



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Vulnerabilidad del litoral Pacífico colombiano a la erosión costera: Bosques de manglar como ecosistemas mitigadores

Johanna Paola Echeverry Hernández

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Biología
Bogotá, Colombia
2025

Vulnerabilidad del litoral Pacífico colombiano a la erosión costera: Bosques de manglar como ecosistemas mitigadores

Johanna Paola Echeverry Hernández

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias - Biología

Director: Ph.D. José Ernesto Macera Pineda

Codirector: Ph.D. David Alejandro Sánchez Núñez

Línea de Investigación:

Modelación de ecosistemas costeros

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Departamento de Biología

Bogotá, Colombia

2025

A mi abuelita

Existo porque tú existes, soy porque tú eres

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia, por abrirme sus puertas una vez más para cumplir mis sueños.

A Minciencias, por financiar el proyecto de investigación “servicio de regulación y control de la erosión costera que brindan diferentes bosques de manglares en Colombia”, del que hizo parte este trabajo.

A los profesores José Ernesto Mancera y David Alejandro Sánchez, por transmitirme su amor y conocimientos profundos sobre los manglares y el mar. También por su paciencia con esta geógrafa que anhela ser parte del mundo de la biología marina.

A Juan, por sus enseñanzas sobre la interacción sedimentos-manglares y la importancia del equilibrio entre ríos y humedales.

A mi familia y mis amigos, por estar siempre dispuestos a escucharme y aconsejarme.

Resumen

Vulnerabilidad del litoral Pacífico colombiano a la erosión costera: Bosques de manglar como ecosistemas mitigadores

El efecto de modificación espacial que los bosques de manglar producen en el frente costero al atenuar las olas, capturar sedimentos y formar suelo, reduce la intensidad de las amenazas marinas sobre el litoral, disminuye la exposición y la vulnerabilidad de las comunidades costeras, y estas comunidades aumentan su resiliencia después de los impactos de las amenazas. Dichos beneficios varían dependiendo de las condiciones de cada región o país, por lo que es fundamental comprender tanto los manglares locales, como los entornos ambientales en donde se encuentran. El objetivo de la presente investigación fue estimar la tendencia de cambio de posición del frente del bosque de manglar a nivel local en el Pacífico Colombiano, específicamente en el litoral de Bocagrande, municipio de Tumaco en el departamento de Nariño, constituido por un manglar deltaico con influencia de sedimentos terrígenos, protegido por una flecha costera dinámica producto de la acción de las corrientes marinas, la descarga de sedimentos del río Mira y un régimen mesomareal. Se comparó su comportamiento con un manglar de una región contrastante en el Parque Regional Manglares de Old Point en la isla oceánica de San Andrés, ubicada al noroeste del mar Caribe colombiano en el departamento de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, declarado Reserva de Biósfera Seaflower, cuyos manglares kársticos de costa abierta corresponden a formaciones arbóreas de islas coralinas e hidrológicamente dependientes de las lluvias y la influencia marina con régimen micromareal. Mediante imágenes satelitales se analizaron los cambios multitemporales (2010 a 2023) de los frentes del manglar, encontrando avances y retrocesos variables de los bosques estudiados. Las máximas tasas de avance fueron de 7.57 m año^{-1} (Old Point)

y de 11.69 m año⁻¹ (Bocagrande) y de retroceso de -6.6 m año⁻¹ (Old Point) y -19.7 m año⁻¹ (Bocagrande). Para explicar las tasas de cambio, se exploró su relación con factores potenciales de forzamiento como El Niño/Oscilación del Sur (ENSO), el oleaje y el caudal de ríos, encontrando que la migración del frente costero de manglares oscila en cortos períodos de tiempo en respuesta a fenómenos oceanográficos, meteomarineros e hidrológicos. En Old Point se obtuvo mayor relación inversa entre la tasa de migración con la variable altura significativa de ola ($R^2=0,83$; p-valor=0,0002), seguida por relación directa con la variable velocidad de ola ($R^2=0,47$; p-valor=0,03). En Bocagrande se halló mayor relación directa con el caudal de Río Mira ($R^2=0,71$; p-valor=0,0045), mientras que la variable oleaje fue el segundo determinante con una relación directa, con $R^2=0,33$ y p-valor=0,06. Los cambios en los frentes del manglar tienen profundas implicaciones en los servicios ecosistémicos que estos bosques proveen a la sociedad, y a su vez, los impactos de estos forzantes de cambio analizados pueden ser mitigados a través de acciones sitio-específicas de protección y restauración ecosistémica.

Palabras clave: Erosión, tasa de cambio de frente de vegetación, oleaje, caudal, ENOS, San Andrés Isla, Tumaco, vulnerabilidad.

Abstract

Vulnerability of the Colombian Pacific Coastline to Coastal Erosion: Mangrove Forests as Mitigating Ecosystems

The spatial modification effect that mangrove forests exert on the coastal front—by attenuating waves, capturing sediments, and forming soil—reduces the intensity of marine threats to the shoreline, decreases the exposure and vulnerability of coastal communities, and enhances their resilience after the impacts of such threats. These benefits vary depending on the conditions of each region or country, making it essential to understand both the local mangroves and the environmental settings in which they are found. The objective of this research was to estimate the trend of positional change of the mangrove forest front at a local scale in the Colombian Pacific, specifically along the Bocagrande shoreline in the municipality of Tumaco, Nariño department. This area consists of a deltaic mangrove influenced by terrigenous sediments, protected by a dynamic coastal spit shaped by marine currents, sediment discharge from the Mira River, and a mesotidal regime. Its behavior was compared with a mangrove in a contrasting region in the Old Point Mangrove Regional Park on the oceanic island of San Andrés, located in the northwest of the Colombian Caribbean Sea, in the department of San Andrés, Providencia, and Santa Catalina. This area has been designated as the Seaflower Biosphere Reserve, where karstic open-coast mangroves correspond to tree formations on coral islands and are hydrologically dependent on rainfall and marine influence, with a microtidal regime. Using satellite imagery, multitemporal changes (2010 to 2023) in the mangrove fronts were analyzed, revealing variable advances and retreats of the studied forests. The maximum

advance rates were 7.57 m yr⁻¹ (Old Point) and 11.69 m yr⁻¹ (Bocagrande), while the maximum retreat rates were -6.6 m yr⁻¹ (Old Point) and -19.7 m yr⁻¹ (Bocagrande). To explain these change rates, their relationship with potential forcing factors such as El Niño-Southern Oscillation (ENSO), wave action, and river discharge was explored. The results indicate that the migration of the mangrove coastal front fluctuates over short periods in response to oceanographic, meteorological-marine, and hydrological phenomena. In Old Point, the strongest inverse relationship was found between the migration rate and significant wave height ($R^2 = 0.83$; p-value = 0.0002), followed by a direct relationship with wave velocity ($R^2 = 0.47$; p-value = 0.03). In Bocagrande, the strongest direct correlation was with the Mira river streamflow ($R^2=0,71$; p-value=0,0045), while wave height was the second determinant with a direct correlation ($R^2 = 0,33$ y p-value=0,06). Changes in mangrove fronts have profound implications for the ecosystem services that these forests provide to society. In turn, the impacts of these analyzed change drivers can be mitigated through site-specific protection and ecosystem restoration actions.

Keywords: Erosion, vegetation front change rate, waves, flow, ENSO, San Andrés Isla, Tumaco, vulnerability.

Contenido

	Pág.
Agradecimientos	V
Resumen	VI
Abstract	VIII
Contenido	XI
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
Lista de Símbolos y Abreviaturas	XVII
Introducción	18
1. Marco teórico	22
1.1 Bosques de manglar en Colombia.....	24
1.2 Respuesta del manglar ante forzantes ambientales.....	27
2. Planteamiento del problema y justificación	30
2.1 Planteamiento del problema	30
2.2 Justificación	32
2.3 Pregunta de Investigación	34
3. Objetivos	35
3.1 Objetivo general.....	35
3.2 Objetivos Especificos	35
4. Materiales y métodos	36
4.1 Área de estudio.....	36
4.1.1 Tumaco, litoral Pacífico colombiano	37
4.1.2 Isla de San Andrés, Caribe insular colombiano	39
4.2 Metodología	41
4.2.1 Cambios de posición en el frente del bosque de manglar	44
4.2.2 Parámetros de oleaje	52
4.2.3 El Niño-Oscilación del Sur (ENOS).....	57
4.2.4 Caudal.....	59
5. Resultados	61
5.1 Bocagrande, Tumaco	62
5.2 Isla de San Andrés	67

6. Discusión.....	74
6.1 Variabilidad de la posición espacial del frente del bosque de manglar en respuesta a factores forzantes de vulnerabilidad ante erosión costera	74
6.1.1 Sedimentos de origen terrígeno.....	74
6.1.2 ENOS.....	76
6.1.3 Oleaje.....	77
7.1 Análisis comparativo entre bosques con diferentes condiciones fisiográficas ...	78
8. Conclusiones y recomendaciones.....	82
8.1 Vulnerabilidad ante elementos forzantes costera.....	83
8.2 Cambio multitemporal de frente costero.....	84
8.3 Respuesta sitio-específica del manglar	86
Anexo	88
Rutina de Matlab para extraer datos .Grib	88
Bibliografía	91

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Modelo conceptual ecológico del ecosistema de manglar. Modificado de (Day <i>et al.</i> , 2018).....	23
Figura 2. Diferencias estructurales de bosques de manglar de dos ambientes. A. <i>Rhizophora mangle</i> en bocagrande, B. <i>Avicennia germinans</i> en Bocagrande. C. <i>Rhizophora mangle</i> en Old Point, D. <i>Avicennia germinans</i> en Old Point.....	26
Figura 3. Evidencia de erosión costera en la zona Bocagrande en el municipio de Tumaco, al fondo, el bosque de manglar tras una barra de arena.	34
Figura 4. Localización del área de estudio. A. Isla de San Andrés, Caribe insular colombiano. B. Tumaco, Pacífico colombiano.....	37
Figura 5. Diagrama de flujo metodológico	43
Figura 6. Imágenes satelitales Rapideye (2010, 2012, 2013, 2014) y Planet Scope (2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023) del sector Bocagrande en Tumaco utilizadas para el análisis multitemporal	48
Figura 7. Imágenes satelitales Rapideye (2011, 2012, 2013, 2014,2015) y Planet Scope (2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023) del sector Old Point en San Andrés Isla utilizadas para el análisis multitemporal	50
Figura 8. Método de cálculo de tasas de punto final para medir los cambios de posición del frente de manglar. Modificado de (Himmelstoss E., <i>et al.</i> , 2021)	51
Figura 9. Extracción de variables oceanográficas para las dos áreas de estudio	53
Figura 10. Arrecife coralino y zona de entrada del oleaje sin barrera arrecifal	56
Figura 11. Ángulos incidentes seleccionados en la zona de estudio del sector Bocagrande	57
Figura 12. Delta del río Mira y localización de la estación San Juan Mira de IDEAM.	59
Figura 13. Líneas de frente de vegetación digitalizadas a partir de imágenes de años 2010 a 2023 en el litoral de Bocagrande, Tumaco.....	62
Figura 14. Cambios en la posición de la línea costera (línea de más alta marea del día) en diferentes años entre 1969 y 2021 en el sector de Bocagrande, Tumaco.....	64
Figura 15. Regresión lineal entre variables ENOS y cambio de posición del frente de manglar para el bosque de Bocagrande.....	65
Figura 16. Regresión lineal entre variables Caudal total del río Mira y cambio de posición del frente de manglar para el bosque de Bocagrande.....	66
Figura 17. Regresión lineal entre celeridad de grupo y cambio de posición del frente de manglar para el bosque de Bocagrande.....	67
Figura 18. Líneas de frente de vegetación digitalizadas a partir de imágenes de años 2011 a 2023 en la Isla de San Andrés.....	68
Figura 19. Regresión lineal entre variable ENOS y cambio de posición del frente de manglar (m año ⁻¹) para el bosque de Old Point en la zona centro.....	70

- Figura 20. Regresión lineal entre variable ENOS y cambio total de posición del frente de manglar ($m\ a\tilde{n}o^{-1}$) para el bosque de Old Point considerando los costados norte, centro y sur. 71**
- Figura 21. Regresión lineal entre variable de Altura Significante de Ola (SWH) proveniente del sur y cambio de posición del frente de manglar en el costado central del bosque del Old Point ($m\ a\tilde{n}o^{-1}$). 72**
- Figura 22. Regresión lineal entre variable de oleaje velocidad de ola (ws) y cambio de posición del frente de manglar ($m\ a\tilde{n}o^{-1}$) para el bosque de Old Point. 72**

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Tipologías de manglares de acuerdo con la relación entre el origen sedimentario y la configuración geomorfológica de la costa. Modificado de (Worthington <i>et al.</i> , 2020).....	24
Tabla 2. Variables estructurales características de los bosques de manglar de las zonas de estudio. Datos de Bocagrande tomados de Gomez Garcia, (2024), y de Old Point de Quintero, (2025)	26
Tabla 3. Características técnicas de datos utilizados para el análisis de respuesta del frente de manglar ante forzantes de erosión costera.	42
Tabla 4. Imágenes de satélite utilizadas en el análisis de cambio de posición de línea de frente de vegetación. Información sobre mareas obtenida de Cartillas de pleamares y bajamares de Pacífico y Caribe proporcionadas por IDEAM	45
Tabla 5. Promedios de variables de oleaje extraídas de ERA5 y calculadas para Tumaco para los periodos evaluados aplicando el retraso de seis meses. Altura significativa de ola (SWH), celeridad de grupo (Cg), velocidad de ola (ws), altura significativa de ola (H), dirección de ola (D) y periodo de ola (T) .	54
Tabla 6. Promedios de variables de oleaje extraídas de ERA5 calculadas para la Isla de San Andrés para los periodos evaluados aplicando el retraso de seis meses. Altura significativa de ola (SWH), celeridad de grupo (Cg), velocidad de ola (ws), altura significativa de ola (H), dirección de ola (D) y periodo de ola (T)	54
Tabla 7. Valores del Índice Oceánico del Niño (ONI) de 2009 a 2023 (los números en rojo representan un episodio de El Niño con valor ONI de $\geq 0,5^{\circ}\text{C}$. Los números en azul representan un Niño súper fuerte con una duración de 19 meses). Fuente: (NOAA, 2023). DEF= Diciembre – Enero – Febrero, EFM= enero-febrero-marzo, FMA= febrero-marzo-abril, MAM=marzo-abril-mayo, AMJ= abril-mayo-junio, MJJ= marzo-junio-julio, JJA= junio-julio-agosto, JAS= julio-agosto-septiembre, ASO= agosto-septiembre-octubre, SON= septiembre-octubre-noviembre, OND= octubre-noviembre-diciembre, NDJ= noviembre-diciembre-enero.....	58
Tabla 8. Valores promedio total del caudal del río Mira con retraso de seis meses.....	60
Tabla 9. Resultados de correlación entre el cambio de posición del frente del manglar y las variables forzantes ambientales. OP=Old Point, BG=Bocagrande.....	61
Tabla 9. Tasa de movimiento o cambio de posición de frente de manglar calculado para Bocagrande, Tumaco a partir de la posición espacial del frente de manglar en diferentes años. Los valores negativos corresponden a retrocesos del frente de manglar y los valores positivos a avances. La tasa de cambio presentada en cada periodo corresponde al movimiento entre la fecha inicial y final del periodo.....	63
Tabla 10. Tasas de erosión y/o acreción en el periodo 1969 a 2021 presentados en el sector de estudio de Bocagrande, en las que se muestra la alta variabilidad de la disposición de los sedimentos.	63

Tabla 11. Tasa de movimiento o cambio de posición de frente de manglar calculada para San Andrés Isla a partir de la posición espacial del frente de manglar en diferentes años.....	69
---	-----------

Lista de Símbolos y Abreviaturas

Símbolos

Símbolo	Descripción
<i>H</i>	Altura de ola
<i>T</i>	Periodo de ola
<i>D</i>	Dirección
<i>SWH</i> (<i>y/x</i>)	Altura Significante de Ola
<i>ws</i>	Velocidad de la ola
<i>C_g</i>	Celeridad de Grupo

Abreviaturas

Abreviatura	Descripción
<i>ENOS</i>	El Niño-Oscilación del Sur
<i>ENSO</i>	El Niño-Southern Oscillation
<i>EPR</i>	End Point Rate

Introducción

Árboles caminantes, así llamaban a los manglares los indígenas americanos por sus raíces aéreas que daban la impresión de que podían ponerse a andar ([Romera Castillo, 2022](#)). Los manglares son un grupo de plantas tolerantes a la sal, y taxonómicamente diverso ([McLeod y Salm, 2006](#)) aunque el número de familias y especies adaptadas para crecer en hábitats salinos es relativamente pequeño (70 especies en más de 40 millones de años), porque se requieren rasgos funcionales complejos para el crecimiento en ambientes intermareales ([Lovelock *et al.*, 2016](#)).

Los manglares están presentes en regiones tropicales y subtropicales del planeta. Normalmente crecen por encima del nivel medio del mar en las zonas intermareales de ambientes costeros y/o estuarinos, cubriendo alrededor de 15,2 millones de ha entre las costas de 123 países tropicales y subtropicales ([McLeod y Salm, 2006](#)) ([Maina *et al.*, 2021](#)). Este ecosistema es único y desempeña un papel importante para el medio ambiente y las funciones socioeconómicas ([Hapsari *et al.*, 2020](#)). Su enorme valor social y ecológico está dado por los servicios ecosistémicos que brindan y que ayudan a reducir la vulnerabilidad de las comunidades al apoyar los medios de vida, el ecoturismo y el comercio de las poblaciones ([Beck *et al.*, 2018](#)). Entre los principales servicios se encuentran la provisión de productos como pesca de subsistencia y comercial, acuicultura, miel, madera, materiales de construcción y medicinas tradicionales; los servicios culturales como turismo, recreación y espiritualidad y el soporte del ciclo de vida de nutrientes y hábitat de especies en etapas de vida temprana y el mantenimiento de la calidad del agua al filtrar aguas fluviales y de marea de sedimentos, minerales, contaminantes y nutrientes ([UNEP-WCMC, 2006](#)).

Además de estos servicios que brindan a las comunidades beneficios tangibles y evidentes a corto plazo y escalas locales en cuanto a acceso a materiales básicos para incrementar el bienestar, la salud y la cohesión de relaciones sociales, existen otros grupos de servicios

denominados de regulación y mantenimiento que garantizan seguridad a las comunidades a escala local y regional, así como a corto, mediano y largo plazo frente a riesgos de desastres de origen natural, al actuar como defensa costera, la regulación del clima y la protección de las costas por la erosión y los impactos de eventos de origen meteo-marino (UNEP, 2014).

El papel de los manglares en la protección costera contra las amenazas naturales como tormentas, tsunamis e inundaciones está dado porque mitigan el efecto de las olas y el viento, que se reducen rápidamente a medida que pasan a través de ellos; disminuyen el daño de las grandes tormentas al reducir los niveles de inundación y los impactos de grandes olas y altas velocidades del viento; ayudan a reducir el daño por tsunami al minimizar la altura de la ola, evitando la pérdida de vidas y daños a la propiedad (Spalding *et al.*, 2014). Se calcula que un bosque de manglares de 500 metros de ancho puede reducir la altura de las olas entre un 50 y un 100%. Sin manglares, más de 18 millones de personas se verían inundadas cada año, aumentando su vulnerabilidad social, económica y física, así como la susceptibilidad ante eventos de origen marino (Beck *et al.*, 2018).

Esta protección está dada por la combinación compleja de raíces, tronco, ramas y hojas de los árboles. De estos elementos, el sistema de raíces masivas y complejas de especies como *Rhizophora mangle*, por ejemplo, cuyas raíces aéreas que crecen desde el tallo principal en forma de arcos perpendiculares a este, permiten la transmisión efectiva de cargas dinámicas en un sustrato típicamente inestable (Méndez-Alonzo *et al.*, 2015), y desempeñan un papel dominante en la disipación de energía de las olas (Mori *et al.*, 2022) en función de propiedades geométricas que generan una hidrodinámica de compleja circulación del agua en campos bidimensionales y regiones con chorros, remolinos, turbulencias y estancamientos (Zhang *et al.*, 2015) que reducen la velocidad del flujo de agua, brindando protección a las áreas costeras y estuarios contra erosión.

Al reducir las olas, los manglares mitigan las fuerzas que actúan sobre la superficie del sedimento, ayudando así a evitar la erosión. Las raíces subterráneas de los manglares consolidan el suelo y los mantos bentónicos compuestos de algas, materia orgánica muerta y raíces de manglares en la superficie del sedimento protegen la superficie del suelo (Méndez-Alonzo *et al.*, 2015). En el proceso de deriva litoral los suelos de los manglares pueden acumularse hacia arriba atrapando sedimentos tanto en las raíces aéreas como

subterráneas. Sin embargo, la capacidad de los manglares para formar suelos depende del mantenimiento de un suministro adecuado de sedimentos entrantes y de la salud de los árboles, lo que afecta el crecimiento de las raíces (Beck M. W., 2014). Estudios como el de (Horstman *et al.*, 2014) en Tailandia, muestran que, a lo largo de las raíces del manglar, las alturas de olas significativas medias disminuyen en promedio un 42 a 47%, y la energía total de las olas disminuye en promedio de 68% a 74%, encontrando una relación positiva con su densidad volumétrica, que además produce un aumento de la tasa de deposición neta de sedimentos finos, soportando la función de defensa costera que brindan los manglares.

A pesar de la importancia para las zonas litorales y para las comunidades costeras, los ecosistemas de manglar están sometidos a presiones originadas acciones humanas directas como la explotación de madera, deforestación para la agricultura, el cultivo de camarones, e indirectas como la construcción de represas que alteraron los flujos de agua dulce y sedimentos, que se suman a los desafíos derivados del cambio climático (International Union for Conservation of Nature, 2025). Estas zonas ahora tienen una línea costera con poblaciones e infraestructura más expuestas y vulnerables a los impactos de olas, mareas de tormenta y aumento del nivel del mar, y con más alto riesgo de inundaciones costeras y erosión (Wealth Accounting and the Valuation of Ecosystem Services, 2017).

En Colombia, es amplia la variedad de estudios sobre erosión costera (e.g. Rangel-Buitrago *et al.*, 2015; Botero *et al.*, 2013; Rangel-Buitrago N., 2020) en los que se caracteriza y cuantifica el fenómeno, sus causas y consecuencias con base en las características físicas generales, condiciones geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, oceanográficas y climáticas de cada región. Ricaurte Villota *et al.* (2018), por ejemplo, establece la importancia de la cobertura de manglar en la disminución de la vulnerabilidad, clasificando las costas de las áreas de estudio de esta investigación en la Isla de San Andrés y Tumaco, con amenaza media o moderada. Sin embargo, son escasos los estudios en los que se evalúa la respuesta uno de los principales ecosistemas mitigadores ante los forzantes de erosión costera, y la mayoría son realizados en el Caribe Colombiano: en la Bahía de Cispatá, departamento de Córdoba, (Sánchez-Núñez *et al.*, 2019; Sánchez-Núñez *et al.*, 2020), en el Golfo de Urabá, departamento de Antioquia (Suárez J. *et al.*,

2015), en la Isla de San Andrés ([Vanegas G. et al., 2017](#)) y en el delta del río Patía (Pacífico colombiano) ([Restrepo y Cantera, 2011](#)).

La cuantificación de la variabilidad espacial de ecosistemas considerados como mitigadores ante erosión permite la evaluación de la vulnerabilidad costera ante este fenómeno, entendida como el grado en que un territorio es susceptible de ser afectado o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente ([Servicio Geológico Colombiano, 2016](#)).

1. Marco teórico

La teoría de sistemas establece que un sistema se define como un conjunto de elementos que se hallan en permanente interacción en una pluralidad dinámica de vínculos o una red de relaciones activas. Estas relaciones, a su vez, constituyen también elementos del sistema, y determinan las condiciones de estos y del sistema como una totalidad. Cuando dos o más sistemas interactúan, dan lugar a la aparición de nuevos sistemas cualitativamente superiores, con características propias, diferentes a las de los subsistemas que le dieron origen ([Maskrey, 1993](#)).

Bajo este enfoque, la convergencia y la interacción de los fenómenos que se da en los litorales responde a la teoría de sistemas, por ser una franja de superposición entre los ambientes continentales y marinos, con características particulares producto de la interacción de los procesos propios de la hidrósfera, la atmósfera, la biósfera, la litosfera, e incluso, la antropósfera, que determinan los patrones de flujo de las masas de agua, las corrientes litorales, la circulación estuarina y el transporte de sedimentos ([Restrepo Ángel, 2008](#)), y controlan y moldean su dinámica, morfología, estructura y evolución ([Lindeboom, 2002](#)).

