.
- Bolívar, M., Rivillas-Ospina, G., Fuentes, W., Guzmán, A., Otero, L., Ruiz, G., ... & Berrío, Y. (2019). Anthropogenic impact assessment of coastal ecosystems in the municipality of Puerto Colombia, NE Colombia. *Journal of Coastal Research*, 92(SI), 112-120. <https://doi.org/10.2112/SI92-013.1>
- Campuzano Rodríguez, J. R., & Arana Sus, S. (2019). Recuperación ronda hídrica de las aguas de escorrentía del arroyo de la UNAD en el municipio de Puerto Colombia en el departamento del Atlántico. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (s.f.). Plataforma Regional de Conocimiento sobre la Agenda 2030 en América Latina y el Caribe, “Los ODS en América Latina y el Caribe: Centro de gestión del conocimiento estadístico”. <https://www.cepal.org/es/temas/agenda-2030-desarrollo-sostenible/objetivos-desarrollo-sostenible-ods>
- Cubillos Ciro, E. A. (2017). Disponibilidad a pagar de los habitantes del municipio de Puerto Colombia por una mejora en la calidad del agua de sus playas. Universidad del Norte.
- Departamento Nacional de Planeación. (2022, febrero 18). Colombia avanza en más del 72% de cumplimiento de los ODS. <https://2022.dnp.gov.co/Paginas/Colombia-avanza-en-mas-del-72-de-cumplimiento-de-los-ODS.aspx>

- Ferrucho-Maloof, I. E., Otero-Díaz, L. J., & Cueto-Fonseca, J. E. (2022). Cambios recientes de la línea de costa entre Bocas de Ceniza y Puerto Velero (Atlántico, Colombia). *Boletín de Geología*, 44(3), 159-178. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n3-2022007>
- Franzen, M. O., Fernández, E. H., & Siegle, E. (2021). Impacts of coastal structures on hydro-morphodynamical patterns and guidelines towards sustainable coastal development: A case studies review. *Regional Studies in Marine Science*, 44, 101800. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101800>
- Gaona-Currea, J. A. (2014). Coastal erosion in the Golfo de Morrosquillo, Colombia: from the perception of stakeholders to preferred interventions. [Report MSc Thesis Research]. Wageningen University and Research Centre, the Netherlands.
- García Laiton, L. (2021). Clima marítimo, procesos de erosión/acreción y amenazas/vulnerabilidades por erosión: Caso de estudio de la barrera costera de Puerto Velero, Departamento del Atlántico.
- Giraldo, L., & Lonin, S. (1998). Cálculo del oleaje y el transporte de sedimentos en la costa Caribe colombiana. *Boletín Científico CIOH*, (18), 39-49. https://doi.org/10.26640/01200542.18.39_49
- Hsu, T. W., Lin, T. Y., & Tseng, I. F. (2007). Human impact on coastal erosion in Taiwan. *Journal of Coastal Research*, 23(4), 961-973. <https://doi.org/10.2112/04-0353R.1>
- Inger, D., Higgins Álvarez, A., Ayala Mantilla, C., Martínez Duarte, P., Tigreros Benavides, P. C., & Muñoz Vargas, A. (2015). Caracterización del régimen del viento y el oleaje en el litoral del departamento del Atlántico, Colombia. *Boletín Científico CIOH*. https://doi.org/10.26640/01200542.33.231_244
- Lage, A. F., & Robertson, K. G. (2001). Morfodinámica del litoral caribe y amenazas naturales. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 10(1), 1-35.
- Martinez, J. O., Pilkey, O. H., & Neal, W. J. (1990). Rapid formation of large coastal sand bodies after emplacement of Magdalena River jetties, northern Colombia. *Environmental Geology and Water Sciences*, 16, 187-194. <https://doi.org/10.1007/BF01706043>
- Masselink, G., Hughes, M., & Knight, J. (2014). *Introduction to coastal processes and geomorphology*. Routledge.
- Méndez, F. J., Medina, R., Losada, I. J., Olabarrieta, M., Tomás, A., Liste, M., ... & Castanedo, S. (2004). Estudio de los impactos en la costa española por efecto del cambio climático. *El*