En estos procesos moldeadores costeros participan también los ecosistemas presentes, como los manglares que, al existir en un entorno dinámico, requieren mecanismos de mantenimiento y respuestas a las perturbaciones, como raíces que fortalecen el suelo y facilitan la deposición de sedimentos, sistemas tolerantes a la salinidad y colonización a partir de propágulos en tierras recientemente agradadas ([Bird, 2008](#)).

Los atributos asociados al ecosistema de manglar están en constante interacción, y las condiciones externas inciden en sus factores ecológicos y estos a su vez en los servicios ecosistémicos que brindan. Cada factor dentro del ecosistema puede servir directa e indirectamente como indicador de la condición general del ecosistema (Day *et al.*, 2018) (Figura 1).

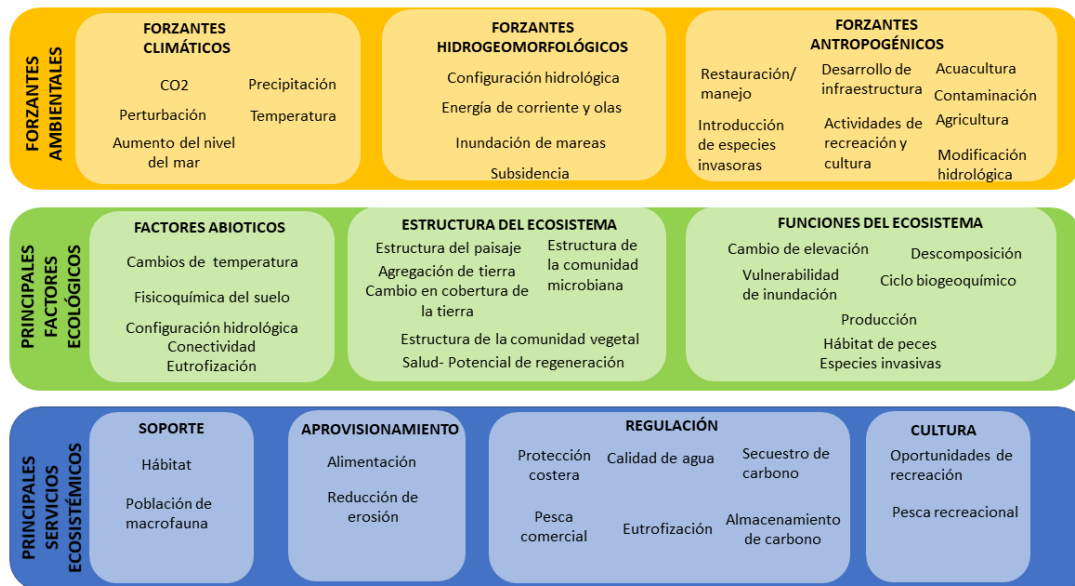


Figura 1. Modelo conceptual ecológico del ecosistema de manglar. Modificado de (Day *et al.*, 2018)

Es así como los servicios proporcionados por los manglares varían según el tipo de bosque y su ubicación (Walters *et al.*, 2008; Gilman *et al.*, 2008; Ewel *et al.*, 1998; Lewis, 1992), pero los cambios en la cubierta de manglares tienen implicaciones importantes para las zonas costeras independientemente del tipo de bosque. La pérdida de manglares puede aumentar la vulnerabilidad a peligros como la erosión, inundaciones, olas y marejadas ciclónicas (Danielsen *et al.*, 2005; Kathiresan y Rajendran, 2005; Dahdouh-Guebas *et al.*, 2005); causar pérdida de biodiversidad (Malik *et al.*, 2015); afectar la calidad del agua costera (Gilman *et al.*, 2008); y, en general, generar importantes impactos negativos en las comunidades humanas que dependen de ellas directa e indirectamente (Nagelkerken *et al.*, 2008; Walters *et al.*, 2008; Ewel *et al.*, 1998).

Factores como el clima, la amplitud de las mareas, la configuración geomorfológica generan importantes variaciones en la estructura de los manglares, y por lo tanto, en sus funciones, como la captura de carbono y la protección costera. El origen sedimentológico y la configuración geomorfológica determinan en gran medida estas diferencias sitio-

específicas de los bosques y la relación entre sus características ecológicas, forzantes de cambio y provisión de servicios (Worthington *et al.*, 2020), por lo que los esfuerzos de protección y/o restauración de este ecosistema no deben centrarse únicamente en análisis binarios de presencia/ausencia, asumiendo una uniformidad espacial en los bosques de diferentes regiones, sino que deben considerar las diferencias fisiográficas, geomorfológicas y sedimentológicas de forma local (**Tabla 1**)

Tabla 1. Tipologías de manglares de acuerdo con la relación entre el origen sedimentario y la configuración geomorfológica de la costa. Modificado de (Worthington *et al.*, 2020).

Origen sedimentario	Tipo geomorfológico	Configuración típica	Dominancia
Terrígeno	Deltaico	Protuberancia costera tipificada por una amplia llanura aluvial en forma de abanico derivada de grandes volúmenes de sedimentos transportados por el río.	Ríos
	Estuarino	Canal principal en forma de embudo con flujos de marea bidireccionales, caracterizado por precipitaciones.	Mareas
	Lagunar	Cuerpo de agua costero poco profundo, separado intermitentemente de las entradas del océano. Generalmente se forma paralela a la orilla.	Oleaje
	Costa abierta	Bahías protegidas	Oleaje
Carbonato	Lagunar	Cuerpo de agua costero poco profundo, separado intermitentemente de las entradas del océano. Generalmente se forma paralela a la orilla.	Oleaje
	Costa abierta	Ambientes protegidos en arrecifes de coral oceánicos y bancos de carbonatos	Oleaje

1.1 Bosques de manglar en Colombia

Colombia es un país único y de importancia mundial en términos de manglares por contar con costas tanto en el Pacífico y en el Caribe, con grandes contrastes: manglares extensos a lo largo de la costa del Pacífico debido a la alta precipitación anual y a la presencia de grandes deltas; y manglares distribuidos de forma discontinua a lo largo de la costa Caribe, siendo extensos en los tres deltas más grandes y en unas pocas lagunas costeras (Blanco-Libreros y Álvarez-León, 2019).

En Colombia la cobertura de manglar es de aproximadamente 79.954 ha, 292.724 ha en el litoral Pacífico y 87.230 ha en el Caribe (Bolívar-Anillo, Sánchez Moreno, *et al.*, 2019), conformadas por ocho especies, cinco de las cuales se encuentran en el costa Caribe: *Avicennia germinans* y *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erectus* y *Pelluciera rhizophorae*; y tres adicionales en la costa Pacífico: *Rhizophora harrisonii*, *R. racemosa* y *Mora oleifera* (Rodríguez-Rodríguez, *et al.*, 2016)

Los manglares del Caribe insular, del Caribe continental y del Pacífico colombianos, tienen grandes diferencias florísticas dadas principalmente por tres motivos: 1. Las bruscas alteraciones climáticas del pleistoceno caracterizadas por prolongados periodos de sequías y fluctuaciones del nivel del mar que afectaron la vegetación del Caribe, mientras que el litoral Pacífico mantuvo condiciones climáticas estables, 2. La poca penetración de las mareas que oscilan entre 40 y 60 cm de altura en el Caribe insular, hace que los bosques se limiten a estrechas franjas; mientras que el rango mareal del Pacífico oscila entre 2 a 3.5 m en el tipo mesomareal alto y entre 3.5 a 5 m en el bajo (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés, 2003), lo que permite a los bosques extenderse tierra adentro hasta donde las geoformas permiten su colonización; y 3. La gran productividad de los manglares del Pacífico dada por la inmensa oferta de agua dulce con nutrientes inorgánicos proveniente de la gran cantidad de fuentes hídricas que desembocan en el Pacífico, que permite el desarrollo y mantenimiento de bosques con árboles de más de 40 m de altura (von Prah, 1989) (Figura 2).



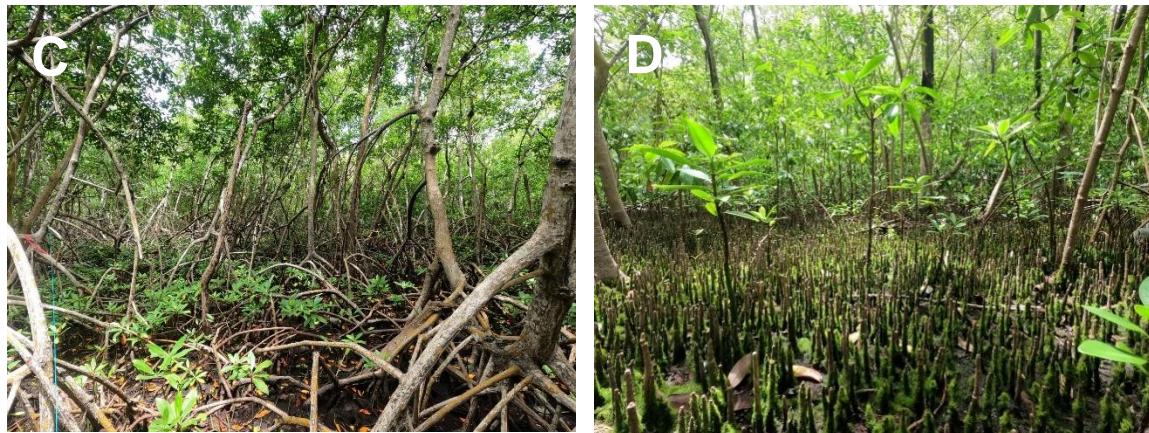


Figura 2. Diferencias estructurales de bosques de manglar de dos ambientes. A. *Rhizophora mangle* en bocagrande, B. *Avicennia germinans* en Bocagrande. C. *Rhizophora mangle* en Old Point, D. *Avicennia germinans* en Old Point.

Estas diferencias estructurales de los manglares de los dos ambientes Caribe y Pacífico colombiano fueron documentadas en investigaciones realizadas en bosques de manglar de San Andrés y Tumaco (Gomez Garcia, 2024; Quintero, 2025). En la zona de estudio de Bocagrande documentaron las especies presentes son *Rhizophora mangle* y *Pelliciera rhizophorae*, y en Old Point *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* y *Avicennia germinans*. (Tabla 2). La especie en común en las dos zonas es *R. mangle*, que de acuerdo con la zonación de especies de manglares en el gradiente de salinidad, se ubica las zonas estuarinas bajas (Costa et al., 2015), siendo el diámetro de altura al pecho (DAP) promedio de los árboles de Bocagrande 21,85% mayor que el promedio de los árboles de Old Point.

Tabla 2. Variables estructurales características de los bosques de manglar de las zonas de estudio. Datos de Bocagrande tomados de Gomez Garcia, (2024), y de Old Point de Quintero, (2025)

	Especie	DAP promedio (cm)	Densidad (ind. ha ⁻¹)	Área basal (m ² ha ⁻¹)	n
Bocagrande	<i>Rhizophora mangle</i>	31.11±1.93	450±54.09	43.53±8.97	27
	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	8.71±0.16	150±40.82	0.96±0.27	3
Old Point	<i>Rhizophora mangle</i>	6.8±0.1	2520±2.3	10.9±0.2	170
	<i>Laguncularia racemosa</i>	8.1±0.3	920±1.7	6.3±0.3	104
	<i>Avicennia germinans</i>	8.8±0.8	215±0.5	1.7±0.2	26

1.2 Respuesta del manglar ante forzantes ambientales

Debido a la sensibilidad de los ecosistemas de manglar a los ciclos y la variabilidad climática (Friess *et al.*, 2019), su distribución, cobertura y productividad a escala local y regional están influenciadas por factores abióticos (Hickey *et al.*, 2021; Raw *et al.*, 2019; Ghosha *et al.*, 2020). En 2020, la superficie de manglares en América del Sur se estimaba en 21.400 km², con una pérdida de 894 km² y una ganancia de 913 km² entre 2000 y 2020, siendo la retracción o expansión natural los principales factores de cambio en la cobertura (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023). En Colombia, según Global Mangrove Watch (2024), la superficie de manglares era de 2.807,54 km² en 2020, cubriendo el 56,14% de la línea de costa del país. Entre 1996 y 2020, la cobertura de manglares mostró una disminución predominante, con una reducción de 72,69 km².

Estos cambios en la cobertura de los manglares pueden entenderse como una respuesta adaptativa a fenómenos que ocurren en la hidrósfera, litosfera y atmósfera (Spalding *et al.*, 2014). Factores terrestres, atmosféricos y marinos influyen en la dinámica del ecosistema. El oleaje, por ejemplo, es un forzante dominante en muchas zonas costeras, impactando la circulación, el transporte de sedimentos y la modelación de las costas (Restrepo López *et al.*, 2009; Babanin *et al.*, 2019). La propagación de ondas genera fluctuaciones del nivel del agua y de la presión, que junto con las corrientes locales y aceleraciones (Pokhrel *et al.*, 2021), afectan los manglares. Su respuesta depende de factores biofísicos como las especies, la estructura del bosque, la densidad, el ancho del bosque y la edad de los árboles, lo que influye en su altura, diámetro de tronco y desarrollo de raíces (Friess *et al.*, 2022).

Otro factor clave en la variabilidad de estos ecosistemas es la temperatura superficial del mar y su relación con fenómenos climáticos globales como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), la variabilidad climática interanual más prominente en la Tierra con grandes consecuencias ecológicas y sociales (Yu *et al.*, 2021) por sus remotas teleconexiones

(Webb y Magi, 2022). Los eventos asociados con El Niño generan impactos masivos, por lo que las observaciones y pronósticos son fundamentales para anticipar respuestas a las fluctuaciones climáticas. Las variaciones en la presión del nivel del mar (SLP) y la temperatura, vinculadas a ENOS, afectan sistemas marinos y terrestres a nivel global (Ward *et al.*, 2016). En las costas del Pacífico Oriental, por ejemplo, El Niño provoca erosión generalizada, mientras que La Niña genera eventos climáticos extremos, como sequías en América del Sur e intensas lluvias en Australia, que pueden resultar en acumulación de sedimentos (Vos *et al.*, 2021).

La relación entre ENOS y los cambios en la cobertura de manglares ha sido documentada en varias regiones. En el noroeste de Australia, se ha encontrado que la reducción del dosel de los manglares coincide con períodos de SOI (*Southern Oscillation Index*) negativo, indicativos de El Niño (Hickey *et al.*, 2021). En el delta del río Guayas, en Ecuador, los extremos climáticos relacionados con ENOS y el aumento del nivel del mar pueden provocar la muerte regresiva de los manglares por inundación excesiva, mientras que La Niña puede generar condiciones más secas y salinas (Pelckmans *et al.*, 2023).

ENOS también influye en la descarga de sedimentos en la desembocadura de cuencas andinas occidentales (Morera *et al.*, 2017). Este flujo de sedimentos es el más relevante en el sistema terrestre, ya que determina la evolución morfológica de los litorales. La advección horizontal del agua dulce define la forma y características de la pluma del río, afectando la distribución de sedimentos a lo largo de la costa (Vundavilli *et al.*, 2021). La morfología costera es controlada por la interacción de factores atmosféricos, oceanográficos, litológicos y geológicos, los cuales regulan la transferencia de nutrientes a los océanos, la dinámica de los ecosistemas costeros (Restrepo López, 2014) y el equilibrio de las relaciones entre organismos vivos (Restrepo-López *et al.*, 2015).

Estos procesos morfológicos costeros son determinantes en la colonización, el crecimiento y la recuperación de los manglares ante estos forzantes, porque estos procesos biológicos dependen exclusivamente del proceso de arraigamiento de los propágulos, y este está determinado por el tiempo de reclutamiento de las plántulas, la colonización por nuevas plántulas y el crecimiento vegetativo de las plantas vecinas (Proffitt *et al.*, 2006). Cuando el entorno costero favorece la colonización de vegetación halófila, determinada por la elevación del lecho, el régimen de inundación y la intensidad de los forzantes

hidrodinámicos, los manglares pueden asentarse y desarrollar sus hábitats. Este proceso genera un efecto bidireccional, en el que las interacciones biofísicas con procesos hidromorfodinámicos generan retroalimentaciones biomorfodinámicas que afectan la velocidad del flujo, la energía de las olas y la capacidad de transporte y atrapamiento de sedimentos, mejorando la estabilidad del suelo frente a la erosión (Xie, 2022).

Los grandes deltas y estuarios del litoral Pacífico colombiano resultan principalmente de la sedimentación proveniente de la Cordillera Occidental (Posada *et al.*, 2009) y del régimen de mareas semidiurnas, con alturas promedio entre 2 y 4 metros. Se ha estimado una descarga fluvial total al Océano Pacífico de 254 km³ al año y una tasa de transporte de sedimentos en suspensión de 96x10⁶ toneladas por año, con una producción de sedimentos de 1260 t/km² anuales. Los ríos Patía, San Juan y Mira aportan más del 40% de la carga sedimentaria total al litoral Pacífico colombiano (López y Restrepo, 2007).

Estudios en Colombia como el desarrollado por Suárez *et al.* (2015) y en otras regiones por Ward *et al.*, (2016) y Di Nitto, *et al.*, (2014), muestran que la expansión de los manglares marginales se relaciona principalmente con la formación de nuevas tierras disponibles alimentadas por el aumento del aporte de sedimentos fluviales compuestos principalmente por arena, limo, arcilla, grava y material bioclástico, que luego de su deposición, es transportado por olas y corrientes a lo largo o cerca de la costa (Maanan y Robin, 2014). En el litoral de Tumaco, los manglares se ven afectados por procesos erosivos severos que degradan playas, barras y cordones litorales (Corponariño, Ministerio de Ambiente, WWF, 2010), producto de factores geológicos, oceanográficos, biológicos, fluviales y climáticos, además de intervenciones humanas (Posada *et al.*, 2009), como por ejemplo ENOS, que representa un forzante clave en la hidrología y oceanografía de la zona, afectando las tasas de precipitación, los caudales y el nivel medio del mar (Álvarez-Silva *et al.*, 2022).

2. Planteamiento del problema y justificación

2.1 Planteamiento del problema

Los forzantes meteo-marinos, hidrológicos y climáticos y sus implicaciones sobre los litorales, especialmente sobre los bosques de manglar, generan un fenómeno que está fuertemente ligado con las migraciones de su borde costero, pues es determinante para su expansión o pérdida. Este fenómeno está asociado con la erosión costera o retroceso de la costa por pérdida de tierras debido a la remoción neta de sedimentos costeros.

La erosión costera es un fenómeno natural impulsado por la acción de factores hidrológicos, oceanográficos y geológicos (lluvias fuertes, olas y corrientes, desgaste masivo en pendientes y hundimientos); con episodios significativos asociados a fenómenos climáticos extremos, tsunamis y acciones humanas como construcción de estructuras costeras, dragado, extracción de arena, regulación de ríos, entre otros. Muchos accidentes geográficos costeros experimentan naturalmente ciclos cuasi periódicos de erosión y acreción en escalas de tiempo de días a años; esto es especialmente evidente en accidentes geográficos arenosos como playas, dunas y entradas a lagunas abiertas y cerradas de forma intermitente en los que el transporte de sedimentos fuera de la costa no está equilibrado ([United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2017](#)).

Comúnmente, los estudios de erosión/acreción se llevan a cabo a partir del análisis de las geoformas como playas de arena y acantilados, en los que se cuantifican las pérdidas y ganancias de terreno con relación a los forzantes hidrológicos, atmosféricos, climáticos, oceanográficos y antropogénicos descritos anteriormente ([Omuombo, et al., 2013](#); [Hari Prasad y Kumar, 2014](#); [Jackson y Short, 2020](#)). Sin embargo, es importante considerar que

estos forzantes también afectan las coberturas presentes en los litorales, y estas a su vez, benefician o afectan a las geoformas que las sostienen.

En este sentido, los manglares son un grupo de plantas colonizadoras que pueden consolidar rápidamente sedimentos intermareales estables y recién depositados, promoviendo más sedimentación gracias a su sistema radicular que atrapa sedimentos (raíces aéreas en forma de zancos en el caso de *Rhizophora mangle* y neumatóforos o raíces que crecen hacia arriba en el caso de *Avicennia germinans*). Aunque los manglares no impiden que las zonas costeras sufran erosión, su presencia y su compleja estructura, ralentiza ese proceso (Blasco *et al.*, 1996). Este estrecho vínculo entre la geomorfología y el manglar puede acarrear cambios significativos en escalas temporales cortas en respuesta a procesos costeros y suministro de sedimentos. Es posible detectar estas interacciones a partir de datos satelitales de varias fechas, observaciones de campo y/o datos provenientes de sensores remotos con el fin de detectar y cuantificar cambios costeros (Souza Filho *et al.*, 2006) y aportar al análisis de vulnerabilidad ante erosión.

La presente investigación analiza el papel mitigador de erosión costera provisto por los bosques de manglar, a partir de los cambios de posición de su frente, como respuesta a factores meteomarineros (oleaje), climáticos (El Niño Southern Oscillation) e hidrológicos (caudal de río) forzantes de cambios costeros. El cambio espacial del bosque de manglar es identificado a través de técnicas de percepción remota y de fotointerpretación. Capturar un registro de estas condiciones en diferentes momentos para la identificación y caracterización de cambios a lo largo del tiempo, es una de las aplicaciones más importantes de la teledetección a través de imágenes provenientes de sensores remotos (Lillesand *et al.*, 2015). La fotointerpretación de imágenes ópticas, con rangos del espectro electromagnético visibles por el ojo humano (Carbonneau y Piégay, 2012) permite el análisis la biomorfodinámica, así como del complejo comportamiento del frente costero en áreas influenciadas por diversos factores externos (Klemas, 2012).

2.2 Justificación

Las variaciones mundiales de la cobertura de bosques de manglares se deben a múltiples factores globales y locales que alteran rápidamente la estructura y función de estos ecosistemas y su capacidad para proporcionar bienes y servicios esenciales (Maina *et al.*, 2021). Estadísticas mundiales sobre extensiones, ganancias y pérdidas de manglares muestran que a nivel mundial, desde 1996 hasta 2016, los manglares han sufrido pérdida de un área de 8.437 km², aproximadamente un 6.6% en un periodo de 20 años, y un estimado de 1,389 km² de manglar se han identificado como zonas degradadas (Worthington y Spalding, 2018). Otros estudios establecen que la pérdida fue aún más alarmante entre 1980 y 2005, con un 19% (Beck M. W., 2014). Se calcula que Asia, Sur América y Norte América, regiones en donde se encuentran los manglares más extensos y mejor desarrollados del mundo, han sufrido las mayores pérdidas (Maina *et al.*, 2021). La superficie de manglares en América del Sur en 2020 se estima en 21.400 Km² (14,5% de la superficie mundial), y en esta región se presenta estabilidad general entre pérdidas y ganancias en los últimos 20 años (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023).

Se estima que gran parte de las causas de esta degradación obedece a que históricamente las poblaciones y los gobernantes no han valorado adecuadamente estas defensas naturales. Los enfoques convencionales para medir la riqueza se centran en la infraestructura construida (Beck *et al.*, 2018), y esto a su vez, puede derivarse del escaso (y reciente) entendimiento de sus complejos servicios. La pérdida significativa de los manglares tendrá un profundo impacto en las economías nacionales y globales de diversas maneras, principalmente con la escasez de productos pesqueros, aumento de la erosión costera y pérdida de infraestructura (Maina *et al.*, 2021). Solo buenos manejos, producto de una cultura que conduzca a un aprovechamiento sostenible con cuidado y mejoramiento del estado de los ecosistemas, conllevan a un aumento de la cantidad y calidad de los servicios ecosistémicos y por supuesto de los beneficios al bienestar humano y a la economía de las naciones (Prato y Reyna, 2015).

Sin embargo, se han identificado otros forzantes no antrópicos, que generan cambios en los bosques de manglar. Por tener sustratos altamente orgánicos, los procesos biológicos juegan un importante rol en el desarrollo del suelo, y por lo tanto sobre la acreción y el cambio de elevación (McKee, 2010). La posición de estos bosques en un hábitat intermedio entre mar y tierra es altamente variable según las condiciones del suelo dadas por las inundaciones por marea, precipitaciones y variaciones en el nivel que modifica las condiciones hidroedáficas. Estas condiciones rítmicas y dinámicas requieren que los árboles que crecen en estos hábitats intermareales tengan altos niveles de plasticidad (Lovelock *et al.*, 2016). La evaluación de las tendencias de cambios en el frente de los bosques de manglar es necesaria para establecer la magnitud y el alcance de fenómenos forzantes de cambio, identificar los impactos y consecuencias, comprender su naturaleza, y definir un enfoque apropiado para la gestión (Guilherme *et al.*, 2019).

La escasa comprensión de la dinámica cambiante de las interacciones tierra-océano y de los procesos costeros puede derivar en intervenciones humanas incorrectamente planificadas y/o mal gestionadas (Maanan y Robin, 2014) (**Figura 3**). Para incrementar la comprensión de las relaciones entre las variables asociadas a los ecosistemas de manglar y sus características intrínsecas, es necesario entender las interacciones e influencia, así como los procesos bióticos y abióticos que en torno a ellos ocurren, sus causas naturales y antropogénicas, y sus posibles consecuencias, todo desde una perspectiva científica en búsqueda de resolver los problemas complejos y brindar soluciones holísticas a ellos (Santoro *et al.*, 2018). En este sentido, cuantificar y comprender su dinámica y respuestas a factores ambientales que se traducen en procesos de erosión y la acreción costera (Visschers *et al.*, 2022), brinda a las instituciones gubernamentales y a los actores con injerencia en temas marino-costeros, herramientas para implementar medidas necesarias para resolver los problemas asociados al fenómeno y lograr su prevención, mitigación y control costera en el marco de una adecuada gobernanza.



Figura 3. Evidencia de erosión costera en la zona Bocagrande en el municipio de Tumaco, al fondo, el bosque de manglar tras una barra de arena.

2.3 Pregunta de Investigación

Considerando la cobertura de manglar como un bioindicador de vulnerabilidad costera ¿Cuál es la variación de la línea costera de los bosques de manglar del sector Bocagrande, Tumaco, en el litoral Pacífico colombiano ante la acción de variables forzantes meteomarineros, oceanográficos e hidrológicos? y ¿existen diferencias entre estas variaciones ante factores forzantes de vulnerabilidad de ese manglar deltaico representativo del Pacífico colombiano, con respecto a la respuesta de un bosque contrastante ubicado en el Parque Regional Manglares de Old Point en la Isla de San Andrés en el Caribe Colombiano?

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Cuantificar la variabilidad del frente del bosque de manglar y examinar los mecanismos que controlan el proceso de cambio costero del litoral de Bocagrande en el municipio de Tumaco como bioindicador de vulnerabilidad costera ante amenaza de erosión.

3.2 Objetivos Específicos

- a) Calcular las tasas de cambio de posición del frente del bosque de manglar del litoral de Bocagrande, en el municipio de Tumaco.
- b) Determinar la influencia de factores oceanográficos, meteorológicos y atmosféricos, en los procesos de progradación/retrogradación del frente de este bosque de manglar del Pacífico.
- c) Comparar el comportamiento del bosque de manglar del Pacífico colombiano ante factores forzantes de vulnerabilidad, con un bosque contrastante del Parque Regional Manglares de Old Point en la Isla de San Andrés en el Caribe Colombiano.

4. Materiales y métodos

4.1 Área de estudio

El estudio se realizó en bosques de manglar del sector Bocagrande, en el litoral del municipio de Tumaco, departamento de Nariño en el Pacífico colombiano, y se contrastó con un bosque de manglar ambientalmente diferente en la Isla de San Andrés, en el Caribe colombiano. El primero es un manglar deltaico, influenciado por sedimentos terrígenos y protegido por una flecha costera dinámica bajo un régimen mesomareal; el segundo es un mangle kárstico de borde en costa abierta, hidrológicamente dependiente de las lluvias y la influencia marina con régimen micromareal (**Figura 4**).

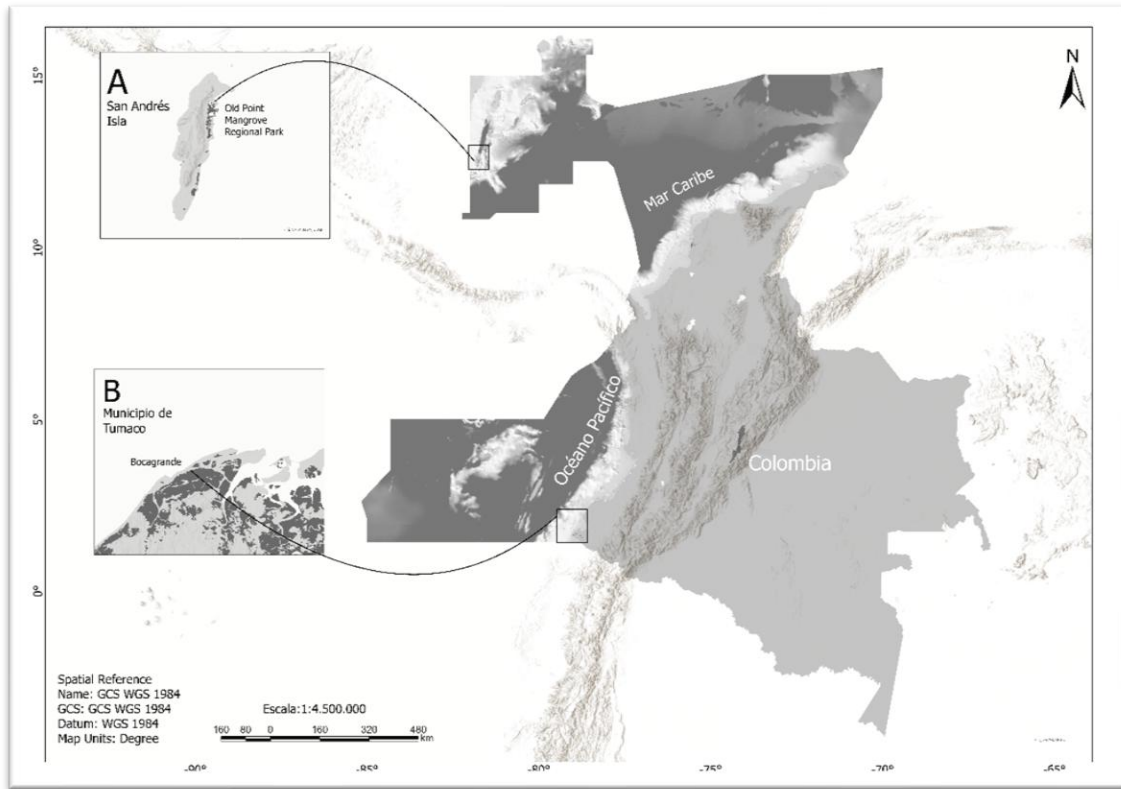


Figura 4. Localización del área de estudio. A. Isla de San Andrés, Caribe insular colombiano. B. Tumaco, Pacífico colombiano

4.1.1 Tumaco, litoral Pacífico colombiano

El municipio de Tumaco se ubica en el departamento de Nariño, al suroccidente de Colombia, en la subregión del Pacífico sur, en dónde se encuentra el segundo puerto marítimo más importante de la costa pacífica colombiana. La climatología de Tumaco es moldeada por diferentes factores océano-atmosféricos que interactúan en la región y promueven la erosión y sedimentación, dando lugar a la formación de diferentes morfologías litorales: Por un lado, durante el primer semestre del año el clima está directamente influenciado por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que genera en esta época la mayor cantidad de precipitación del año (entre 270 y 380 mm). Por otro lado, las macro mareas semi-diurnas, las corrientes y oleaje que entran hacia la bahía provenientes del SW y SSW, transportan sedimentos del río Mira durante la época de lluvias, período en el que presenta su mayor caudal (Niño P. y Oviedo B., 2018). Tumaco

presenta alturas medias de oleaje tipo *swell* proveniente del suroeste que varían entre 0.5 m. y 1.5 m., con periodos que oscilan entre 8 s. y 10 s ([Restrepo López et al., 2009](#)).

La economía de la región costera del Pacífico nariñense se basa principalmente en la agricultura de palma africana y cultivos tradicionales de plátano, yuca, cacao y coco, la pesca, la actividad forestal y el turismo. En Tumaco se concentra gran parte de la oferta hotelera del departamento, debido a sus diferentes paisajes y atractivos naturales que lo caracterizan: ríos, playas, islas, cabos y manglares ([Sánchez Gutiérrez, 2012](#)). La mayoría de los 138.091 habitantes de Tumaco ([Censo Nacional de Población y Vivienda 2018, 2024](#)) tienen una calidad de vida precaria por la falta de servicios públicos, educación, salud, vivienda, agua potable y saneamiento básico, con un índice de pobreza multidimensional – IPM total de 84,50%, y dependen en gran medida de los recursos proporcionados por el ecosistema de manglar, relacionados principalmente con la recolección del molusco bivalvo *Anadara tuberculosa* (piangua) ([Bitácora & Territorio , 2017](#)).

El área de estudio se localiza al sur del casco urbano, en el sector de Bocagrande en las coordenadas 78°50'18,065"W, 1°48'45,318"N, en el área de influencia de uno de los pocos sistemas globales que permanecen aún sin intervención antrópica: el delta del Río Mira ([Monroy L. et al., 2008](#)), cuya superficie subaérea de 520 km² está conformada por planicies intermareales, un frente deltaico y un prodelta ([Restrepo L. et al., 2008](#)), componente geomorfológico es en donde la sedimentación es más alta ([Syvitski et al., 1985](#)).

En Bocagrande el bosque de manglar dominado por *Rhizophora mangle* y *Pelliciera rhizophorae* es de tipo deltaico, de acuerdo con la geomorfología, y de franja riverino, de acuerdo con su fisionomía, y está influenciado por una flecha costera muy dinámica gracias a la acción de las corrientes marinas y la descarga de sedimentos del río Mira. Este río tiene un caudal de 790 ± 456 m³/s con percentiles 10 y 90 de 297 m³s⁻¹ y 1413 m³s⁻¹, con una descarga de sedimentos estimada en 9,7 × 10⁶ t año⁻¹, lo que lo convierte en uno de los más importantes afluentes en la costa del Pacífico de América del Sur. Su geomorfología está dominada por la energía del oleaje y conformada por dos grandes brazos ([Posada et al., 2009](#)) y ocho canales distributarios de 521 m de amplitud en una

longitud de línea de costa de 50 km. La descarga de sedimentos a través de ellos es de $9,77 \times 10^6$ t/año, y un caudal mensual máximo de $3.270 \text{ m}^3/\text{s}$ (López y Restrepo, 2007).

La extensión horizontal de la pluma del río Mira tiene lugar paralela a la costa simétricamente en direcciones norte y sur, ya que la presencia del río genera importantes corrientes hacia la Bahía de Tumaco, transportando los sedimentos que alimentan las playas y barra, protegiendo la cabecera municipal de peligros marinos (Alvárez-Silva *et al.*, 2022).

4.1.2 Isla de San Andrés, Caribe insular colombiano

San Andrés es la isla oceánica más grande del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Catalina, ubicado al noroeste del mar Caribe colombiano y declarado reserva Internacional de la Biosfera por UNESCO en el año 2000. Es una isla kárstica de origen en rocas calcáreas del Terciario y depósitos recientes del Cuaternario, con una precipitación media anual de 1973 mm, y una temperatura que oscila entre 25°C y 30°C con tres períodos distintos: una temporada de lluvias con 80% la precipitación de junio a noviembre, una estación seca de enero a abril y dos meses de transición en mayo y diciembre (Medina-Calderón *et al.*, 2021).

Según el último censo realizado por el (Departamento Nacional de Estadística - DANE, 2024), para el año 2019 la Isla de San Andrés contaba con una población de 42.073 personas dentro de un área de 27 km^2 , lo que significa que tiene la segunda mayor tasa de densidad poblacional del país con 1.558 habitantes por km^2 . La isla y en general el departamento, se sostiene del turismo, el comercio, la administración pública, los servicios básicos, sociales y empresariales; seguidos en menor cuantía por la pesca, la agricultura y la ganadería. En la Isla de San Andrés no hay presencia de arroyos ni ríos permanentes, pero cuenta con dos acuíferos que abastecen de agua a la población (Aguilera Díaz, 2010) y algunos arroyos temporales como Bight, Cove Gully, Salt Creek y Mount Pleasant Cree, que constituyen un factor determinante para el buen desarrollo de los manglares locales (García-Hansen Honkala y Gaviria-Chiquazuque, 1998)

Los manglares en la isla son de tipo costa abierta, de acuerdo con su geomorfología y de borde, de acuerdo con su fisionomía, y se distribuyen en seis zonas: Cocoplum Bay, Sound Bay, Salt Creek, Smith Chanel, El Cove y Parque Regional “Old Point Regional Mangrove Park”, ([Medina-Calderón et al., 2021](#)), cubriendo un área total de 1,51 km² ([Global Mangrove Watch, 2024](#)). La zona de estudio se encuentra dentro Old Point, parque regional declarado mediante acuerdo 027 de 3 de agosto de 2001, localizado al nororiente de la isla de San Andrés en las coordenadas 81°42'3.918"W y 12°33'56.397"N, , para lograr la conservación de los recursos naturales, ampliar los horizontes de educación ambiental, impulsar la realización de actividades de carácter económico como el ecoturismo, producción de artesanías y proyectos productivos de bajo impacto con la participación comunitaria en sus 247,56 hectáreas que albergan diversas comunidades biológicas de bosques de manglar, macroalgas, peces, aves, crustáceos, moluscos, reptiles que habitan en lagunas de aguas saladas y un área importante de bosque seco tropical ([CORALINA, 2024](#)).

En Old Point, los árboles tienen una altura media de 7,9 m y un diámetro medio a la altura del pecho (DAP) de 7,5 cm., siendo las especies dominantes *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* y *Laguncularia racemosa*. Dado que no hay ríos permanentes en San Andrés, el hidroperíodo de este manglar es influenciado principalmente por las mareas y las lluvias ([Sánchez-Núñez y Mancera-Pineda, 2011](#)).

4.2 Metodología

De acuerdo con [Mesarovic \(1968\)](#), la aplicación de la teoría de sistemas en biología se puede evaluar desde dos ángulos: el de los fenómenos ecológicos considerados de forma aislada, y el de sus funciones y estructura si el fenómeno ecológico se considera en conjunto. En este último, es posible abordar las interacciones entre los subsistemas en un mismo nivel, considerando la importancia de las interacciones tanto temporales como espaciales.

En este estudio se abordó el análisis del fenómeno biológico de migración del frente del bosque de *Rhizophora mangle*, de acuerdo con sus funciones y estructura, de forma conjunta con fenómenos reguladores (oleaje, ENSO y caudal de río) como un indicador de vulnerabilidad costera ante el fenómeno de erosión causado por estos fenómenos forzantes. Se utilizaron datos hidrológicos, meteomarineros, oceanográficos y fisiográficos provenientes de fuentes abiertas¹ (**Tabla 3**)

¹ De acuerdo con Unesco ([Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development, 2021](#)), el conocimiento científico abierto y gratuito a publicaciones, datos, metadatos, recursos, programas informáticos y códigos fuente, permite su reutilización, reconversión, adaptación y distribución, incrementando las colaboraciones científicas y el intercambio de información en beneficio de la ciencia y la sociedad, haciendo los conocimientos científicos multilingües abiertamente disponibles, accesibles y reutilizables.

Tabla 3. Características técnicas de datos utilizados para el análisis de respuesta del frente de manglar ante forzantes de erosión costera.

Variable	Fuente	Tipo de dato	Característica	Geo-espacialidad	Resolución espacial	Resolución temporal	Producto derivado
Posición frente de vegetación	Planetscope	Raster GeoTIFF	Bandas RGB, >10 m	Heterogéneo	3 m	Anual	Vector tipo línea
	RapidEye	Raster GeoTIFF	Bandas RGB >10 m	Homogéneo	5 m	Anual	Vector tipo línea
El Niño Oscilación del Sur	Climate Prediction Center NOAA	Serie de tiempo	Media móvil de 3 meses de anomalías de TSM ERSST.v5 en la región Niño 3.4	Homogéneo	No aplica	Mensual	Serie de tiempo de índice ONI en un punto
Oleaje	Climate Data Store Copernicus	GRID Multi-dimensional	Datos de reanálisis de variables oceánicas	Homogéneo	0.5° x 0.5°	Horario	Serie de tiempo de reanálisis en un punto
Caudal	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM	Serie de tiempo	Datos de estación limnigráfica	Homogéneo	No aplica	Diario	Serie de tiempo de variable caudal en un punto

El establecimiento de los propágulos y su conversión en plántulas puede ocurrir en un periodo breve, entre 17 y 30 días, dependiendo de la disponibilidad de nutrientes (Tovilla Hernández y Orihuela Belmonte, 2002). El tiempo entre la dispersión del propágulo y su transformación en árbol joven está regulado por factores climáticos a escala global, regional y local, incluyendo la fisiografía, los tipos de bosque y suelo, los regímenes de mareas, la salinidad y el hidroperíodo (Riascos *et al.*, 2018) con un rápido crecimiento durante los tres a cuatro meses después del reclutamiento, resultado del uso de las reservas de nutrientes almacenadas en el propágulo y la contribución de la fotosíntesis foliar (de Oliveira Lima, *et al.*, 2018). Por esto, los datos de forzantes ambientales se trataron aplicando un promedio móvil de seis meses (Duke *et al.*, 2022; Giri, 2021) con respecto a los periodos de análisis de líneas de frente de vegetación, considerando el

tiempo acomodación o pérdida de sedimentos y el tiempo de mortalidad/colonización de la especie *R. mangle*. (Figura 5).

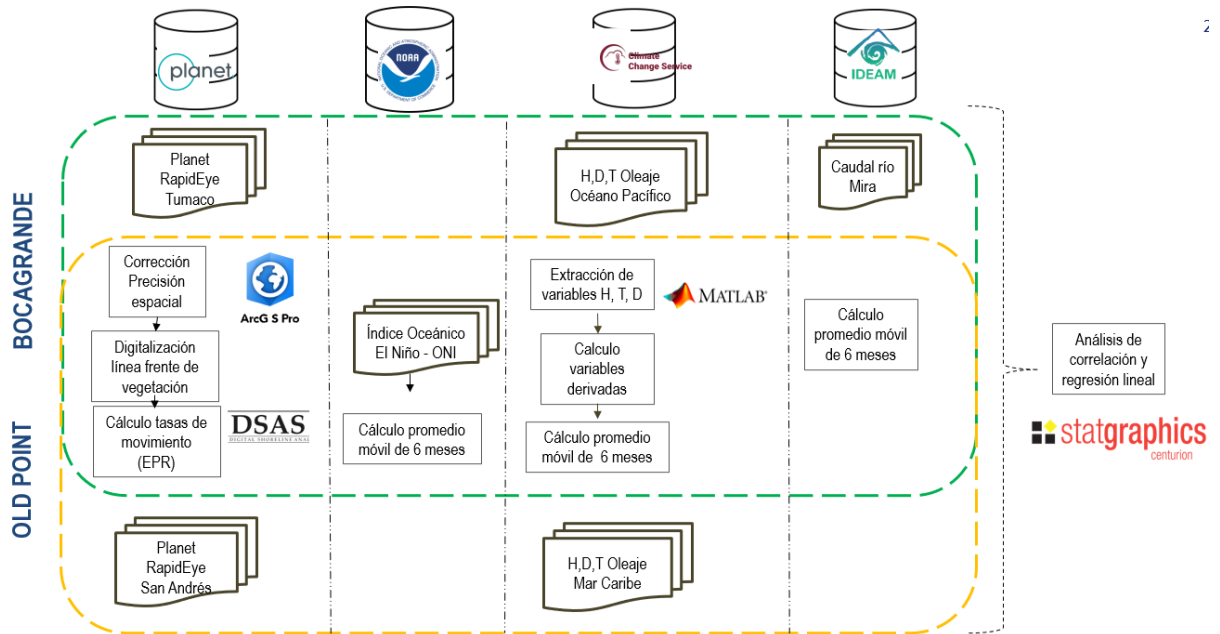


Figura 5. Diagrama de flujo metodológico

4.2.1 Cambios de posición en el frente del bosque de manglar

Técnicas de teledetección se han aplicado ampliamente en mapeo de manglares para estudios de cobertura de especies (e. g. [Everitt y Judd, 1989](#); [Everitt et al., 2008](#); [Islam et al., 2018](#); [Wang et al., 2008](#); [Lucas R. et al., 2002](#); [Tran et al., 2022](#)); estimación de la biomasa aérea (e. g. [Proisy et al., 2003](#)); identificación de estado y salud ecosistémica (e. g. [Green et al., 1997](#); [Thu y Populus, 2007](#); [Tong et al., 2004](#)); entre otros. Dada su disponibilidad constante y bajo costo comparado con otras técnicas, esta tecnología permite realizar monitoreos multitemporales, y en este estudio se aplicó para identificar cambios de posición del frente (hacia el mar) del bosque.

Para la caracterización y análisis de la evolución morfológica y cambios en el frente del bosque de *R. mangle*, se utilizaron imágenes satelitales de los años 2010 a 2023 obtenidas del *Education and research program de Planet* ([Planet, 2023](#)). Este programa ofrece imágenes satelitales ópticas de alta resolución ortorrectificadas de 2016 en adelante, sumadas a imágenes de 2010 a 2014 de la constelación de satélites *Rapideye*, cuyos archivos históricos administra la empresa *Planet* desde su desactivación ([European Space Agency, 2024](#)).

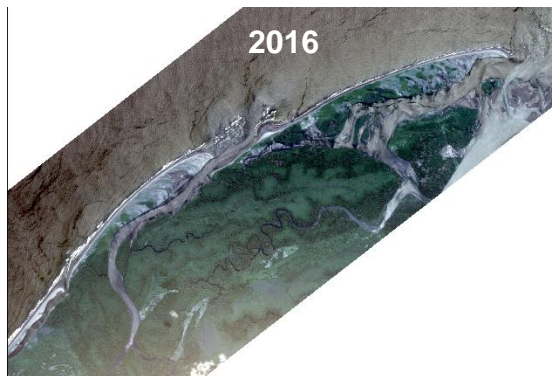
Las imágenes de *RapidEye*, tienen una resolución espacial de 5 m, y las de *PlanetScope* de 3 m, y todo el conjunto corresponde a imágenes pancromáticas multispectrales con las bandas verde, azul, rojo e infrarrojo cercano, con resolución temporal de un día para las zonas ecuatoriales (**Tabla 4**). El nivel de detalle y la exactitud de posición de la línea de frente de vegetación analizada en estas imágenes, depende de la resolución espacial, definida a su vez, por el tamaño de píxel o área cubierta en el suelo y representada por un único píxel. Al usar imágenes aéreas con resolución espacial de 3 y 5 metros, el posible error en la georreferenciación de los detalles fotointerpretados, inicia con estos valores.

Tabla 4. Imágenes de satélite utilizadas en el análisis de cambio de posición de línea de frente de vegetación. Información sobre mareas obtenida de Cartillas de pleamares y bajamares de Pacífico y Caribe proporcionadas por IDEAM

Zona	Constelación de satélites	Resolución espacial	Fecha imagen	Hora captura	Marea	Altura (m)	Hora
Bocagrande Tumaco	Planetscope	3 m	2023/03/17	14:39:04	Bajamar	1,19	17;54
			2022/01/12	15:17:07	Bajamar	1,03	17:52
			2021/04/09	15:20:43	S/l		
			2020/04/02	16:17:20	Bajamar	0,67	16:23
			2019/04/11	15:15:52	Bajamar	0,34	14:02
			2018/05/01	15:07:02	Pleamar	3,20	17:02
			2017/06/23	14:52:19	Pleamar	3,35	15:08
			2016/05/12	16:17:00	Bajamar	0,30	14:15
	Rapideye	5 m	2014/05/12	16:44:44	Pleamar	2,85	14:13
			2013/02/18	16:40:17	Bajamar	0,83	15:42
			2012/02/18	16:43:25	Pleamar	2,65	13:23
			2010/04/20	16:39:27	Bajamar	0,37	13:58
			2023/09/23	15:08:11	Pleamar	0,85	18:27
			2022/09/24	15:16:09	Bajamar	0,34	13:30
Old Point San Andrés, Isla	Planetscope	3 m	2021/09/16	15:07:30	Bajamar	0,31	12:54
			2020/10/03	15:37:02	Pleamar	0,36	14:18
			2019/09/23	15:51:12	Bajamar	0,30	13:18
			2018/08/19	15:28:41	Pleamar	0,36	13:57
			2017/10/11	15:30:59	Bajamar	0,28	16:25
			2016/12/04	19:58:09	Pleamar	0,19	21:01
			2015/02/16	16:39:13	Bajamar	1,18	16:53
	Rapideye	5 m	2014/03/22	16:53:18	Bajamar	2,21	17:51
			2013/01/09	16:58:26	Pleamar	2,56	14:58
			2012/03/13	17:01:59	Bajamar	2,23	18:09
2011/04/18			16:55:05	Pleamar	0,22	17:13	

Una vez seleccionadas las imágenes satelitales, se realizó el procesamiento e interpretación de imágenes mediante la técnica de análisis visual, en la que se identificaron límites entre los elementos frente de vegetación con playas, barras o cuerpos de agua, a través de formas, tamaños, tonos y patrones (Lillesand *et al.*, 2015) (Figura 7 y Figura 6), en cada una de las imágenes multitemporales, vectorizando todos los elementos de la

línea límite entre la vegetación y otro elemento (agua o sedimentos), y a partir de ellas, se realizaron mediciones de cambios posición del frente del manglar.