- Clima entre el Mar y la Montaña, Santander, Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, 64-66.
- Mendivelso, D., Carvajal, J., & Pinzón, L. (2010). Estudios geomorfológicos del sector comprendido entre Bocatocino, Atlántico y Ciénaga, Magdalena. Informe final del proyecto Anden Caribe Fase-2. Servicio Geológico Colombiano
- Molina Florez, L. G. (2014). Caracterización hidrodinámica del oleaje en el Golfo de Urabá para la estimación del transporte potencial longitudinal de sedimentos a partir de la simulación de un clima marítimo con información escasa. Caso de aplicación: Punta Yarumal. Universidad Nacional de Colombia.
- Molina, A., Molina, C., Giraldo, L., & Barrera, R. (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.
- Molina, A., Molina, C., Thomas, Y., & Molina, L. E. (2001). Comportamiento de la línea de costa del Caribe colombiano sector entre Barranquilla (Bocas de Ceniza) y Flecha de Galerazamba. Boletín Científico CIOH, (19), 68-79.
<https://doi.org/10.26640/22159045.101>
- Núñez-Cabarcas, H. A. (2004). La desaparición de Isla Verde: Un desastre ecológico del siglo XX en el Caribe colombiano. Universidad del Norte.
- Núñez Ravelo, F. A. (2017). Geomorfología y sedimentología del sistema de cárcavas en el borde costero al suroeste del Castillo de Araya, Estado Sucre, Venezuela. Investigaciones geográficas, (92), 0-0. <https://doi.org/10.14350/rig.53428>
- Oderiz, I., Mori, N., Mortlock, T., Mendoza, E., & Silva, R. (2020). TRANSITIONAL IMPACTS OF ENSO ON WAVE CLIMATE IN COASTAL REGIONS. Coastal Engineering Proceedings, (36v), 22-22. <https://doi.org/10.9753/icce.v36v.waves.22>
- Otero, L. J., Ortiz-Royero, J. C., Ruiz-Merchan, J. K., Higgins, A. E., & Henriquez, S. A. (2016). Storms or cold fronts: what is responsible for the extreme waves regime in the Colombian Caribbean coastal region? Natural Hazards and Earth System Sciences, 16(2), 391-401.
<https://doi.org/10.5194/nhess-16-391-2016>

- Ozkan, C., Perez, K., & Mayo, T. (2020). The impacts of wave energy conversion on coastal morphodynamics. *Science of the Total Environment*, 712, 136424. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136424>
- Page, W. (1982). Tectonic deformation of the Caribbean coast Northwestern Colombia. In *General Geology, Geomorphology and Neotectonics of Northwestern Colombia 10th Caribbean Geol. Conference*, ed. H. Duque-Caro, A1–A18. Cartagena.
- Patiño-Pulgarín, L. F., Londoño Montoya, M. P., & Velásquez Sánchez, V. (2021). Lo que el río les llevó. *Universidad Católica de Pereira*.
- Posada-Carbó, E. (1997). El puerto de Barranquilla: entre el auge exportador y el aislamiento, 1850-1950. *Caravelle* (1988-), 119-132.
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista Académica de Ciencias*. 28(107), 201-222. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.28\(107\).2004.1991](https://doi.org/10.18257/raccefyn.28(107).2004.1991)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.024>
- Rangel-Buitrago, N., Williams, A. T., & Anfuso, G. (2018). Hard protection structures as a principal coastal erosion management strategy along the Caribbean coast of Colombia. A chronicle of pitfalls. *Ocean & Coastal Management*, 156, 58-75. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.04.006>
- Rangel-Buitrago, N., Williams, A., Anfuso, G., Arias, M., & Gracia, A. (2017). Magnitudes, sources, and management of beach litter along the Atlántico department coastline, Caribbean coast of Colombia. *Ocean & Coastal Management*, 138, 142-157. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.01.021>
- Rangel-Ch, J. O., & Carvajal-Cogollo, J. E. (2012). Clima de la región Caribe colombiana. *Colombia diversidad biótica XII: la región Caribe de Colombia*, 67-129.
- Ribó, M., Goodwin, I. D., O'Brien, P., & Mortlock, T. (2020). Shelf sand supply determined by glacial-age sea-level modes, submerged coastlines and wave climate. *Scientific reports*, 10(1), 462. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57049-8>
- Sánchez-Moreno, H., Bolívar-Anillo, H. J., Villate-Daza, D. A., Escobar-Olaya, G., & Anfuso, G. (2019). Influencia de los impactos antrópicos sobre la evolución del bosque de manglar en

Puerto Colombia (Mar Caribe colombiano). Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, 15(1), 01-16.

Vargas, G. (2012). Procesos de Erosión y Sedimentación Costera entre Bocas de Ceniza y Puerto Colombia, Colombia. XX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Barranquilla, Colombia.