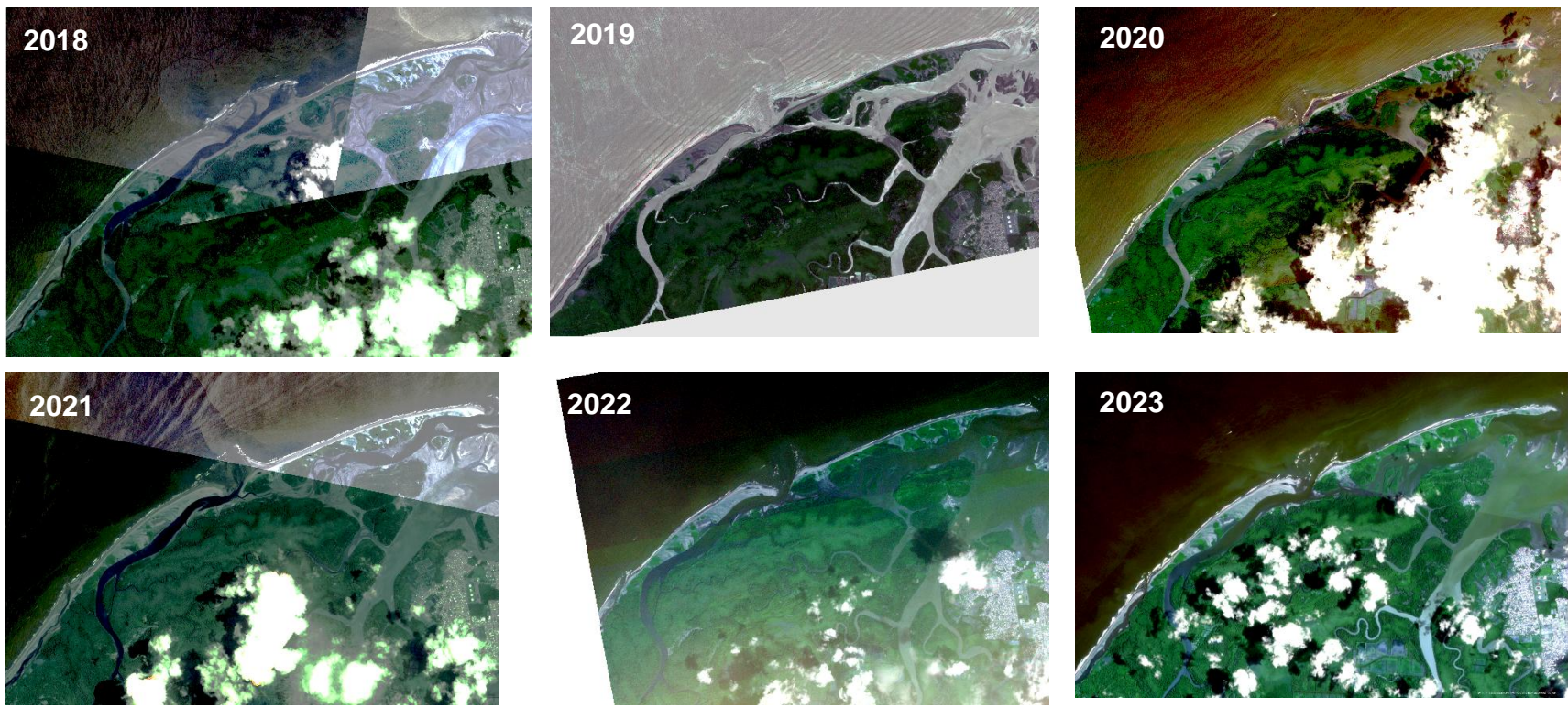
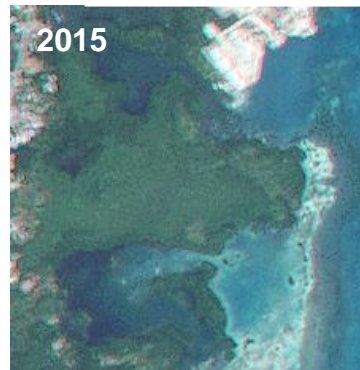


Figura 6. Imágenes satelitales Rapideye (2010, 2012, 2013, 2014) y Planet Scope (2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023) del sector Bocagrande en Tumaco utilizadas para el análisis multitemporal



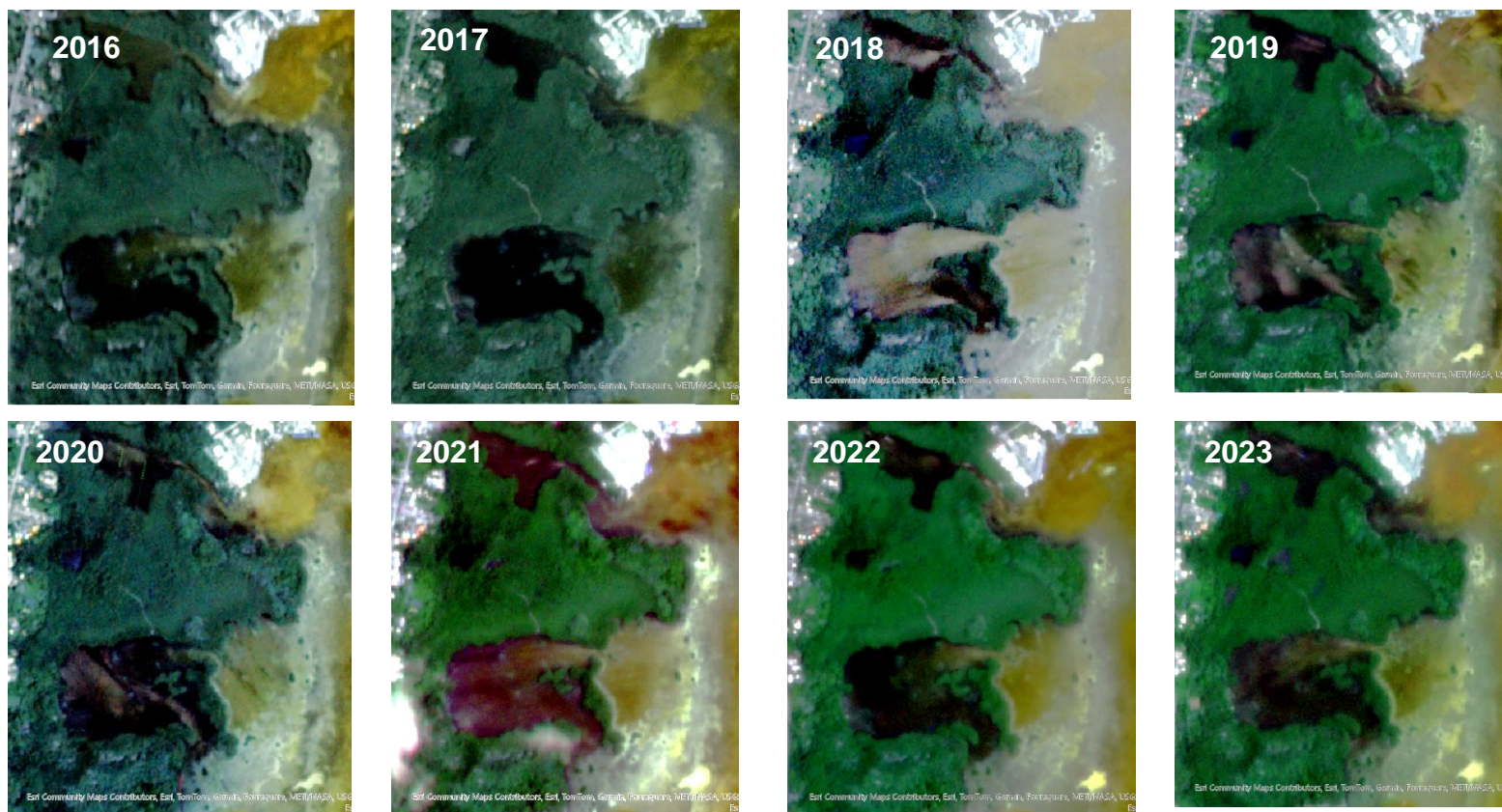


Figura 7. Imágenes satelitales Rapideye (2011, 2012, 2013, 2014, 2015) y Planet Scope (2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023) del sector Old Point en San Andrés Isla utilizadas para el análisis multitemporal

A partir de estas imágenes se realizó el cálculo de cambios en la posición espacial del frente del bosque de manglar en el software ArcMap 10.8. Un método usado para determinar tasas de cambio costero es el de transectos desde la línea de base (Federal Emergency Management Agency. US Department of Homeland Security, 2022) que consiste en la creación de transectos equidistantes perpendiculares a una línea base que sigue la trayectoria de las líneas de costa. Cada transecto intersecta cada una de las líneas de costa y permite medir la distancia en metros entre ellas. Este método se basa en una técnica estadística llamada “tasa de punto final” en la que se divide la distancia entre dos costas por el tiempo transcurrido entre ellas (Figura 8) (Jonah *et al.*, 2016).

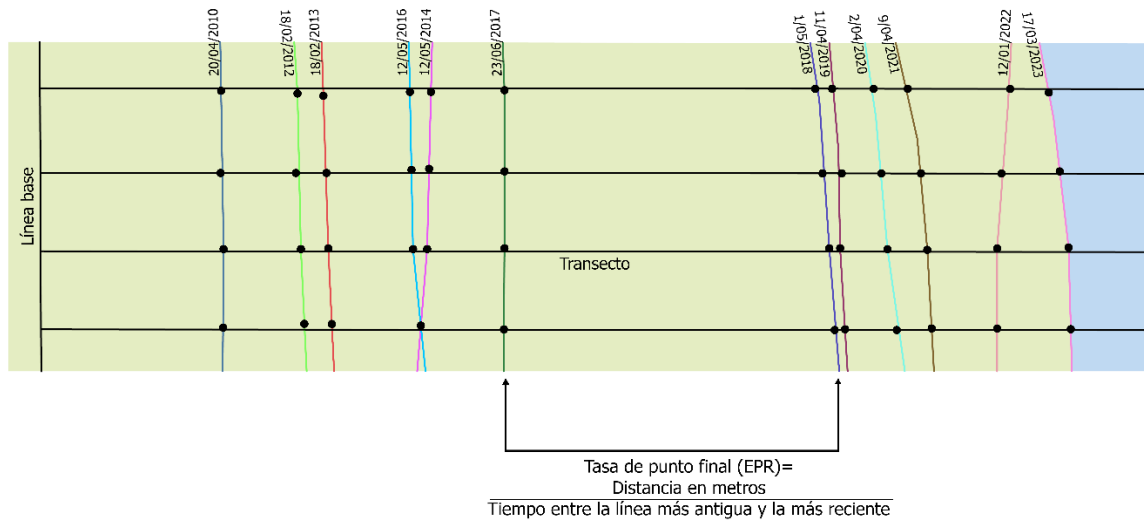


Figura 8. Método de cálculo de tasas de punto final para medir los cambios de posición del frente de manglar. Modificado de (Himmelstoss E., *et al.*, 2021)

Para automatizar la aplicación de esta metodología, se utilizó la herramienta *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)* creada por el U.S Geological Survey, como un complemento del software *ArcGIS Desktop*, para calcular de forma automática las estadísticas de tasa de cambio a partir de una serie temporal de posiciones vectoriales de la costa (Himmelstoss *et al.*, 2021), ampliamente utilizado en estudios de erosión y variabilidad costera (Oyedotun, 2014; Mishra *et al.*, 2020).

4.2.2 Parámetros de oleaje

El conjunto de datos utilizado en este estudio contiene los datos de reanálisis de quinta generación del ECMWF para el clima global durante las últimas ocho décadas denominados ERA5, obtenidos de *Climate Data Store* ([European Commission, Copernicus, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Climate Change Service, 2023](#)). Estos datos están disponibles desde el año 1940 en adelante, con estimaciones horarias de diversas variables, incluidas oceánicas. Se descargaron los datos correspondientes a las variables altura significativa de ola (H) (m), dirección de ola (D) y periodo de ola (T) (s^{-1}), en un punto ubicado entre los límites de coordenadas 1,5°N y 3°N de latitud y 80°W y 78°W de longitud para Tumaco, y 12,1°N y 13°N de latitud y 81,5°W y 80,5°W para San Andrés (**Figura 9**). Los datos se descargaron en formato multidimensional GRIB², y se extrajeron a formato *.txt* mediante una rutina de Matlab (**Anexo A**).

² GRIB es un formato de la Organización Meteorológica Mundial (WMO) para una red o cuadrícula de datos, utilizado por los centros meteorológicos operativos para el almacenamiento y el intercambio. Las principales ventajas de GRIB son que los archivos suelen tener entre 1/2 y 1/3 del tamaño de los archivos binarios normales (flotantes), los campos se describen por sí mismos y GRIB es un estándar internacional abierto ([NOAA, 2024](#)).

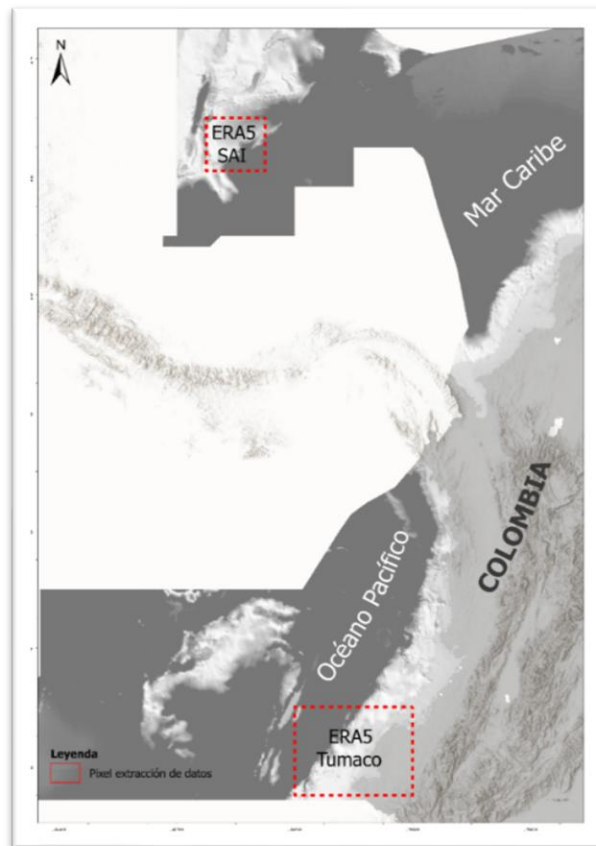


Figura 9. Extracción de variables oceanográficas para las dos áreas de estudio

A partir de estas variables iniciales (H, T, D) se derivaron las variables altura significativa de ola (*SWH*) (m), celeridad de grupo (*C_g*) (m/s) y velocidad de ola (*w_s*) (ms^{-1}) (Mclvor *et al.*, 2011), y se realizó el tratamiento estadístico de los datos. Este consistió en la realización del promedio de los datos horarios correspondientes a cada intervalo de fechas de los análisis de cambio de posición de la línea de vegetación, pero no en los periodos exactos sino moviendo las fechas inicial y final seis meses atrás con respecto a cada periodo, con el fin de hacer el análisis de correlación considerando el tiempo de colonización del manglar (Duke *et al.*, 2022; Giri, 2021) (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)

Tabla 5. Promedios de variables de oleaje extraídas de ERA5 y calculadas para Tumaco para los periodos evaluados aplicando el retraso de seis meses. Altura significativa de ola (SWH), celeridad de grupo (Cg), velocidad de ola (ws), altura significativa de ola (H), dirección de ola (D) y periodo de ola (T)

Periodo	H	T	SWH Y	SWH X	ws	Cg
20/04/2010- 18/02/2012	1,14	7,43	0,24	1,04	0,33	5,79
18/02/2012, 18/02/2013	1,09	7,55	0,18	0,96	0,31	5,88
18/02/2013, 12/05/2014	1,09	7,72	0,15	0,95	0,31	6,02
12/05/2014, 5/12/2016	1,11	8,00	0,12	0,98	0,31	6,23
5/12/2016, 23/06/2017	1,11	7,84	0,19	1,00	0,31	6,11
23/06/2017, 1/05/2018	1,08	7,15	0,15	0,98	0,33	5,57
1/05/2018, 11/04/2019	1,13	7,64	0,10	0,96	0,32	5,95
11/04/2019, 1/04/2020	1,18	7,09	0,43	1,07	0,31	5,53
1/04/2020, 4/09/2021	1,10	7,66	0,06	0,96	0,33	5,97
4/09/2021, 1/12/2022	1,19	7,24	0,48	1,07	0,29	5,64
1/12/2022, 17/03/2023	1,15	7,63	0,26	1,03	0,31	5,95

Tabla 6. Promedios de variables de oleaje extraídas de ERA5 calculadas para la Isla de San Andrés para los periodos evaluados aplicando el retraso de seis meses. Altura significativa de ola (SWH), celeridad de grupo (Cg), velocidad de ola (ws), altura significativa de ola (H), dirección de ola (D) y periodo de ola (T)

Periodo	H	T	SWH Y	SWH X	ws	Cg
18/04/2011, 13/03/2012	1,54	6,47	0,32	-1,35	-0,65	5,04
13/03/2012, 9/01/2013	1,35	6,22	0,32	-1,06	-0,54	4,85
9/01/2013, 22/03/2014	1,40	6,24	0,33	-1,15	-0,58	4,86
22/03/2014, 16/02/2015	1,40	6,21		-1,19	-0,59	4,84
16/02/2015, 4/12/2016	1,53	6,44	0,10	-1,41	-0,68	5,02
4/12/2016, 11/10/2017	1,67	6,60	0,06	-1,52	-0,71	5,15
11/10/2017, 27/10/2018	1,63	6,70	0,24	-1,50	-0,69	5,22
27/10/2018, 23/09/2019	1,56	6,67	0,73	-1,44	-0,67	5,20
23/09/2019, 3/10/2020	1,67	6,76	0,32	-1,48	-0,67	5,27
3/10/2020, 16/09/2021	1,66	6,70		-1,58	-0,73	5,22
24/09/2022, 23/09/2023	1,42	6,29	0,18	-1,31	-0,63	4,90

La Isla de San Andrés está protegida por una barrera coralina de aproximadamente 8,5 kilómetros de longitud, localizada al costado oriental de la isla, rodeándola desde Johnny Cay en la punta norte, hasta el sector de Rocky Cay, a 2,5 kilómetros de distancia de la costa, aproximadamente. Considerando el papel mitigador del oleaje que este ecosistema cumple, al reducir la energía de las olas en un promedio del 97% y disipar alrededor del 86% de su energía (Ferrario *et al.*, 2014), se analizaron los cambios de frente de vegetación en tres sectores de Old Point, uno en la zona norte, protegido por una bahía frente a la estación de guardacostas, otro en la zona centro, paralelo a la barrera arrecifal, y finalmente, uno en la zona sur, frente a Haines Bigth. Asimismo, se realizó un filtrado de datos de oleaje, seleccionando el proveniente del E, SE, S y SW, entre los ángulos 90° a 192.5° de dirección, por ser este el que incide directamente sobre la zona sur del bosque de manglar de Old Point, dada la inexistencia de barrera coralina en ese sector (

Figura 10)



Figura 10. Arrecife coralino y zona de entrada del oleaje sin barrera arrecifal

En este mismo sentido, en la zona de estudio de Bocagrande, Tumaco, se seleccionaron los datos correspondientes a oleaje proveniente del NE, N, NW, W, SW, y S, de las direcciones 45° a 180° (en sentido antihorario), por ser las direcciones incidentes a la línea costera, de acuerdo con su orientación (**Figura 11**).



Figura 11. Ángulos incidentes seleccionados en la zona de estudio del sector Bocagrande

4.2.3 El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)

Los eventos climáticos asociados con El Niño causan impactos naturales y sociales masivos alrededor del mundo, por lo que las observaciones, registros y pronósticos son necesarios para preparar respuestas a las fluctuaciones climáticas. Para esto, se han creado índices que monitorean los eventos ENOS ([van Oldenborgh et al., 2021](#)). Uno de ellos el Índice del Niño Oceánico (ONI) creado en 1990's por Space Weather Prediction Center (NWS) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) ([Webb y Magi, 2022](#)), que monitorea los cambios en la temperatura superficial del mar (TSM) en las zonas tropicales del Océano Pacífico con el fin de pronosticar el inicio y seguimiento del ciclo de vida de los eventos de El Niño, a través las variaciones en las medias corrientes de 3 meses (3-MRM) de TSM en una región del Pacífico central definida como Niño 3.4

(H. Glantz y Ramirez, 2020), ubicada entre las longitudes 170°W-120°W y latitudes 5°S-5°N (Bartholomew y Jin, 2013).

En el sitio Web de ONI de NOAA están disponibles los datos históricos de episodios El Niño/La Niña desde 1950 hasta el presente. El Índice del Niño Oceánico (ONI), se presenta en periodos de tres meses móviles (Diciembre – febrero, enero – marzo, febrero – abril, etc.) basado en períodos base centrados de 30 años actualizados cada 5 años. Cuando se alcanza el umbral durante un mínimo de 5 temporadas superpuestas consecutivas, se representan los periodos de TSM por encima de lo normal en color rojo y los fríos, o por debajo de lo normal, en azul, con base en el análisis Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST). De ONI se obtuvieron los valores correspondientes a los años de estudio (2009-2023)

Tabla 7) (NOAA, 2023).

Tabla 7. Valores del Índice Oceánico del Niño (ONI) de 2009 a 2023 (los números en rojo representan un episodio de El Niño con valor ONI de $\geq 0,5^{\circ}\text{C}$. Los números en azul representan un Niño súper fuerte con una duración de 19 meses). Fuente: (NOAA, 2023). DEF= Diciembre – Enero – Febrero, EFM= enero-febrero-marzo, FMA= febrero-marzo-abril, MAM=marzo-abril-mayo, AMJ= abril-mayo-junio, MJJ= marzo-junio-julio, JJA= junio-julio-agosto, JAS= julio-agosto-septiembre, ASO= agosto-septiembre-octubre, SON= septiembre-octubre-noviembre, OND= octubre-noviembre-diciembre, NDJ= noviembre-diciembre-enero

Año	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2009	-0.8	-0.8	-0.6	-0.3	0.0	0.3	0.5	0.6	0.7	1.0	1.4	1.6
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.0	-1.1	-1.0
2012	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7
2015	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6
2016	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1.0
2018	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8
2019	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5
2020	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-1.2
2021	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-1.0	-1.0
2022	-1.0	-0.9	-1.0	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.9	-1.0	-1.0	-0.9	-0.8
2023	-0.7	-0.4	-0.1	0.2	0.5	0.8	1.1	1.3	1.6	1.8	1.9	2.0

4.2.4 Caudal

Se seleccionó el río Mira como elemento hidrológico forzante de cambios en el litoral, por la posición geográfica y distribución de su delta, del que la zona de estudio de Tumaco hace parte. Este río de 272 km de longitud y 9.530 km² de área de drenaje, nace en el límite entre Colombia y Ecuador, cerca del eje de la cordillera de Los Andes, a 3.350 msnm. El sistema de descarga principal está localizado en cabo Manglares y cuenta con siete distributarios, o esteros, menores al sur y al norte del canal principal que controlan la estabilidad y evolución del litoral en el que desembocan (Restrepo López y Otero Díaz, 2007) (Figura 12).

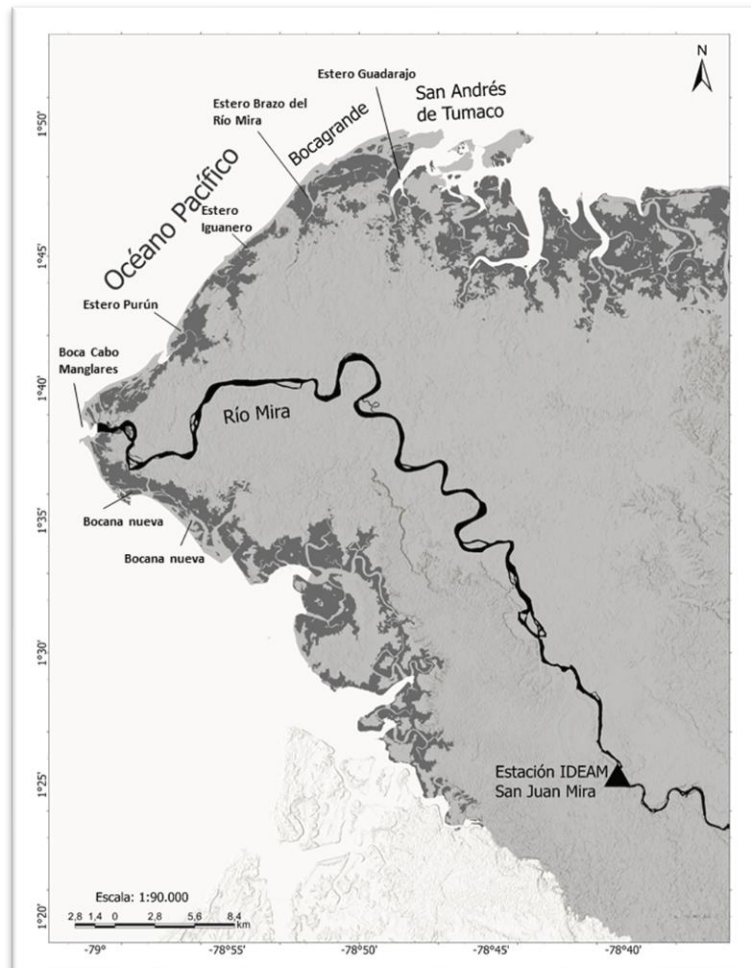


Figura 12. Delta del río Mira y localización de la estación San Juan Mira de IDEAM.

Los datos diarios de caudal medio para el presente estudio se obtuvieron del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), específicamente de la estación limnigráfica³ de tecnología automática con telemetría llamada SAN JUAN MIRA - AUT [51027060], ubicada en la latitud 1.4239 N y longitud 78.6703 W, a 2 m de altitud sobre el nivel medio del mar (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Tabla 8. Valores promedio total del caudal del río Mira con retraso de seis meses.

Periodo	Caudal total (m3)	Caudal medio (m ³ s ⁻¹)
20/04/2010- 18/02/2012	38.102.754.240	441.004
18/02/2012, 18/02/2013	16.927.669.440	195.922
18/02/2013, 12/05/2014	33.288.935.040	385.289
12/05/2014, 5/12/2016	36.502.721.280	422.485
5/12/2016, 23/06/2017	37.210.196.844	430.674
23/06/2017, 1/05/2018	18.060.276.479	209.031
1/05/2018, 11/04/2019	23.105.366.791	267.423
11/04/2019, 1/04/2020	25.626.925.301	296.608
1/04/2020, 4/09/2021	40.205.666.654	465.343
4/09/2021, 1/12/2022	38.737.876.584	448.355

³ Estación para la determinación de caudales por medio de registro gráfico continuo de los niveles de agua.

5. Resultados

Los resultados de la cuantificación de la variabilidad del frente del bosque de manglar en respuesta a los mecanismos que controlan el proceso de cambio costero del litoral de Bocagrande en el municipio de Tumaco como bioindicador de vulnerabilidad costera ante amenaza de erosión, así como la comparación con un bosque contrastante del Parque Regional Manglares de Old Point en la Isla de San Andrés en el Caribe Colombiano, muestran respuestas diferenciales en cada sector. Mientras que en Old Point la variable más explicativa del cambio es el oleaje, con la altura significativa de ola y la velocidad de ola, seguida por ENSO; en Bocagrande lo es la celeridad de grupo de olas, pero en mayor medida, el caudal del río Mira (variable no evaluada en la isla). **Tabla 9.**

Tabla 9. Resultados de correlación entre el cambio de posición del frente del manglar y las variables forzantes ambientales. OP=Old Point, BG=Bocagrande.

	Velocidad de grupo		Velocidad de ola		Altura significativa de ola		ENSO		Caudal	
	p-valor	R ²	p-valor	R ²	p-valor	R ²	p-valor	R ²	p-valor	R ²
OP (centro)	0,57	0,03	0,03	0,47	0,0002	0,83	0,17	0,22		
OP (norte)	0,83	0,004	0,73	0,01	0,05	0,38	0,68	0,001		
OP (sur)	0,79	0,07	0,58	0,03	0,10	0,30	0,65	0,02		
BG	0,06	0,33	0,94	0,06	0,17	0,19	0,16	0,22	0,0045	0,71

A continuación, se presenta la ampliación del análisis de estas respuestas a los forzantes en cada sector:

5.1 Bocagrande, Tumaco

En análisis multitemporal del frente del manglar muestra una alta variabilidad en muy corto plazo, evidenciando la plasticidad que tiene este ecosistema ante variables naturales que inciden en su cobertura espacial (**Figura 13**).

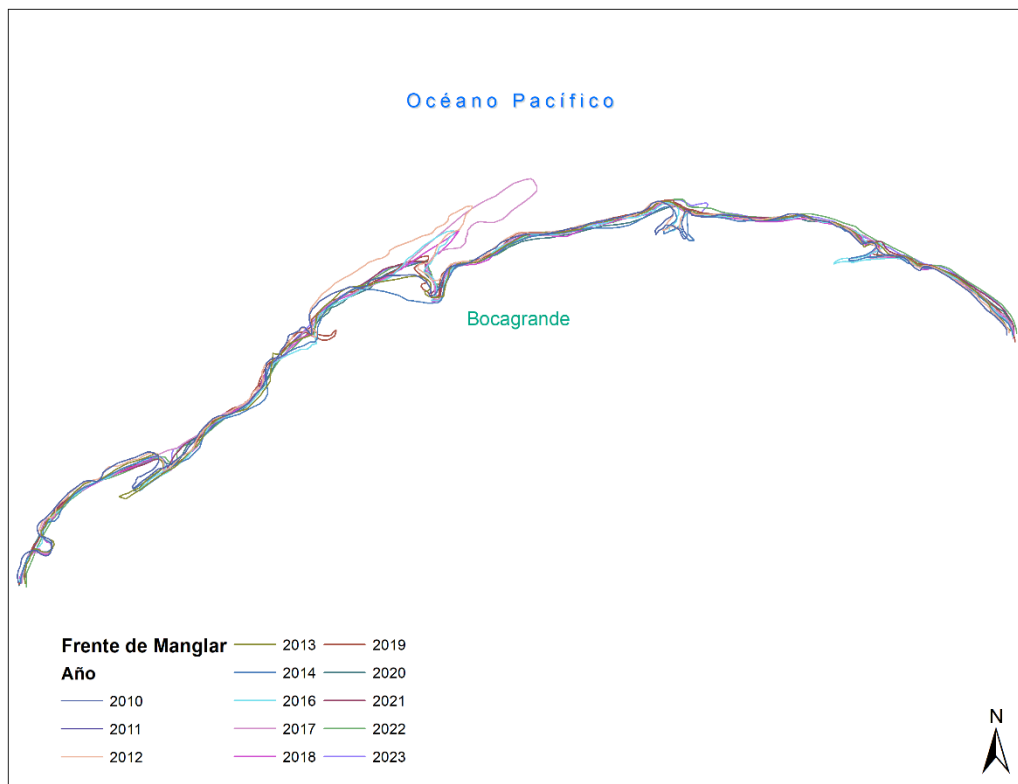


Figura 13. Líneas de frente de vegetación digitalizadas a partir de imágenes de años 2010 a 2023 en el litoral de Bocagrande, Tumaco.

En general, en el periodo de 2010 a 2023, la tasa de cambio de posición en la zona de estudio de Bocagrande en Tumaco fue negativa, con un promedio de $-1,13 \text{ m año}^{-1}$ de retroceso. Sin embargo, al analizar cada periodo anual, la tasa de cambio presentó una gran variabilidad en todos los periodos evaluados, con un máximo de retroceso de frente de manglar de $-19,75 \text{ m año}^{-1}$ entre los años 2017 y 2018, similar al presentado entre los años 2019 y 2020 de $-18,05 \text{ m año}^{-1}$; mientras que los periodos 2014 a 2015 y 2021 a 2022 presentaron la mayor estabilidad y los 2016 a 2017, 2018 a 2019 y 2022 a 2023,

presentaron los mayores avances con tasas de 9,18, 9,93 y 11,69 m año⁻¹ respectivamente. Los resultados de las tasas de punto final totales se presentan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 10. Tasa de movimiento o cambio de posición de frente de manglar calculado para Bocagrande, Tumaco a partir de la posición espacial del frente de manglar en diferentes años. Los valores negativos corresponden a retrocesos del frente de manglar y los valores positivos a avances. La tasa de cambio presentada en cada periodo corresponde al movimiento entre la fecha inicial y final del periodo.

Periodo	Tasa de cambio (m año ⁻¹)
20/04/2010- 18/02/2012	6,20
18/02/2012, 18/02/2013	-10,47
18/02/2013, 12/05/2014	-9,77
12/05/2014, 5/12/2016	0,17
5/12/2016, 23/06/2017	9,18
23/06/2017, 1/05/2018	-19,74
1/05/2018, 11/04/2019	9,93
11/04/2019, 1/04/2020	-18,05
1/04/2020, 4/09/2021	8,46
4/09/2021, 1/12/2022	-0,03
1/12/2022, 17/03/2023	11,69

Analizando la posición de la línea costera, caracterizada a través de la posición de la línea de marea más alta del día de la captura de la imagen, identificada mediante fotointerpretación de la marca de agua sobre el sedimento en una serie de tiempo más amplia, con imágenes aéreas disponibles de los años 1969, 1971, 1985, 1993 e imágenes satelitales de 2012, 2017 y 2021, se encontró también una alta variabilidad de la línea costera, con periodos de avances y retrocesos entre cada par de años analizados (**Tabla 11**)

Tabla 11. Tasas de erosión y/o acreción en el periodo 1969 a 2021 presentados en el sector de estudio de Bocagrande, en las que se muestra la alta variabilidad de la disposición de los sedimentos.

Tasa de cambio costero (ma ⁻¹)	1969-1971	1971-1985	1985-1993	1993-2012	2012-2021
Tasa promedio	19.61	-9.9	0.13	1.55	-0.03

Máxima erosión	-128.2	-24.87	-8.52	-10.42	-22.1
Máxima acreción	147.63	0	8.12	19.06	21.57

Este análisis evidenció que los cambios de la disponibilidad de sedimentos presentan cambios cíclicos, con periodos predominantemente de ganancia, seguidos de periodos de pérdidas, que finalmente afectan de forma directa la permanencia del manglar de colonizar nuevas áreas, o la pérdida de cobertura por la reducción del área disponible de sedimentos que los sustenten (**Figura 14**). Sin embargo, este resultado no se utilizó para el propósito de la presente investigación, dado que las imágenes aéreas históricas disponibles no tenían una resolución temporal constante entre periodos.

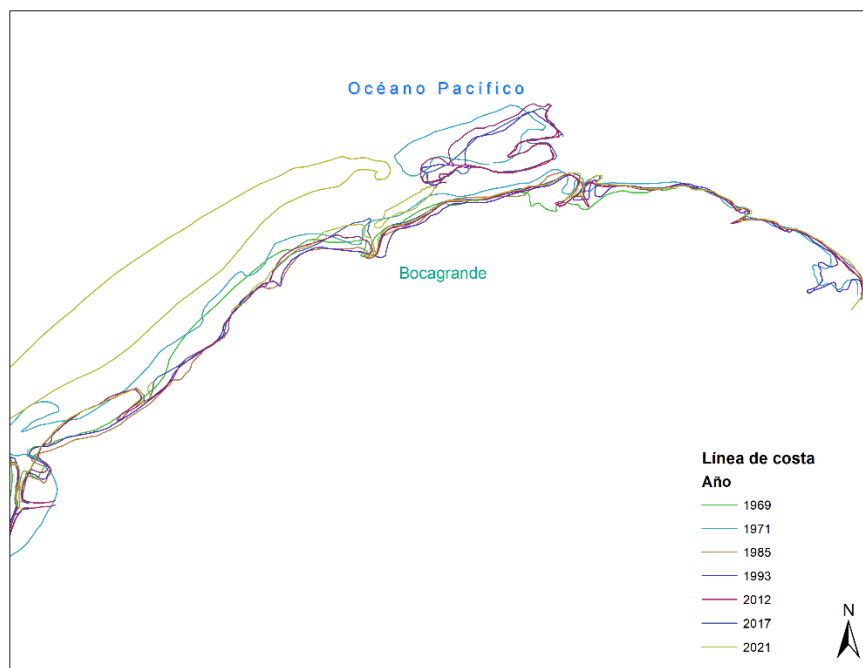


Figura 14. Cambios en la posición de la línea costera (línea de más alta marea del día) en diferentes años entre 1969 y 2021 en el sector de Bocagrande, Tumaco.

Analizando los valores de ONI dados en la **Tabla 7**, se encuentra que los periodos predominantemente Niño con índices $\geq 0,5^{\circ}\text{C}$ fueron julio de 2009 a marzo de 2010, octubre de 2014 a abril de 2016 con 19 meses y

septiembre de 2018 a julio de 2019 con 10 meses y 2023 de mayo a diciembre. De acuerdo con los promedios anuales de caudal del río Mira, el periodo de abril de 2021 a enero 2022, se presentó el caudal más alto con 1.025,46 m³/s, coincidiendo con un año de la fase fría de ENOS (La Niña), que en Colombia, se caracteriza por la ocurrencia de eventos de precipitaciones intensas, crecidas de ríos, avalanchas e inundaciones de planicies, y el caudal más bajo en el periodo de abril de 2009 a abril de 2010 con 634,35 m³/s, coincidiendo con la fase cálida (El Niño), durante la cual ocurren sequías e incendios forestales en la mayor parte del territorio, excepto en la región del Pacífico sur (Sánchez, et al., 2001).

La correlación lineal entre el cambio de frente del manglar en Bocagrande y ENOS arrojó un p-valor de 0,16, lo que indica que no hay una relación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95%. Además, el estadístico R-Cuadrado indica que el modelo ajustado explica 22,44% de la variabilidad en la posición del frente de manglar y el coeficiente de correlación es igual a -0,47, indicando una relación relativamente débil entre las variables (**Figura 15**).

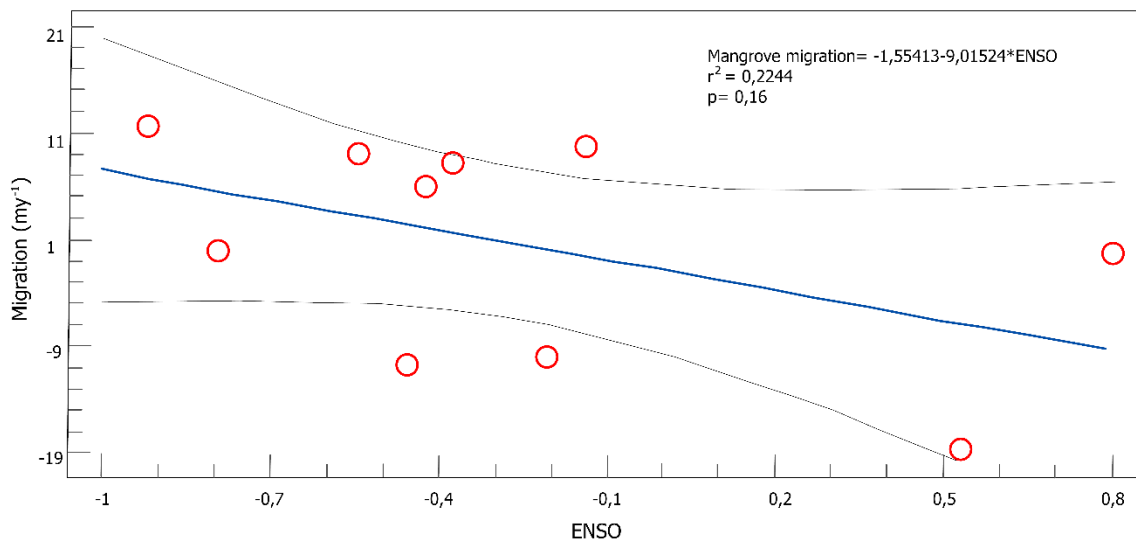


Figura 15. Regresión lineal entre variables ENOS y cambio de posición del frente de manglar para el bosque de Bocagrande.

La regresión lineal entre el cambio de frente del manglar en Bocagrande y el caudal total (m³) del río Mira sí tiene una relación estadísticamente significativa (p-valor= 0,0045). El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo ajustado explica 70,74% de la variabilidad de

la posición del frente de manglar y el coeficiente de correlación es igual a 0,84, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables (**Figura 16**).

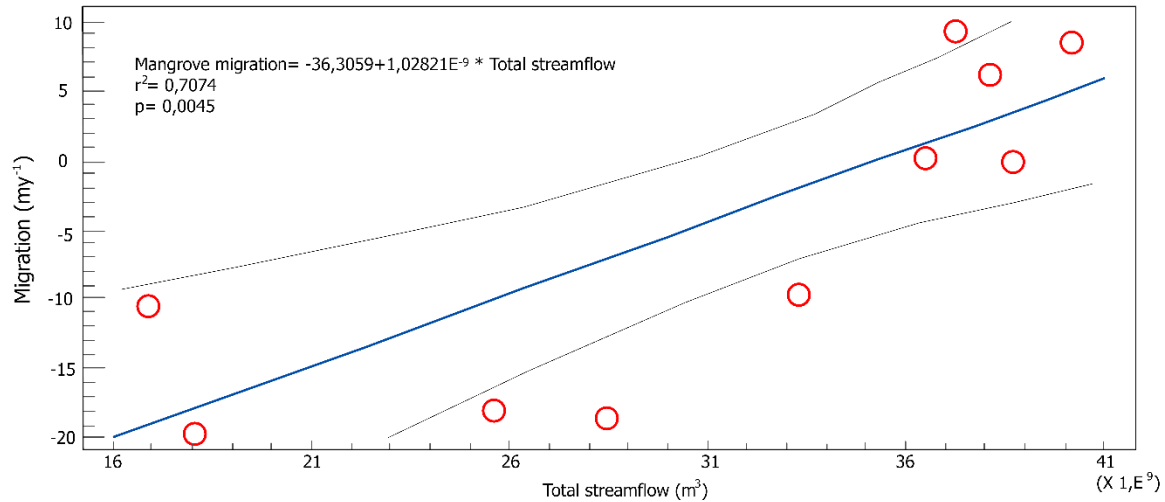


Figura 16. Regresión lineal entre variables Caudal total del río Mira y cambio de posición del frente de manglar para el bosque de Bocagrande.

En cuanto la influencia de la celeridad de grupo, se puede concluir que no hay una relación estadísticamente significativa dado el p-valor=0,06, sin embargo, el R-Cuadrado indica que el modelo ajustado explica 33,54% de la variabilidad en cambio frente manglar y el coeficiente de correlación es igual a 0,06, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables (**Figura 17**).

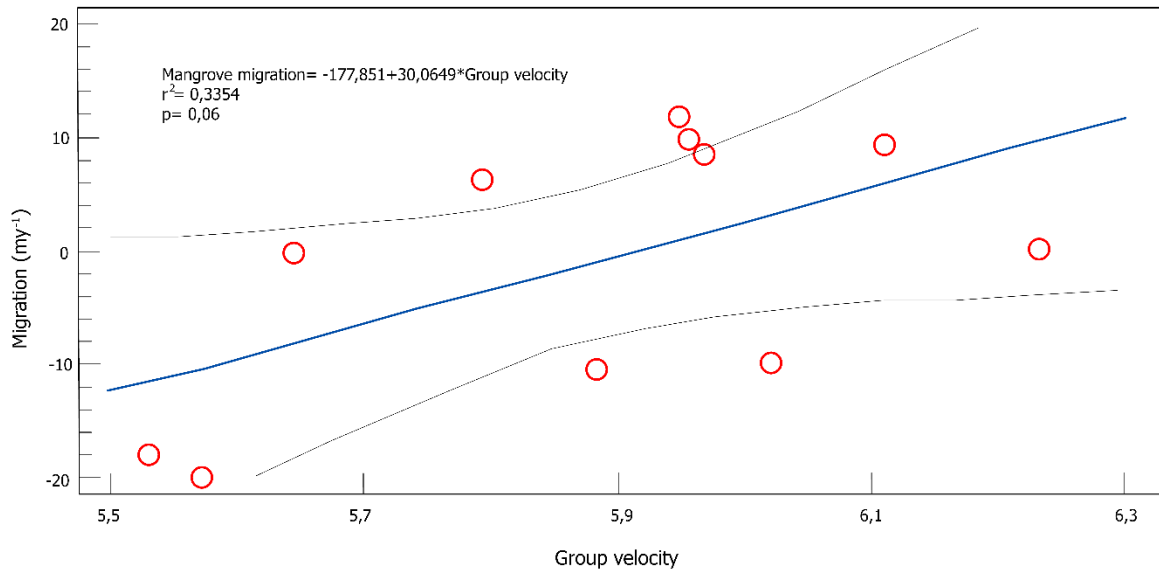


Figura 17. Regresión lineal entre celeridad de grupo y cambio de posición del frente de manglar para el bosque de Bocagrande.

5.2 Isla de San Andrés

Dada la forma del bosque de manglar en Old Point, en la zona de estudio de la Isla de San Andrés se realizaron tres cálculos de cambio para los sectores norte, centro y sur. Como se puede observar en la **Figura 18**, el bosque tiene un costado central completamente expuesto al mar, y dos zonas protegidas en dos pequeñas bahías al norte y al sur de éste. Aquí los resultados fueron similares a Bocagrande en cuanto a la variabilidad en periodos anuales, al parecer, como respuesta a las variables ambientales, pero, a diferencia del Pacífico, en la isla la tendencia general en el periodo de 2011 a 2023 fue de acreción del bosque en los tres sectores, con tasa de cambio positiva de 0,45 m año⁻¹ en el centro, 0,05 m año⁻¹ en el norte y 1,02 m año⁻¹ en el sur; siendo la zona sur la de mayor variación a pesar de estar dentro de una bahía, seguido por el norte, y con la menor variación en el costado central.

Los años en los que se presentó mayor retroceso del bosque, fueron los comprendidos entre 2013 a 2014 y 2022 a 2023 para la zona centro con -6,6 y -6,42 m año⁻¹

respectivamente; 2012 a 2013 en la zona centro con -8.8 m año^{-1} y 2020 a 2021 en la zona sur con $-6,76 \text{ m año}^{-1}$. Las mayores migraciones positivas se dieron en los años 2012 a 2013 para la zona central ($7,57 \text{ m año}^{-1}$), 2020 a 2021 para la zona norte ($10,65 \text{ m año}^{-1}$) y 2012 a 2013 para la zona sur ($6,02 \text{ m año}^{-1}$). Estos resultados muestran que cada sector de un mismo bosque, dependiendo de su orientación con respecto al oleaje incidente o grado de exposición, tuvo variaciones con patrones dispares que no presentaron una tendencia (Tabla 12).

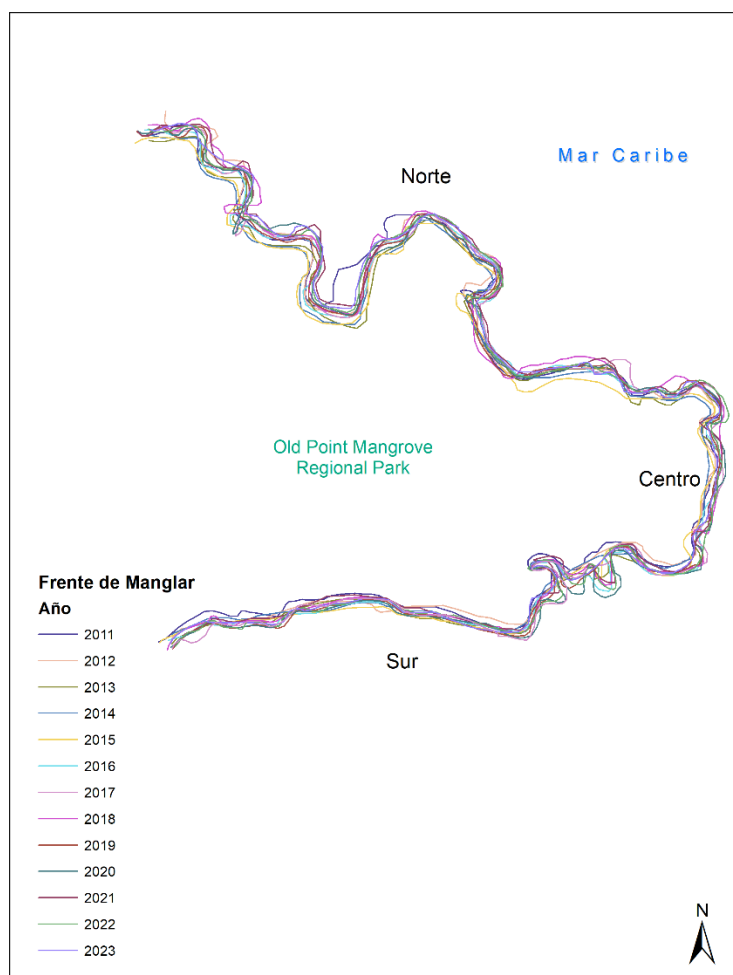


Figura 18. Líneas de frente de vegetación digitalizadas a partir de imágenes de años 2011 a 2023 en la Isla de San Andrés.

Tabla 12. Tasa de movimiento o cambio de posición de frente de manglar calculada para San Andrés Isla a partir de la posición espacial del frente de manglar en diferentes años.

Periodo	Tasa de cambio (m año ⁻¹)		
	Centro	Norte	Sur
18/04/2011, 13/03/2012	-1,82	-0,47	5,66
13/03/2012, 9/01/2013	7,57	-8,80	6,02
9/01/2013, 22/03/2014	-6,6	-1,38	-2,31
22/03/2014, 16/02/2015	6,48	-3,97	5,11
16/02/2015, 4/12/2016	5,74	5,80	-0,59
4/12/2016, 11/10/2017	-0,37	1,78	1,11
11/10/2017, 27/10/2018	2,5	2,25	-3,79
27/10/2018, 23/09/2019	-4,31	-5,65	4,75
23/09/2019, 3/10/2020	4,88	1,76	0,42
3/10/2020, 16/09/2021	-5,51	10,65	-6,76
16/09/2021, 24/09/2022	3,22	-2,82	4,20
24/09/2022, 23/09/2023	-6,42	1,54	-1,59

Los análisis de correlación de la respuesta ante los factores forzantes en Old Point en la Isla de San Andrés, se concentró en el costado central por ser el expuesto directamente al oleaje y, por lo tanto, equiparable a la zona de estudio del litoral de Bocagrande. El análisis de la variable ENOS con respecto tasa de cambio del frente de manglar en el costado central, arrojó un estadístico R-Cuadrada que indica que el modelo ajustado explica 22.1591% de la variabilidad del borde del bosque. El coeficiente de correlación es igual a 0.17, indicando una relación relativamente débil entre las variables. **(Figura 19)**.

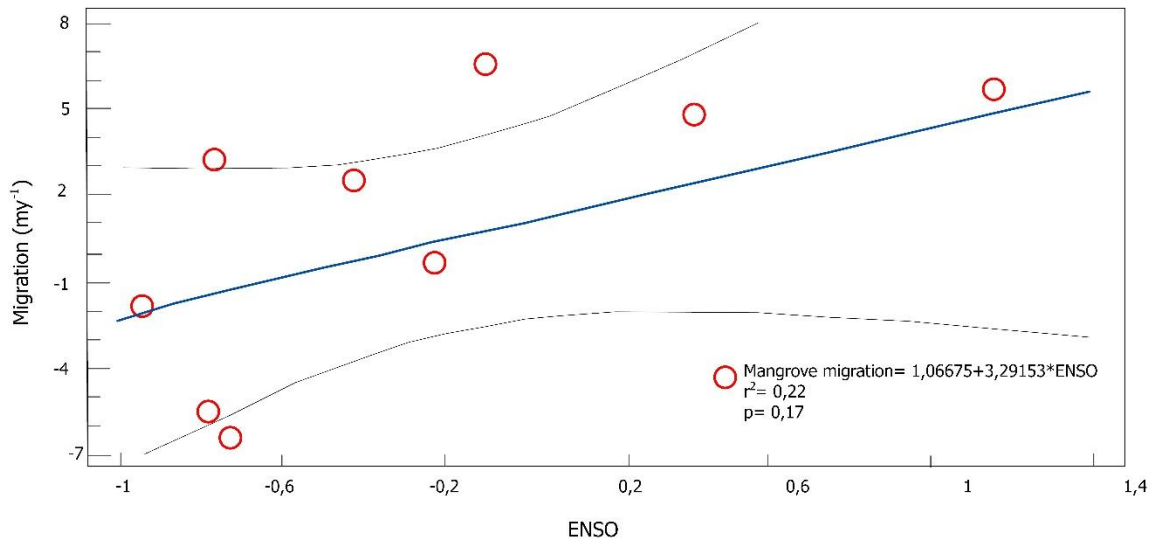


Figura 19. Regresión lineal entre variable ENOS y cambio de posición del frente de manglar (m año⁻¹) para el bosque de Old Point en la zona centro.

Sin embargo, al analizar el cambio total en el frente del bosque (considerando los costados norte, centro y sur) con respecto a la variable ENOS, hay una relación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95,0% (valor-P=0,0217). R-Cuadrado indica que el modelo ajustado explica 50,2596% de la variabilidad del frente de bosque de manglar, y el coeficiente de correlación es igual a 0,70894, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

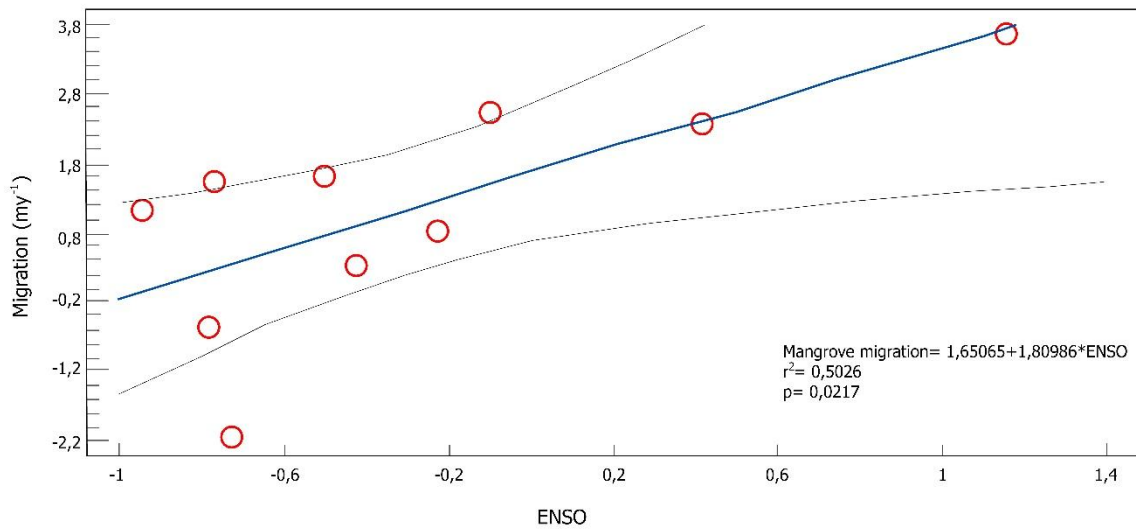


Figura 20. Regresión lineal entre variable ENOS y cambio total de posición del frente de manglar (m año⁻¹) para el bosque de Old Point considerando los costados norte, centro y sur.

Finalmente, la relación entre el cambio de posición del frente de manglar con la altura significativa de ola es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95,0%, con un p-valor=0,0002. El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo ajustado explica 83% de la variabilidad en el costado centro, y el coeficiente de correlación es igual a -0,90, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables (**Figura 21**).

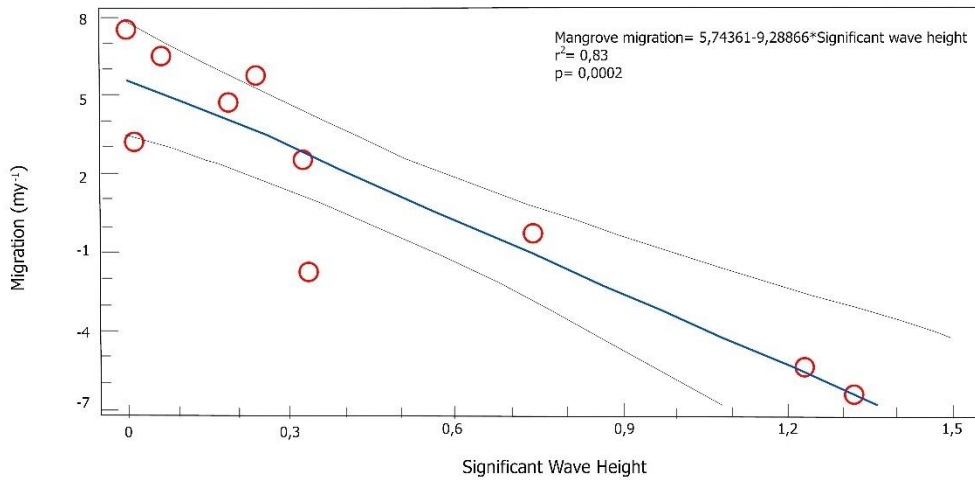


Figura 21. Regresión lineal entre variable de Altura Significante de Ola (SWH) proveniente del sur y cambio de posición del frente de manglar en el costado central del bosque del Old Point (m año⁻¹).

Por su parte, la relación entre el cambio de posición del frente de manglar del costado central con la velocidad de la ola es estadísticamente significativa, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%, con un valor-P=0,03, un R-Cuadrado de 47,18% y un coeficiente de correlación de -0,70, (**Figura 22**).

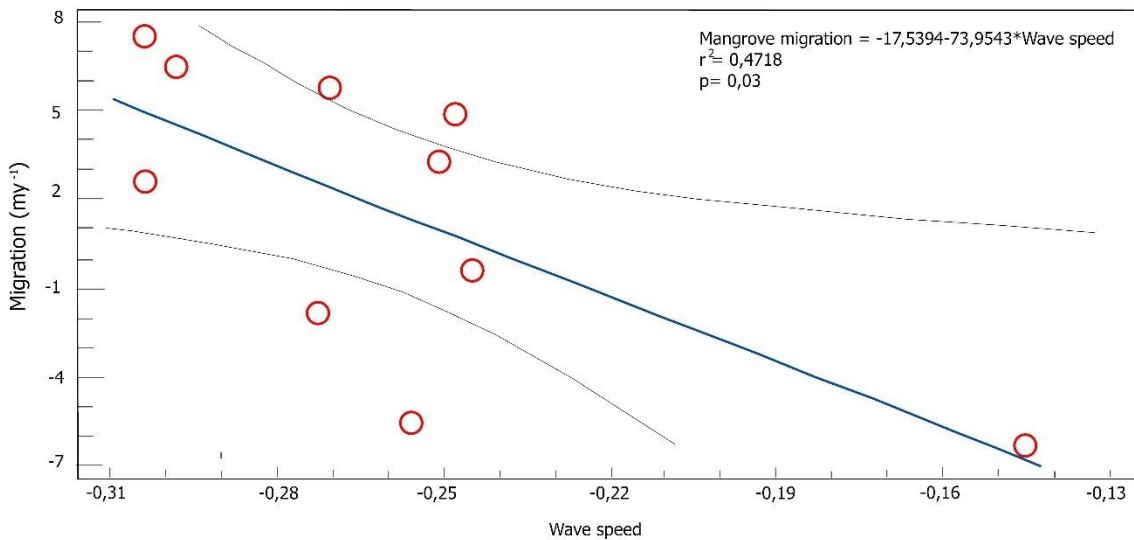


Figura 22. Regresión lineal entre variable de oleaje velocidad de ola (ws) y cambio de posición del frente de manglar (m año⁻¹) para el bosque de Old Point.

En el análisis multivariado se encontró que la altura significativa de ola ($P = 0,0002$) y el fenómeno ENSO ($P = 0,04$) explicaron conjuntamente el 91,1 % de la variabilidad en el cambio del frente de manglar en el sector central de Old Point. La inclusión de la velocidad de ola en el modelo ($P = 0,54$) no aumentó considerablemente su poder explicativo (R cuadrado = 91,7 %). En Bocagrande, por su parte, el poder explicativo del modelo alcanzó el 85,3 % al incluir el fenómeno ENSO ($P = 0,14$), la velocidad de grupo de las olas ($P = 0,14$) y el caudal del río Mira como variables explicativas. Sin embargo, solo la descarga de agua dulce explicó significativamente la variabilidad observada ($P = 0,02$).

6. Discusión

6.1 Variabilidad de la posición espacial del frente del bosque de manglar en respuesta a factores forzantes de vulnerabilidad ante erosión costera

6.1.1 Sedimentos de origen terrígeno

El aporte de sedimentos por los ríos regula el relieve y es una de las variables geomorfológicas más dinámicas del paisaje costero (Hooke, 1977; Gupta y Fox, 1974; Coleman, 1969). Los manglares deltaicos están estrechamente vinculados a sus cuencas, y las contribuciones de agua, sedimentos y nutrientes influyen fuertemente en los procesos de los ecosistemas, así como en la composición, estructura y función de las comunidades biológicas (Poff *et al.*, 2006; Resh *et al.*, 1988). Por lo tanto, considerar los procesos fluviales es fundamental para comprender procesos geomorfológicos como la erosión y la progradación (Hooke, 1979).

En Bocagrande, el mayor retroceso del frente de manglar se produjo durante los períodos en que la descarga de agua del río Mira estaba en su nivel más bajo. Aunque las fuentes, los sumideros y los flujos de sedimentos en los sistemas fluviales son muy variables en el tiempo y el espacio (Trimble, 1999), la reducción de la descarga de los ríos conduce a una disminución de los aportes de sedimentos (Florsheim *et al.*, 2011). Durante el periodo estudiado en este estudio (2010 a 2023), la disminución temporal de la carga de sedimentos del río Mira provocó episodios de erosión costera en su desembocadura, aumentando así la vulnerabilidad de los manglares y la pérdida de cobertura por el retroceso del frente.

La progradación del borde de manglar en la costa de Tumaco depende directamente de la disponibilidad de sedimentos que permitan la colonización de propágulos. El oleaje que distribuye y recibe los sedimentos vertidos por el río Mira, facilita indirectamente el

desarrollo de propágulos y plántulas hasta llegar a juveniles y adultos. En el mismo sentido, la evolución del litoral desde el punto de vista del cambio de posición de los sedimentos muestra que los manglares atenúan el oleaje y sus raíces retienen los sedimentos transportados por las olas, como se reporta en el delta del río Sinú ([Sánchez-Núñez et al., 2019](#)).

Resultados similares se han encontrado en otras áreas del Pacífico, como el sur de Tailandia, donde las costas ubicadas en las desembocaduras de los ríos y en bahías protegidas tienen mayores tasas de expansión del bosque, y las áreas con mayores tasas de erosión ocurren durante los períodos en que se reducen los aportes de los ríos ([Thampanya et al., 2006](#)). La modificación de los ríos puede tener consecuencias catastróficas para los manglares, como se documentó en un sector del Pacífico colombiano al norte de Tumaco, donde aproximadamente 5.200 ha de manglares murieron como resultado de la desviación de agua del río Patía, el más desarrollado en el margen occidental de América del Sur, hacia el río Sanquianga ([Restrepo y Cantera, 2013](#)).

En San Andrés, por otro lado, no existen flujos permanentes de agua superficial, y sólo durante los períodos de lluvias se forman pequeñas áreas de drenaje en el lado occidental de la isla y algunos pequeños canales drenan el lado oriental ([Vargas Cuervo, 2004](#)). Además, la isla corresponde a un entorno geomórfico de costa abierta ([Hubach, 1956](#)), caracterizado por aguas oligotróficas y con pocos nutrientes ([Geister y Díaz, 2007](#)). En estas condiciones, otros factores distintos a la disponibilidad de sedimentos terrígenos son más relevantes, como se analiza en las siguientes secciones.

La expansión de los manglares de aguas abiertas en San Andrés no está relacionada con la formación de nuevos terrenos disponibles, los cuales se alimentan de un aumento en el aporte de sedimentos alóctonos de origen fluvial, antropogénico o marino somero, como en el caso de Tumaco otras áreas del Caribe continental colombiano, como el Golfo de Urabá ([Suárez et al., 2015](#)). La expansión de los manglares en San Andrés puede atribuirse al transporte de sedimentos esqueléticos de origen coralino, sedimentos no esqueléticos compuestos por granos producidos por precipitación de carbonatos inducida fisicoquímicamente y en mucha menor medida a sedimentos derivados de fuentes terrestres.

El predominio de la erosión sobre la progradación en Bocagrande en términos de magnitud (34% mayor), pero no en términos de número de eventos (cinco versus seis), indica que mientras los procesos de retroceso de la vegetación pueden ocurrir en períodos de tiempo muy cortos, como días, los procesos de colonización y desarrollo requieren meses o incluso años ([Teutli-Hernández et al., 2020](#)).

6.1.2 ENOS

Según el caudal promedio anual del río Mira, el período comprendido entre abril de 2021 y enero de 2022 presentó el mayor caudal con $1.025,46 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, coincidiendo con un año de la fase fría del ENOS (La Niña). En Colombia, esta fase ENSO se caracteriza por la ocurrencia de intensos eventos de lluvias, inundaciones de ríos, avalanchas e inundaciones de llanuras en las zonas andinas y caribeñas. El menor caudal del río Mira se presentó entre abril de 2009 y abril de 2010 con $634,35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, coincidiendo con la fase cálida del ENOS (El Niño), durante la cual ocurren sequías e incendios forestales en la mayor parte del territorio, excepto en la región del Pacífico sur ([Sánchez, et al., 2001](#)).

A pesar de las tendencias encontradas entre las fases de ENSO y el cambio del frente de manglar en este estudio y en los resultados de otros estudios, la regresión lineal estacional entre el índice ONI y los caudales diarios del río Mira mostró que ENSO no tiene una relación significativa con la descarga de agua dulce del río Mira. La falta de una fuerte correlación entre ENSO y la descarga del río Mira ($P\text{-valor}=0,71$, $R^2= 0,0171$) sugiere que otros factores de variabilidad climática no evaluados en este estudio podrían contribuir a la variabilidad hidrológica del río, es decir, procesos climáticos y oceanográficos de baja intensidad, como la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO) o anomalías de la presión superficial del mar (SLP), como se ha encontrado en el Magdalena ([Restrepo López, 2014](#)), Amazonas ([Amarasekera et al., 1997](#)), Ríos Orinoco, Sao Francisco y Tocantins ([García y Mechoso, 2009](#)). Es probable que, en el presente estudio, la correlación directa entre las tasas de cambio del frente de vegetación de Bocagrande y el índice ONI fuera débil, incluso considerando el acoplamiento relativamente retrasado de ENOS.

Los resultados opuestos encontrados en la asociación entre ENOS y cambios en el frente de manglar entre Tumaco y San Andrés sugieren mecanismos diferentes. En el bosque de manglar de aguas abiertas de San Andrés, la fase fría de ENOS provocó un retroceso del

frente de manglar, mientras que en Tumaco hubo una tendencia a la progradación, esto debido al aumento de las precipitaciones en la zona Andina y Caribe del País, que por un lado, incrementan el caudal y el transporte de sedimentos del río Mira que aporta sedimentos terrígenos en suspensión, y por otro, humedece los sedimentos de origen carbonatado de la isla de San Andrés, creando condiciones más favorables para la erosión por las olas.

Se encontró una respuesta similar en el delta del río Atrato, con períodos de erosión seguidos de progradación coexistiendo en diferentes regiones, con un acoplamiento tardío a las transiciones entre las fases de La Niña y El Niño, pero más fuertemente asociado con ciclos estacionales secos/lluviosos, con picos de erosión que a menudo ocurren en estaciones secas (Vásquez-Salazar *et al.*, 2024). En el Golfo de Carpentaria, describieron que los manglares son más vulnerables durante las condiciones de El Niño debido a la reducción de las precipitaciones (Duke *et al.*, 2022). La migración de manglares en respuesta a la fase de El Niño de ENOS encontrada en Tumaco es consistente con la encontrada por Vos *et al.* (2021) en playas arenosas de la cuenca del Pacífico. En dicho estudio, las tasas de erosión predominaron durante los períodos de El Niño en las playas del oeste de América del Norte, América del Sur, Japón y las islas hawaianas.

6.1.3 Oleaje

La energía de las olas es uno de los principales impulsores de la erosión en ambientes de manglares privados de sedimentos (Sánchez-Núñez *et al.*, 2019), debido a que esta incide en la deriva litoral de dos maneras: la primera es en el transporte de sedimentos en suspensión cuando estos están disponibles, y la segunda, en remover los sedimentos del suelo y, por lo tanto, generar erosión si no hay sedimentos suspendidos disponibles. Así, el comportamiento de la relación ola-sedimento es diferente en las dos áreas de estudio debido a la disponibilidad, origen y propiedades de sus sedimentos.

Las variables de las olas fueron un factor clave en los cambios del frente de los manglares en ambas áreas de estudio. En Tumaco, dada la alta disponibilidad de sedimentos que aporta la descarga del río Mira; a mayor velocidad del grupo de olas, mayor es la acumulación de sedimentos que favorecen la colonización de *R. mangle*. Estos diferentes comportamientos entre los bosques del Caribe y el Pacífico son consistentes con los resultados encontrados por Sánchez-Núñez *et al.* (2019) en el bosque de manglares del

delta del río Sinú en el Caribe continental colombiano: la energía de las olas bajas desencadenó la acreción, mientras que la energía de las olas relativamente alta provocó la erosión en los manglares.

En San Andrés, el oleaje tuvo mayor relación con los cambios de frente de bosque, en comparación con el resultado obtenido en el Pacífico, ya que mayor velocidad y altura de las olas generaron retrocesos del frente de manglar en el sitio anterior. La energía de las olas es uno de los principales impulsores de la erosión en ambientes de manglares privados de sedimentos (Sánchez-Núñez *et al.*, 2019). El impacto de las olas genera una pérdida de partículas finas poco densas y una acumulación de las partículas más gruesas y pesadas, pero dichos cambios dependen de las propiedades físicas de los sedimentos como masa de grano, densidad, tamaño, morfología, etc., y del sedimento en su conjunto como porosidad, cohesión, tejido (Robert, 2009). Así, el comportamiento de la relación ola-sedimento es diferente en las dos áreas de estudio debido a la disponibilidad, origen y propiedades de sus sedimentos.

Los procesos hidrodinámicos en el lado oriental de la Isla de San Andrés, provocados por olas provenientes de aguas abiertas, tienen diferentes efectos dependiendo de la configuración de la barrera arrecifal, la cual disipa gran parte de la energía incidente del oleaje proveniente del este y noreste. El lado sureste está menos protegido porque el arrecife es más pequeño e incluso tiene una abertura en las coordenadas 81°41'40.35"W-12°32'13.859"N en concordancia con resultados hallados por Olarte Cáceres (2019), cuya investigación determinó que los procesos hidrodinámicos en el costado este de la isla, originados por el oleaje proveniente de aguas abiertas, tiene diferentes afectaciones de acuerdo con la configuración de la barrera arrecifal, siendo el costado sureste el menos protegido debido a que en este sector el arrecife de coral es de menor envergadura.

7.1 Análisis comparativo entre bosques con diferentes condiciones fisiográficas

La comparación de resultados obtenidos para evaluar la vulnerabilidad de los bosques de manglar de un sector del litoral Pacífico colombiano, con un bosque de manglar de un ambiente diferente en cuanto a origen sedimentario, fisiografía, geología e incluso políticas de conservación, evidenciaron una respuesta opuesta a los forzantes oceanográficos y meteorológicos evaluados.

La configuración geomorfológica de las costas estudiadas influye sin duda en las respuestas del frente de manglar. El bosque de manglar de Old Point en San Andrés está protegido de la acción directa del mar por una barrera arrecifal, mientras que en Bocagrande en Tumaco el manglar se desarrolla detrás de una barra de arena que se forma y desaparece cíclicamente por la acción de diversas variables, incluidas las analizadas en este estudio. La acumulación de sedimentos permite la colonización del manglar, pero, así como hay períodos de avance de la línea costera y rápida colonización, también hay períodos de retroceso que provocan la pérdida de la cobertura de manglares y de la infraestructura antropogénica construida.

La interacción entre la disponibilidad de sedimentos, las propiedades de los sedimentos, el espacio de alojamiento y la capacidad de los agentes morfodinámicos para transportar y distribuir sedimentos, es la base fundamental que condiciona la evolución de las costas, determinando su tipo, forma, estructura, así como su estabilidad ([Restrepo López, 2017](#)). Además, estos determinantes dependen en gran medida del origen de los sedimentos, ya sea fluvial, como en el caso de Tumaco, cuyos sedimentos son transportados por drenaje terrestre, o biológico, como en el caso de San Andrés, cuyo sedimento carbonatado es principalmente de origen coralino ([Jackson y Short, 2020](#)).

En el caso de Old Point, la expansión de los manglares no se relaciona con la formación de nuevas tierras disponibles alimentadas por el aumento del aporte de sedimentos alóctonos de origen fluvial, antropogénico o marino somero, como en el caso de Bocagrande y en otras zonas del país como reporta [Suárez J. A. et al. \(2015\)](#) en el Golfo de Urabá, sino que se atribuyen al transporte de sedimentos esqueléticos de origen coralino, no esqueléticos compuestos por granos producidos por precipitación de carbonatos inducida fisicoquímicamente y derivados de granos de fuentes terrestres, de origen natural o antropogénico. En ambos casos también podría existir presencia de sedimentos autóctonos producidos *in situ* que incluyen tanto desechos orgánicos como esqueléticos ([Perry y Taylor, 2007](#)).

En San Andrés, las variables de oleaje tuvieron una mayor relación con el cambio de la posición del bosque, con respecto al resultado obtenido en el Pacífico. Las variables de velocidad de la ola y altura de ola presentaron una relación inversa de las variables, generando un mayor avance a medida que disminuye la altura de ola, y mayor retroceso conforme esta aumenta. Este resultado se puede explicar debido a que el impacto de las

olas genera una acumulación de las partículas más gruesas en las playas y finas en el fondo, aunque esto depende también de las propiedades físicas de los granos como masa, densidad, tamaño, morfología, etc., y del sedimento en conjunto como porosidad, cohesión, tejido, etc. (Robert, 2009), por lo que el comportamiento de la relación oleaje-sedimentos, es diferente para las dos zonas de estudio al tratarse de sedimentos de diferente origen.

La colonización de *R. mangle* en la isla sucedió en los periodos 2011-2013, 2014-2015, 2018-2019 y 2021-2022 en los que la celeridad de la ola fue inferior con respecto a los demás periodos; así como de pérdida en los periodos 2013-2014, 2017-2018 y 2020-2021, en los que la celeridad fue superior, puede obedecer a la distribución de sedimentos en el ecosistema de manglar de Old Point, de acuerdo con lo reportado por Olarte Cáceres, (2019), en cuyo estudio se reportó una correlación entre la tasa de transporte potencial longitudinal de sedimentos (TPLS) y cambios en la línea costera de las playas Spratt Bight ubicada al norte de la Isla.

En Old Point, la expansión de los manglares no está ligada al crecimiento de barras de sedimentos frente a los manglares alimentadas por sedimentos alóctonos de origen fluvial, antropogénico o marino somero, como en el caso de Bocagrande u otras áreas del Caribe continental colombiano, como el Golfo de Urabá (Suárez *et al.*, 2015). En Old Point, los manglares están expuestos directamente al oleaje, y los episodios de expansión de manglares observados en este estudio pueden atribuirse a la recuperación del follaje. Los años de retracción del frente de manglares, causados por la alta energía del oleaje del sur, que no interactúa con el arrecife, suelen ser seguidos por años de expansión cuando la energía del oleaje disminuye.

La expansión del frente de manglares ocurre por el crecimiento horizontal de nuevas ramas generadas a partir de árboles de borde. Las ramas que crecen cerca de la superficie del mar también pueden producir raíces de apoyo, que ayudan a ganar terreno hacia el mar. Durante eventos o años de oleaje fuerte, las hojas se ven más afectadas que las raíces de apoyo, y durante años favorables, las hojas pueden recuperarse rápidamente de las ramas colonizadoras y las raíces de apoyo. Por ejemplo, entre 2020 y 2021, el intervalo en el que los huracanes Eta e Iota afectaron San Andrés, la cobertura de manglares se contrajo 5,5 m. Al año siguiente, la cobertura aumentó 3,2 m. La cobertura de manglares se evalúa

mediante la señal de verdor, que revela fuertes cambios en el dosel de manglares debido a la acción de las olas, a pesar de la mayor resiliencia de las raíces.

8. Conclusiones y recomendaciones

En este estudio se analizó la respuesta del ecosistema mitigador de erosión costera como un bioindicador de vulnerabilidad ante tres fenómenos forzantes de variabilidad espacial de la línea costera. Estos resultados evidencian que, a pesar de que diferentes factores ambientales influyen en la disposición espacial de los bosques de manglar y que estos responden de manera relativamente rápida a las variaciones de estos forzantes, la respuesta varía de acuerdo con el tipo de bosque según la fisiografía que lo rodea.

De acuerdo con esta evidencia, es posible establecer que la vulnerabilidad de los bosques de manglar, y por lo tanto de los litorales en los que se desarrollan, ante factores reguladores y forzantes de erosión costera, difiere notablemente entre el litoral Pacífico y otras zonas del país, por lo que los planes de prevención, respuesta y adaptación deben ser proyectados de acuerdo con el tipo de bosque y las condiciones ambientales que los definen. Estudiar, gestionar, proteger y restaurar de forma eficiente los ecosistemas de manglar con el fin de garantizar su equilibrio y la provisión de servicios ecosistémicos, son procesos que deben considerar las diferencias biogeofísicas de cada región y las respuestas específicas de cada uno a su entorno dinámico y cambiante.

En escenarios de cambio global, en los que se proyecta aumentos de temperatura que derivarán en alteraciones en diferentes ciclos de las esferas oceanográficas, hidrológicas, atmosféricas, e incluso sociales con serias consecuencias ecológicas, se espera que los bosques de manglar se vean fuertemente influenciados, de forma tanto positiva como negativa; y la dirección y magnitud del impacto dependerán del factor estresante, las interacciones potenciales entre factores estresantes, la ubicación geográfica del manglar y los factores biofísicos específicos del sitio.

Comprender los mecanismos específicos que influyen en las adaptaciones de este ecosistema bajo diferentes entornos sedimentarios y regímenes de perturbación, permitirá

predecir de forma más acertada los impactos a largo plazo de los factores forzantes que influyen en su equilibrio y en la provisión de servicios ecosistémicos. A partir de este conocimiento sitio-específico, es posible establecer estrategias exitosas de conservación y restauración en proyectos de adaptación basados en ecosistemas para mitigar la vulnerabilidad a la erosión costera.

8.1 Vulnerabilidad ante elementos forzantes costera

Los rápidos cambios de la cobertura de manglar se dan en respuesta a los cambios en las condiciones de oleaje, caudales y señales de ENOS, que convergen e interactúan. De acuerdo con los resultados de este estudio, el bosque de manglar del área evaluada en el Pacífico colombiano presentó una respuesta positiva directa al caudal del río Mira gracias los sedimentos que aporta y la reducción de la salinidad por el aumento de agua dulce que aporta al ecosistema, que benefician la colonización de la especie *Rhizophora mangle*.

Seguida a esta variable forzante se ubicó la celeridad de grupo, debido a que las velocidades del oleaje ayudan a transportar y depositar los sedimentos de forma más rápida y eficiente en las áreas de influencia del delta del río Mira. Finalmente, las señales de ENOS parecen no tener incidencia directa en la configuración del bosque estudiado en el periodo analizado. Esto puede deberse a que, en esta zona del país, el fenómeno de El Niño y de La Niña no contribuye en una alta proporción a la variabilidad hidrológica de los ríos, siendo estos dominados mayormente por otros factores hidrometeorológicos, de acuerdo con diversos autores.

Por su parte, el área de estudio de San Andrés, analizada a modo de contraste, presentó un comportamiento inverso como respuesta a los mismos estresores (a excepción de caudal, evaluado sólo en el Pacífico). En esta zona del Caribe insular colombiano, la señal de ENOS explicó el movimiento del frente del manglar en mayor medida que en Bocagrande, pero con una relación inversa, presentando retroceso de línea de costa durante los periodos La Niña, y avances durante periodos predominantes de El Niño, mientras que en Bocagrande los avances se presentaron durante periodos La Niña y retrocesos durante El Niño.

La variable altura de ola y velocidad de ola son predominantemente explicativas en San Andrés, pero en este caso, con una relación inversa (a menor altura/velocidad de ola, mayor avance, y a mayor altura/velocidad, mayor retracción del bosque). Esto sucede porque en Bocagrande tiene una fuente permanente de sedimentos provenientes del río, por lo que la variable celeridad de grupo de olas, fortalece la deriva litoral al transportar sedimentos. La energía del oleaje, dada por la celeridad de grupo transporta los sedimentos en alta disponibilidad, pero erosiona a baja disponibilidad, por lo que, al reducir el caudal y, por lo tanto, el aporte de sedimentos del río, se presenta mayores tasas de retroceso del bosque de manglar. En Old Point, por su parte, los corales son la fuente principal de sedimentos alóctonos para las costas bordeadas de arrecifes y ayudan a mantener las playas y ecosistemas de manglar, brindándoles protección mediante la disipación de la energía de las olas cuando la energía de las olas no los remueve y reacomodan.

La mayor diferencia entre los dos bosques es la hidrogeomorfología. El bosque de manglar deltaico de Bocagrande, ubicado la influencia del delta del río Mira, y el de manglar de contraste es de tipo de borde y costa abierta, sin la influencia de sedimentos terrígenos transportados por la descarga de afluentes. Esto, además de definir las diferencias biomorfodinámicas, también determinan su vulnerabilidad y el uso y aprovechamiento de las comunidades que habitan en sus cercanías.

8.2 Cambio multitemporal de frente costero

La variabilidad de la configuración de la línea de costa es fácilmente cuantificable mediante la espacialización y análisis de cambio de posición de la línea costera en series de tiempo. Las tendencias de su variabilidad son un indicador de la vulnerabilidad de litoral ante el fenómeno de la erosión costera y su entendimiento permite generar planes de acción efectivos para la adaptación y mitigación.

Utilizar la posición espacial del frente del bosque de manglar como un bioindicador de procesos costeros, con base en fotointerpretación de imágenes satelitales de alta resolución, tiene la ventaja de no ser afectado por la altura de la marea en el momento de

la captura de la imagen, ya que el análisis espacial se realiza con vista cenital del dosel del bosque, a diferencia de los análisis de cambios de la línea costera basados en la interpretación del límite tierra-agua, que depende completamente de la hora de la toma y de la posición de la marea en ese momento, esto sobre todo en el Pacífico colombiano, en dónde las mareas tienen un régimen semidiurno, en el que hay dos pleamares y dos bajamares al día, con niveles máximos de 5 metros de altura.

El monitoreo in situ de bosques de manglares es necesario, pero no siempre viable por la dificultad de acceso y la extensión de su cobertura, y aunque el estudio de las respuestas ecológicas de las especies ante cambios ambientales requiere de muestreos en campo, la gran mayoría de ellas se pueden monitorear a través de sensores remotos. Con la combinación de análisis de imágenes de fuentes aerotransportadas, como satélites y datos obtenidos de estas fuentes, ya sea sensores o modelación numérica, es posible identificar los cambios en la extensión espacial como respuesta adaptativa a condiciones ambientales cambiantes en su entorno.

El monitoreo con base en imágenes de alta resolución para mapear los detalles de la cobertura del bosque en paisajes rápidamente cambiantes, incluso la detección de las primeras etapas de la colonización, junto con datos de series de tiempo de variables ambientales, permite respaldar decisiones políticas asociadas a protección, restauración u ordenamiento, basadas en evidencia de la migración del frente costero como respuesta a forzantes ecosistémicos.

El bosque de manglar del área de estudio en el Pacífico colombiano presentó una alta y rápida variabilidad espacial en la posición de su frente, oscilando entre avances y retrocesos constantes a lo largo del periodo de 13 años, siendo estos últimos los dominantes. Por su parte, en la Isla de San Andrés, zona seleccionada como contraste por sus diferencias en cuanto a fisiografía y biomorfodinámica con respecto a Bocagrande, la variabilidad de la cobertura vegetal también tiene un comportamiento cíclico, pero más cercano a la estabilidad con tendencia a la acreción. Estos cambios cíclicos en la configuración de la cobertura vegetal del litoral muestran que el cambio costero en esta zona no tiene una única tendencia, sino que responde rápidamente a los diversos factores ambientales forzantes.

A pesar de que las magnitudes de cambio son relativamente similares entre los dos bosques, los cambios en el de Old Point no son tan evidentes para la comunidad como los del litoral de Bocagrande, ya que este bosque es de tipo marginal, dispuesto a lo largo de un litoral frente a mar abierto, expuesto directamente a la acción tanto de las mareas como de las olas, y parte de un área de conservación del Parque Regional Manglares de Old Point. Por el contrario, el bosque de Bocagrande es de tipo deltaico, ubicado en una llanura aluvial a lo largo de canales de drenaje del río Mira, cuya morfodinámica del delta se configura por el suministro y disposición a lo largo del litoral, de sedimentos aportados por el río y sus esteros.

El bosque de manglar de Old Point está expuesto a la acción marina directa (aunque protegida por la barrera arrecifal), mientras que el de Bocagrande, también de borde, se desarrolla detrás de una barra de arena que se forma y desaparece de forma cíclica por la acción de diversas variables, incluidas las analizadas en el presente estudio. Estas acumulaciones de sedimentos no sólo permiten la colonización de las especies de manglar, sino también de comunidades humanas que ven una oportunidad de asentamiento para actividades como turismo. Sin embargo, así como hay periodos de avance de la línea costera y de rápida colonización de árboles de mangle, también hay periodos de retroceso que genera pérdida de cobertura de manglar y de infraestructura antrópica construida.

8.3 Respuesta sitio-específica del manglar

Los resultados de este estudio muestran que, si bien diferentes factores ambientales influyen en la disposición espacial de los bosques de manglares y que responden relativamente rápido a variaciones en estas fuerzas, la respuesta varía según el tipo de bosque, su fisiografía característica, y para el caso de San Andrés, además según la interacción del oleaje y la heterogeneidad de los arrecifes coralinos. Con base en estos hallazgos, es posible concluir que la respuesta de los bosques de manglares a los factores reguladores y forzadores del cambio costero es diametralmente diferente entre la costa del Pacífico y las islas oceánicas del Caribe, por lo que se deben diseñar planes de prevención,

respuesta y adaptación de acuerdo con el tipo de bosque y las condiciones ambientales que lo definen. El estudio, manejo, protección y restauración efectiva de los ecosistemas de manglares para asegurar su integridad y la provisión de servicios ecosistémicos debe considerar las diferencias biológicas, geográficas y físicas de cada región y las respuestas específicas de cada una a su entorno dinámico y cambiante.

Así como la cobertura del bosque de manglar se ve afectada por la vulnerabilidad del litoral ante erosión costera, la provisión de servicios ecosistémicos que ellos brindan también lo hace en consecuencia. La degradación de áreas cubiertas por estos bosques no solo reduce el potencial de almacenamiento, sino que, además, libera a la atmósfera grandes reservas de carbono azul previamente secuestradas principalmente en los sedimentos.

En este sentido, los resultados de este estudio interdisciplinar aportan de forma positiva a los planes de restauración de ecosistemas de manglar, en las fases de identificación, priorización e implementación de acciones, que incluyen las etapas de selección y priorización de áreas con potencial de restauración integral; identificación de los factores forzantes que causan la degradación del ecosistema, la priorización de acción sobre dichos factores y el desarrollo de acciones para mitigar los factores priorizados que impactan el manglar.

Anexo

Rutina de Matlab para extraer datos .Grib

```
setup_nctoolbox

clear
close all
clc

exten = '*2023_ERA_SAI*';
ruta = 'C:\Users\paole\Desktop\Oleaje';
files =busca_archivos(exten,ruta) ;
[m,n] = size(files);
varid='Mean_wave_direction_msl';

for i=1:m

nco=ncgeodataset(files(i,:));
v = nco.variables;

viento=nco{varid}(:,:,:);
[n1,m1,o1]=size(viento);

for j=1:n1

viento=nco{varid}(j,:,:,);
lat=nco{'lat'}(:);
lon=nco{'lon'}(:);

viento=double(squeeze(viento));

lat=double(lat);
lon=double(lon);

indLat = find(lat > 12.1 & lat < 13);
indLon = find(lon > -81.5 & lon < -80.5);
```

```
Latr = lat(indLat);  
Lonr = lon(indLon);  
  
JRACb(j,:) = viento(indLat,indLon);  
  
save 2023_SAI_Dd.dat -ascii JRACb  
  
end  
end
```


Bibliografía

- Aguilera Díaz, M. (2010). Documentos de trabajo sobre economía regional: Geografía económica del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Cartagena de Indias: Banco de la República.
- Álvarez-Silva, O., Saavedra, V., Otero, L., & Restrepo, J. C. (2022). On the mechanisms controlling near-coast circulation in the southern Colombian Pacific at tidal, seasonal, and interannual time scales. *Journal of Marine Systems*, 1-15.
- Amarasekera, K. N., Lee, R. F., Williams, E. R., & Eltahir, E. A. (1997). ENSO and the natural variability in the flow of tropical rivers. *Journal of Hydrology*, 24-39.
- Babanin, A. V., Rogers, W. E., de Camargo, R., Doble, M., Durrant, T., Filchuk, K., . . . Young, I. R. (2019). Waves and Swells in High Wind and Extreme Fetches, Measurements in the Southern Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 1-12.
- Bartholomew, H., & Jin, M. S. (2013). ENSO Effects on Land Skin Temperature Variations: A Global Study from Satellite Remote Sensing and NCEP/NCAR Reanalysis. *Climate*.
- Beck, M. W. (2014). *Coast at Risk. An Assessment of Coastal Risk and the Role of Environmental Solutions*. United Nations University - Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS), The Nature Conservancy (TNC) and the Coastal Resources Center (CRC) at the University of Rhode Island Graduate School of Oceanography.
- Beck, M., Narayan, S., Trespalacios, D., Pflü, K., Torres, S., Díaz-Simal, P., . . . Kirch, L. (2018). *The Global Value of Mangroves for Risk Reduction. Summary Report*. Berlin: The Nature Conservancy.
- Bird, E. (2008). *Coastal Geomorphology*. Melbourne: Wiley.
- Bitácora & Territorio. (2017). Proyecto: “Desarrollo territorial en el post conflicto colombiano”. *Lectura Territorial de San Andrés de Tumaco*. Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural – RIMISP.
- Blanco-Libreros, J. F., & Álvarez-León, R. (2019). Mangroves of Colombia revisited in an era of open data, global changes, and socio-political transition: Homage to Heliodoro Sánchez-Páez. *Academia de ciencias exactas, físicas y naturales*, 84-97.

- Blasco, F., Saenger, P., & Janodet, E. (1996). Mangroves as indicators of coastal change. *Catena*.
- Bolívar-Anillo, H. J., Sánchez Moreno, H., Fernandez, R., Villate Daza, D. A., & Anfuso, G. (2019). An Overview on Mangrove Forests Distribution in Colombia: an Ecosystem at Risk. *Journal of Aquatic Science and Marine Biology*, 16-18.
- Botero, C. M., Anfuso, G., Rangel-Buitrago, N., & Correa, I. D. (2013). Coastal erosion monitoring in Colombia: Overview and Study Cases on Caribbean and Pacific Coasts. En L. E. Cipriani, *Coastal Erosion Monitoring. Results from ResMar Project* (págs. 199-213).
- Carbonneau, P., & Piégay, H. (2012). *Fluvial Remote Sensing for Science and Management*. Oxford: Wiley-Blackwell.
- Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. (10 de 07 de 2024). Obtenido de ¿Cuántos somos?: <https://sitios.dane.gov.co/cnpv/#/>
- Cifuentes Ossa, M. A., Rosero Henao, L. V., & Josephraj Selvaraj, J. (2017). Detección de cambios de la línea costera al norte del Distrito de Buneaventura mediante el uso de sensores remotos. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 46 (1), 137-
- Coleman, J.M., 1969. Brahmaputra River: channel processes and sedimentation. *Sediment. Geol.*, 3: 129--239.152.
- CORALINA. (1 de 07 de 2024). Parques Regionales Naturales. Obtenido de <https://www.coralina.gov.co/publicaciones/20/parques-regionales-naturales/>
- Costa, P., Dórea, A., Mariano-Neto, E., & Barros, F. (2015). Are there general spatial patterns of mangrove structure and composition along estuarine salinity gradients in Todos os Santos Bay? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1-9.
- Corponariño, Ministerio de Ambiente, WWF. (2010). *Caracterización, diagnóstico y zonificación de los manglares en el departamento de Nariño*. Bogotá: WWF.
- Dahdouh-Guebas, F., Jayatissa, L. P., Di Nitto, D., Bosire, J. O., Lo Seen, D., and Koedam, N. (2005). How effective were mangroves as a defence against the recent tsunami? *Current Biology*.
- Danielsen F, Sørensen MK, Olwig MF, Selvam V, Parish F, Burgess ND, Hiraishi T, Karunagaran VM, Rasmussen MS, Hansen LB, Quarto A, and Suryadiputra N. (2005). The Asian tsunami: a protective role for coastal vegetation. *Science*.
- de Oliveira Lima, K. O., Pereira Tognella, M. M., Cunha, S. R. & de Andrade, H. A., (2018). Growth models of *Rhizophora mangle* L. seedlings in tropical southwestern atlantic. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1-29.
- Day, R. H., Allen, S. T., Brenner, J., Goodin, K., Faber-Langendoen, D., & Wirt Ames, K. (2018). Chapter 3. Ecological Resilience Indicators for Mangrove Ecosystems. En K. Goodin, D. Faber-Langendoen, J. Brenner, S. Allen, R. Day, V. Congdon, . . . M. Love, *Ecological Resilience Indicators for Five Northern Gulf of Mexico Ecosystems* (págs. 91-150). Arlington VA.: NatureServe.

- D´Croz, L. (1985). Manglares: su importancia para la zona costera tropical. *Agonia de la naturaleza*, 167-180.
- Departamento Nacional de Estadística - DANE. (1 de 07 de 2024). Encuesta de hábitat y usos socioeconómicos 2019, Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Obtenido de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/informacion-regional/encuesta-de-habitat-y-usos-socioeconomicos-2019-archipelago-de-san-andres-providencia-y-santa-catalina>
- Di Nitto, D., Neukermans, G., Koedam, N., Defever, H., Pattyn, F., Kairo, J., & Dahdouh-Guebas, F. (2014). Mangroves facing climate change: landward migration potential in response to projected scenarios of sea level rise. *Biogeosciences*, 857-871.
- Duke, N. C., Mackenzi, J. R., Canning, A. D., Hutley, L. B., Bourke, A. J., Kovacs, J. M., . . . Ai, E. (2022). ENSO-driven extreme oscillations in mean sea level destabilise critical shoreline mangroves—An emerging threat. *PLOS Climate*, 1-23.
- Ellison, J. C., & Zouh, I. (2012). Vulnerability to climate change of mangroves: assessment from cameroon, central Africa. *Biology (Basel)*.
- Estructura, extensión y distribución de los manglares de la Isla de San Andrés, Caribe Colombiano. (1998). MEMORIAS XI SEMINARIO CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS DEL MAR 1998, 1-11.
- European Space Agency. (10 de 08 de 2024). Earth Online. Obtenido de About RapidEye: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/rapideye>
- European Commision, Copernicus, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Climate Change Service. (2023). ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Obtenido de <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
- Everitt, J. H., & Judd, F. W. (1989). Using Remote Sensing Techniques to Distinguish and Monitor Black Mangrove (*Avicennia germinans*). *Journal of Coastal Research*, 737-745.
- Everitt, J. H., Yang, C., Sriharan, S., & Judd, F. W. (2008). Using High Resolution Satellite Imagery to Map Black Mangrove on the Texas Gulf Coast. *Journal of Coastal Research*, 1582–1586.
- Ewel, K., Twilley, R., and Ong, J. (1998). Different kinds of mangrove forests provide different goods and services. *Global Ecology & Biogeography Letters*, 83-94.
- Federal Emergency Management Agency. US Department of Homeland Security. (2022). FEMA Region I Coastal Erosion Study – Rockingham County. Boston.
- Ferrario, F., Beck, M. W., Storlazzi, C. D., Micheli, F., Shepard, C. C., & Airolidi, L. (2014). The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications*, 1-9.

- Florsheim, J. L., Pellerin, B. A., Oh, N. H., Ohara, N., Bachand, P. A. M., Bachand, S. M., et al. (2011). From deposition to erosion: Spatial and temporal variability of sediment sources, storage, and transport in a small agricultural watershed. *Geomorphology*, 132(3-4), 272-286.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *The World's Mangroves 2000-2020*. Rome.
- Friess, D. A., Adame, M. F., Adams, J. B., & Lovelock, C. E. (2022). *Wires Climate Change*, 1-15.
- Friess, D. A., Rogers, K., Lovelock, C. E., Krauss, K. W., Hamilton, S. E., Lee, S. Y., . . . Shi, S. (2019). The State of the World's Mangrove Forests: Past, Present, and Future. *Annual Review of Environment and Resources*, 89-115.
- García, N. O., & Mechoso, C. R. (2009). Variability in the discharge of South American rivers and in climate. *Hydrological Sciences Journal*, 459-478.
- García-Hansen Honkala, I., & Gaviria-Chiquazuque, J. (1998). Estructura, extensión y distribución de los manglares de la isla de San Andrés, Caribe colombiano. En U. d. Lozano, *Memorias XI Seminario de Ciencias y Tecnologías del Mar*. Bogotá
- Geister, J., and Díaz, J. (2007). Reef environments and geology of an oceanic archipelago: San Andrés, Old Providence and Santa Catalina (Caribbean sea, Colombia). Bogotá: INGEOMINAS.
- Gilman, E. L., Ellison, J., Duke, N. C., and Field, C. (2008). Threats to mangroves from climate change and adaptation options: A review. *Aquatic Botany*, 237-250.
- Global Mangrove Watch. (15 de 07 de 2024). Global Mangrove Watch. Obtenido de <https://www.globalmangrovetwatch.org/>
- Green, E. P., Mumby, P. J., Edwards, A. J., Clark, C. D., & Ellis, A. C. (1997). Estimating leaf area index of mangroves from satellite data. *Aquatic botanic*, 11-19.
- Guilherme, J., Simões Vieira, M., Salgue, J., Mortágua, A., Soares, V., Azeiteiro, U., & Morgado, F. (2019). Anintegrated approach to assess the vulnerability to erosion in mangroves using GIS models in a tropical coastal protected area tropical coastal protected area. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 289-307.
- Gupta, A., and Fox, H., 1974. Effects of high-magnitude floods on channel forms -- a case study in Maryland Piedmont. *Water Resour. Res.*, 10: 499--509.
- Ghosh, S., Bakshi, M., Gupta, K., Mahanty, S., Bhattacharyya, S., & Chaudhuri, P. (2020). A preliminary study on upstream migration of mangroves in response to changing environment along River Hooghly, India. *Marine Pollution Bulletin*, 1-14.
- Gomez Garcia, L. F. (2024). Tesis de Maestría en Ciencias-Biología. Reservas de carbono orgánico en manglares del Pacífico colombiano y su relación con el grado de intervención antrópica. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

- H. Glantz, M., & Ramirez, I. (2020). Reviewing the Oceanic Niño Index (ONI) to Enhance Societal Readiness for El Niño's Impacts. *International Journal of Disaster Risk Science*.
- Hapsari, R. W., Hartoko, A., & Hendrarto, B. (2020). Mangrove vulnerability index and carbon algorithm using Sentinel-2A satellite data at Kemujan Island, Karimunjawa Islands, Indonesia. *AAAL Bioflux*, 1453-1462.
- Hari Prasad, D., & Kumar, D. (2014). *Coastal Erosion Studies—A Review*. Hyderabad, India: *International Journal of Geosciences*.
- Hickey, S., Radford, B., Callow, J., Phinn, S., Duarte, C., & Lovelock, C. (2021). ENSO feedback drives variations in dieback at a marginal mangrove site. *Scientific reports*.
- Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. (2021). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 user guide*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–109.
- Horstman, E., Dohmen-Janssen, C., Narra, P., van den Berg, N., Siemerink, M., & Hulscher, S. (2014). Wave attenuation in mangroves: A quantitative approach to field observations. *Coastal Engineering*, 47-62.
- Hubach, E. (1956). *Aspectos geográficos y geológicos y recursos de las islas de San Andrés y Providencia*. Bogotá: Sociedad Geográfica de Colombia.
- Hooke, J.M. (1977). The distribution and nature of change in river channel patterns. In: K.J. Gregory (Editor), *River Channel Changes*. Wiley, London, pp. 265-280.
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés. (2003). Programa holandés de asistencia para estudios de cambio climático: Colombia. Definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en la zona costera colombiana y adaptación. Santa Marta: INVEMAR.
- International Union for Conservation of Nature. (15 de 02 de 2025). *Red List of Mangrove Ecosystems*. Obtenido de IUCN Red list of Ecosystems: <https://iucn.org/resources/conservation-tool/iucn-red-list-ecosystems/red-list-mangrove-ecosystems>
- Islam, M., Borgqvist, H., & Kumar, L. (2018). Monitoring Mangrove Forest landcover changes in the coastline of Bangladesh from 1976 to 2015. *Geocarto International*, 2-19.
- Jackson, D. W., & Short, A. D. (2020). *Sandy Beach Morphodynamics*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- Jonah, F., Boateng, I., Osman, A., Shimba, M., Mensah, E., Adu-Boahen, K., . . . Effah, E. (2016). Shoreline change analysis using end point rate and net shoreline movement statistics: An application to Elmina, Cape Coast and Moree section of Ghana's coast. *Regional Studies in Marine Science*.

- Klemas, V. (2012). Remote Sensing of Coastal Plumes and Ocean Fronts: Overview and Case Study. *Journal of Coastal Research*.
- Kathiresan, K., and Rajendran, N. (2005). Coastal mangrove forests mitigated tsunami. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 601-606.
- Lewis Environmental Services, Inc., and Coastal Environmental. (1996). "Setting priorities for Tampa Bay habitat protection and restoration: Restoring the balance." Final report to the Tampa Bay National Estuary Program, Technical Publication No. 09-95, St. Petersburg, FL
- Lin, Y., & Wiegand, K. (2023). Low R2 in ecology: Bitter, or B-side? *Ecological indicators*, 1-4.
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Wiley.
- Lindeboom, H. (2002). Chapter 3. The Coastal Zone. An Ecosystem Under Pressure. En *OCEANS 2020. Science, Trends, and the Challenge of Sustainability* (págs. 49-84). Whashington: Island Press.
- López, S. A., & Restrepo, J. D. (2007). Modelos morfodinámicos de los deltas fluviales colombianos. *Boletín de Geología*, 103-113.
- Lovelock, C. E., Krauss, K. W., Osland, M. J., Reef, R., & Ball, M. C. (2016). The Physiology of Mangrove Trees with Changing Climate. En G. Goldstein, & L. S. Santiago, *Tropical Tree Physiology. Adaptations and Responses in a Changing Environment* (págs. 149-179). Switzerland: Springer.
- Lucas, R. M., Ellison, J. C., Mitchell, A., Donnelly, B., Finlayson, M., & Milne, A. K. (2002). Use of stereo aerial photography for quantifying changes in the extent and height of mangroves in tropical Australia. *Wetlands Ecology and Management*, 161–175.
- Lucas, R., Ellison, J., Mitchell, A., Donnelly, B., Finlayson, M., & Milne, A. (2002). Use of stereo aerial photography for quantifying changes in the extent and height of mangroves in tropical Australia. *Wetlands Ecology and Management*, 161–175.
- Maanan, M., & Robin, M. (2014). *Sediment Fluxes in Coastal Areas*. Springer.
- Maina, J. M., Bosire, J. O., Kairo, J. G., Bandeira, S. O., Mangora, M. M., Macamo, C., . . . Majambo, G. (2021). Identifying global and local drivers of change in mangrove cover and the implications for management. *Global Ecology and Biogeography*, 1-13.
- Malik, A., Fensholt, R., and Mert, O. (2015). Mangrove exploitation effects on biodiversity and ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*.
- Maskrey, A. (1993). *Los desastres no son naturales*. La Red.
- McKee, K. L. (2010). Biophysical controls on accretion and elevation change in Caribbean mangrove ecosystems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 475-483.

- McLeod, E., & Salm, R. V. (2006). *Managing Mangroves for Resilience to Climate Change*. Gland, Switzerland: The Nature Conservancy.
- Mcvlor, A., Spencer, T., Möller, I. & Spalding, M., 2012. *Storm surge reduction by mangroves. Natural Coastal Protection Series: Report 2. Cambridge Coastal Research Unit Working Paper 41*. s.l.:The Nature Conservancy and Wetlands International.
- Medina-Calderón, J. H., Mancera-Pineda, J. E., Castañeda-Moya, E., & Rivera-Monroy, V. H. (2021). Hydroperiod and Salinity Interactions Control Mangrove Root Dynamics in a Karstic Oceanic Island. *Frontiers in Marine Science*, 1-19.
- Méndez-Alonzo, R., Moctezuma, C., Ordoñez, V., Angeles, G., Martí'nez, A. J., & López-Portillo, J. (2015). Root biomechanics in *Rhizophora mangle*: anatomy, morphology and ecology of mangrove's flying buttresses. *Annals of Botany*, 833-840.
- Mesarovic, M. D. (1968). *Systems Theory and Biology—View of a Theoretician*. En M. D. Mesarovic, *Systems Theory and Biology*. Berlin: Springer.
- Mishra, M., Sudarsan, D., Kar, D., Naik, A. K., Das, P. P., Santos, C., & da Silva, R. (2020). The Development and Research Trend of Using DSAS Tool For Shoreline Change Analysis: A Scientometric Analysis. *Journal of Urban and Environmental Engineering*.
- Morera, S. B., Condom, T., Crave, A., Steer, P., & Guyot, J. L. (2017). The impact of extreme El Niño events on modern sediment transport along the western Peruvian Andes (1968–2012). *Nature*, 1-14.
- Mori, N., Chang, C.-W., Inoue, T., Akaji, Y., Hinokidani, K., Baba, S., . . . Shimura, T. (2022). Parameterization of Mangrove Root Structure of *Rhizophora stylosa* in Coastal Hydrodynamic Model. *Frontiers in Built Environment*, 1-9.
- Nagelkerken, I., Blaber, S., Bouillon, S., Green, P., Haywood, M. D., Kirton, L. G., et al. (2008). The habitat function of mangroves for terrestrial and marine fauna: A review. *Aquatic Botany*.
- Niño P, D. C., & Oviedo B., F. (2018). Determinación de la variación morfológica costera de la Bahía de Tumaco, a partir de análisis multitemporal con sensores remotos. *Boletín Científico del CIOH*, 71-86.
- NOAA. (Diciembre de 2023). National Weather Service Climate Prediction Center. Obtenido de Cold & Warm Episodes by Season: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- Olarte Cáceres, P. M. (2019). Tesis de Maestría en Ingeniería de Recursos Hidráulicos: Climatología del transporte potencial de sedimentos costeros inducido por oleaje en la Isla San Andrés. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

- Omuombo, C. A., Olago, D. O., & Oda, E. O. (2013). Chapter 22 - Coastal Erosion. En P. Paron, D. Ochieng Olago, & C. Thine, *Developments in Earth Surface Processes* (págs. 331-339). Elsevier.
- Oyedotun, T. (2014). *Shoreline Geometry: DSAS as a Tool for Historical Trend Analysis*. British Society for Geomorphology.
- Pelckmans, I., Belliard, J.-P., Gourgue, O., Dominguez-Granda, L. E., & Temmerman, S. (2023). Mangroves as nature-based mitigation for ENSO-driven compound flood risks in a river delta. *EGUsphere*, 1-24.
- Perry, C., & Taylor, K. (2007). *Environmental sedimentology*. Manchester: Blackwell.
- Planet Labs. (September de 2023). Planet Analytic Imagery and Archive. Obtenido de <https://www.planet.com/products/planet-imagery/>
- Poff, N.L., Bledsoe, B.P., and Cuhaciyan, C.O., 2006. Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems. *Geomorphology* 79, 264e285.
- Posada Posada, B. O., Henao Pineda, W., & Guzman Ospitia, G. (2009). Diagnóstico de la erosión y sedimentación en la zona costera del Pacífico colombiano (Serie de publicaciones especiales No. 17 ed.). Santa Marta: INVEMAR.
- Poveda, G., Jaramillo, Á., Gil, M. M., Quiceno, N., & Mantilla, R. I. (2001). Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water Resources Research*, Vol. 37, 2169-2178.
- Prato, J. A., & Reyna, J. A. (2015). *Aproximación a la valoración económica de la zona marina y costera del Caribe Colombiano*. Bogotá: Comisión Colombiana del Océano.
- Proffitt, C. E., Milbrandt, E. C., & Travis, S. E. (2006). Red Mangrove (*Rhizophora mangle*) Reproduction and Seedling Colonization after Hurricane Charley: Comparisons of Charlotte Harbor and Tampa Bay. *Estuaries and Coasts*, 972–978.
- Proisy, C., Mitchell, A., Lucas, R., Fromard, F., & Mougín, E. (2003). Estimation of Mangrove Biomass using Multifrequency Radar Data. Application to Mangroves of French Guiana and Northern Australia. *Proceeding of the Mangrove Conference*.
- Pokhrel, P., Loup, E., Hoque, M. T., Abdelguerfi, M., & Simeonov, J. (2021). Forecasting Significant Wave Heights in Oceanic Waters
- Rangel-Buitrago, N. (2020). Are We Managing in the Right Way the Coastal Erosion along the Caribbean Coast of Colombia? *Journal of Coastal Research*, 930-934.
- 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*, 129-144.
- Raw, J. L., Godbold, J. A., van Niekerk, L., & Adams, J. B. (2019). Drivers of mangrove distribution at the high-energy, wave-dominated, southern African range limit. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.

- Resh, V.H., Brown, A.V., Covich, A.P., Gurtz, M.E., Li, H.W., Minshall, G.W., Reice, S.R., Sheldon, A.L., Wallace, J.B., and Wissmar, R.C., 1988. Role of disturbance in stream ecology. *Journal of the North American Benthological Society* 7, 433e455.
- Restrepo Ángel, J. D. (2008). Deltas: visión general y procesos morfodinámicos. En J. D. Restrepo Ángel, *Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el Cambio Global*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Restrepo L, J. C., Otero D, L., López I, S. A., & Monroy L, C. (2008). Los deltas y el oleaje: estadísticas, clima, corrientes, energía y procesos de asomeramiento en el delta del río Mira. En J. D. Restrepo Ángel, *Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el Cambio Global* (págs. 181-205). Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Restrepo López, J. C. (2014). Tesis doctoral en Ciencias del Mar: Dinámica Sedimentaria en Deltas Micromareales – Estratificados de Alta Descarga: Delta del Río Magdalena (Colombia – Mar Caribe). Barranquilla: Universidad del Norte.
- Restrepo López, J. C., & Otero Díaz, L. J. (2007). Aplicación de modelos hidrodinámicos para evaluar la dinámica del oleaje y el nivel del mar en el sistema deltaico del río Mira (Colombia): Bases para la gestión costera. *Boletín Científico CCCP*, 31-48.
- Restrepo López, J. C., Otero Díaz, L., & López I, S. A. (2009). Clima de oleaje en el Pacífico sur de Colombia, delta del río Mira: Comparaciones estadísticas y aplicación a procesos costeros. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 357-376.
- Restrepo, J. D., & Cantera, J. R. (2011). Discharge diversion in the Patía River delta, the Colombian Pacific: Geomorphic and ecological consequences for mangrove ecosystems. *Journal of South American Earth Sciences*, 183-198.
- Restrepo, J. D., & Cantera, J. R. (2013). Discharge diversion in the Patía River delta, the Colombian Pacific: Geomorphic and ecological consequences for mangrove ecosystems. *Journal of South American Earth Sciences*, 183-198.
- Restrepo-López, J. C., Ortiz-Royero, J. C., Otero-Díaz, L., & Ospino-Ortiz, S. R. (2015). Transporte de sedimentos en suspensión en los principales ríos del Caribe colombiano: magnitud, tendencias y variabilidad. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 527-546.
- Riascos, J. M., Cantera, J. R., & Blanco-Libreros, J. F. (2018). Growth and mortality of mangrove seedlings in the wettest neotropical mangrove forests during ENSO: Implications for vulnerability to climate change. *Aquatic Botany*, 34-42.
- Ricaurte Villota, C., González Arteaga, M. E., Coca Dominguez, O., Bejarano Espinosa, H. M., Morales Giraldo, D. F., Correa Rojas, C. X., . . . Arteaga, M. (2018). Amenaza y vulnerabilidad por erosión costera en Colombia: enfoque regional para la gestión del riesgo. Santa Marta: INVEMAR.

- Robert, C. M. (2009). *Global sedimentology of the ocean and interplay between geodynamics and paleoenvironment*. Hungary: Elsevier.
- Rodríguez-Rodríguez, J. A., Sierra-Correa, P. C., Gómez-Cubillos, M. C., & Licero Villanueva, L. V. (2016). Mangroves of Colombia. En C. M. Finlayson, M. Everard, K. Irvine, R. J. McInnes, B. A. Middleton, A. A. van Dam, & N. C. Davidson, *The Wetland Book* (págs. 1-10). Springer
- Romera Castillo, C. (2022). *AntopOcéano. Cuidar los mares para salvar la vida*. Barcelona: Planeta.
- Quintero, A. P. (2025). Tesis de Maestría en Ciencias-Biología. Influencia de la salinidad en la acumulación de carbono en bosques de manglar sin subsidios externos de materia orgánica. San Andrés, Isla: Universidad Nacional de Colombia.
- Sánchez Gutiérrez, J. (2012). Caracterización y diagnóstico socioeconómico y ambiental de la costa Pacífica en el departamento de Nariño. Formación en gestión ambiental y cadenas productivas Convenio SENA-Tropenbos.
- Sánchez, R., Vargas, G., González, H., and Pabón, D. (2001). Los fenómenos cálido del Pacífico (EL Niño) y frío del Pacífico (La Niña) y su incidencia en la estabilidad de las laderas en Colombia. Cartagena: IDEAM.
- Sánchez-Núñez, D. A., Bernal, G., & Mancera Pineda, J. E. (2019). The Relative Role of Mangroves on Wave Erosion Mitigation and Sediment Properties. *Estuaries and Coasts*, 2024-2138.
- Sánchez-Núñez, D. A., Mancera Pineda, J. E., & Osorio, A. F. (2020). From local-to global-scale control factors of wave attenuation in mangrove environments and the role of indirect mangrove wave attenuation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1-14.
- Sánchez-Núñez, D. A., & Mancera-Pineda, J. E. (2011). Flowering patterns in three neotropical mangrove species: Evidence from a Caribbean Island. *Aquatic Botany*, 177-182.
- Sánchez, R., Vargas, G., González, H., and Pabón, D. (2001). Los fenómenos cálido del Pacífico (EL Niño) y frío del Pacífico (La Niña) y su incidencia en la estabilidad de las laderas en Colombia. Cartagena: IDEAM.
- Santoro, F., Santín., S., Scowcroft, G., Fauville, G., & Tuddenham, P. (2018). *Cultura oceánica para todos, kit pedagógico. Manuales y guías de la COI, 80*. París: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Souza Filho, P. W., Farias Martins, E. d., & da Costa, F. R. (2006). Using mangroves as a geological indicator of coastal changes in the Braganca macrotidal flat, Brazilian Amazon: A remote sensing data approach. *Ocean and Coastal Management*, 462–475.

- Spalding, M., McIvor, A., Tonneijck, F., Tol, S., & van Eijk, P. (2014). Mangrove for coastal defense. Guidelines for coastal managers & policy makers. Wetlands International and The Nature Conservancy.
- Suárez, J. A., Urrego, L. E., Osorio, A., & Ruiz, H. Y. (2015). Oceanic and climatic drivers of mangrove changes in the Gulf of Urabá, Colombian Caribbean. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 972-985.
- Syvitski, J. P., Asprey, K. W., Clattenburg, D. A., & Hodge, G. D. (1985). The prodelta environment of a fjord: suspended particle dynamics. *Sedimentology*, 83-107.
- Teutli-Hernández C., Herrera-Silveira, J.A., Cisneros-de la Cruz, D.J., and Roman-Cuesta. R. (2020). Guía para la restauración ecológica de manglares: Lecciones aprendidas. Proyecto, Mainstreaming Wetlands into the Climate Agenda: A multi-level approach (SWAMP). CIFOR/CINVESTAV-IPN/UNAM-Sisal/PMC, 42pp.
- Thampanya, U., Vermaat, J. E., Sinsakul, S., & Panapitukkul, N. (2006). Coastal erosion and mangrove progradation of Southern Thailand. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 75-85.
- Thu, P. M., & Populus, J. (2007). Status and changes of mangrove forest in Mekong Delta: Case study in Tra Vinh, Vietnam. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 98-109.
- Tong, P., Auda, Y., Populus, J., Aizpuru, M., Habshi, A., & Blasco, F. (2004). Assessment from space of mangroves evolution in the Mekong delta, in relation with extensive shrimp-farming. *International journal of remote sensing*, 4795-4812.
- Torres, M., Giri, F., & Collins, P. (2016). 'La Niña' phenomenon and the relationship between decapod populations and fishes in temporarily isolated shallow lakes. *Marine and Freshwater Research*.
- Tovilla Hernández, C., & Orihuela Belmonte, D. E. (2002). Supervivencia de *Rhizophora mangle* L. en el manglar de Barra de Tecoanapa, Guerrero, México. *Madera y Bosques*, 89-102.
- Tran, T. V., Reef, R., & Zhu, X. (2022). A Review of Spectral Indices for Mangrove Remote Sensing. *Remote Sensing*, 1-29.
- Trimble, S.W. (1999). Decreased rates of alluvial sediment storage in the Coon Creek basin, Wisconsin, 1975–93. *Science* 285 (5431), 1244–1246.
- UNEP. (2014). *The Importance of Mangroves to People: A Call to Action*. Cambridge: United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre.
- UNEP-WCMC. (2006). *In the frontline Shoreline protection and other ecosystem services from mangroves and coral reefs*. Cambridge, UK: Banson.
- UNESCO Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development. (2021). *Recomendación de la UNESCO sobre la Ciencia Abierta*. Paris: UNESCO.

- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2017). 7. Coastal Erosion Hazard and Risk Assessment. En *Words into Action Guidelines: National Disaster Risk Assessment. Hazard Specific Risk Assessment* (págs. 1-13). United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
- van Oldenborgh, G., Hendon, H., Stockdale, T., L'Heureux, M., Coughlan de Perez, E., Singh, R., & van Aalst, M. (2021). Defining El Niño indices in a warming climate. *Environmental Research Letters*.
- Vásquez-Salazar, R. D., Cardona-Mesa, A. A., Valdés-Quintero, J., Olmos-Severiche, C., Gómez, L., Travieso-González, C. M., . . . Vásquez-Cano, E. (2024). Detection of Coastal Erosion and Progradation in the Colombian 'Atrato River' Delta by Using Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar Data. *Remote sensing*, 1-21.
- Vanegas G, C. A., Osorio, A. F., & Urrego, L. E. (2017). Wave dissipation across a *Rhizophora mangrove* patch on a Colombian Caribbean Island: An experimental approach. *Ecological Engineering*, 1-11.
- Vargas Cuervo, G. (2004). Geología y aspectos geográficos de la Isla de San Andrés, Colombia. *Geología colombiana*, 73-89.
- Vásquez-Salazar, R. D., Cardona-Mesa, A. A., Valdés-Quintero, J., Olmos-Severiche, C., Gómez, L., Travieso-González, C. M., et al. (2024). Detection of Coastal Erosion and Progradation in the Colombian 'Atrato River' Delta by Using Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar Data. *Remote sensing*, 1-21.
- Visschers, L. L., Santos, C. D., & Franco, A. M. (2022). Accelerated migration of mangroves indicates large-scale saltwater intrusion in Amazon coastal wetlands. *Science of the Total Environment*, 836.
- von Prael, H. (1989). *Manglares de Colombia*. Bogotá: Banco de Occidente.
- Vos, K., Harley, M. D., Turner, I. L., & Splinter, K. D. (2021). Pacific shoreline erosion and accretion patterns controlled by El Niño/Southern Oscillation. *Nature Geoscience*, 140-146.
- Vundavilli, H., J.C. Mullarney, I.T. MacDonald, and K.R. Bryan. 2021. The interaction of buoyant coastal river plumes with mangrove vegetation and consequences for sediment deposition and erosion in a tidal environment. *Continental Shelf Research* 222: 104417
- Walters, B. B., Rönnbäck, P., Kovacs, J. M., Crona, B., Hussain, S. A., Badola, R., et al. (2008). Ethnobiology, socio-economics and management of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, 220-236.
- Wang, L., Silván-Cárdenas, J. L., & Sousa, W. P. (2008). Neural Network Classification of Mangrove Species from Multi-seasonal Ikonos Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 921-927.

- Ward, R. D., Friess, D. A., Day, R. H., & MacKenzie, R. A. (2016). Impacts of climate change on mangrove ecosystems: a region-by-region overview. *Ecosystem Health and Sustainability*, 1-25.
- Wealth Accounting and the Valuation of Ecosystem Services. (2017). Valuing the Protection Services of Mangroves in the Philippines. Washington D.C: World bank.
- Webb, E. J., & Magi, B. I. (2022). The Ensemble Oceanic Niño Index. *International Journal of Climatology*.
- Worthington, T., & Spalding, M. (2018). Mangrove Restoration Potential. A global map highlighting a critical opportunity. Cambridge: IUCN, University of Cambridge, The Nature Conservancy.
- Worthington, T. A., zu Ermgassen, P.S., Friess, D.A., Krauss, K. W., Lovelock, C. E., Thorley, et al. (2020). A global biophysical typology of mangroves and its relevance for ecosystem structure and deforestation. *Scientific Reports*.
- Wright, L., & B. G., T. (1977). Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*.
- Xie, D. (2022). Bio-morphodynamics of coastal wetlands with mangrove vegetation. The Netherlands: Faculty of Geosciences, Utrecht University.
- Yu, N., Liu, H., Chen, G., Chen, W., Ray, J., Wen, H., & Chao, N. (2021). Analysis of Relationships Between ENSO Events and Atmospheric Angular Momentum Variations. *earth and Space Science*.
- Zhang, X., Chua, V. P., & Cheong, H.-F. (2015). Hydrodynamics in mangrove prop roots and their physical properties. *Journal of Hydro-environment Research*, 1-14.