

Cómo citar este trabajo: Moreno Florez, P.P., Caro Camargo, C.A., & Fernando Gualdrón, D. (2026). Coastal erosion and littoral vulnerability in Moñitos (Córdoba, Colombia): interaction between climate change and anthropogenic pressure. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (107). <https://doi.org/10.21138/bage.3786>

Erosión costera y vulnerabilidad litoral en Moñitos (Córdoba, Colombia): interacción entre cambio climático y presión antrópica

Coastal erosion and littoral vulnerability in Moñitos (Córdoba, Colombia):
interaction between climate change and anthropogenic pressure

Paola Patricia Moreno Florez 

ppmoreno@jdc.edu.co

Carlos Andrés Caro Camargo 

carlosandrescaro@gmail.com

Diego Fernando Gualdrón 

dgualdron@jdc.edu.co

Facultad de Ingeniería y Tecnología

Fundación Universitaria Juan de Castellanos (Colombia)

Resumen

El presente estudio evalúa el impacto del cambio climático en la dinámica de retroceso de la línea de costa del municipio de Moñitos (Córdoba, Caribe colombiano) entre 1990 y 2023, integrando herramientas de teledetección, análisis multitemporal y correlación climática. A partir del procesamiento de imágenes Landsat y la aplicación del Digital Shoreline Analysis System (DSAS), se calcularon las tasas de cambio mediante los indicadores End Point Rate (EPR) y Linear Regression Rate (LRR), evidenciando un predominio de procesos erosivos en la franja norte y

central del litoral, con valores superiores a -2 m/año. El análisis de los índices espectrales MNDWI y NDVI mostró una pérdida progresiva de cobertura vegetal y un avance del mar sobre terrenos continentales, mientras que las variables climáticas reflejaron una tendencia hacia el aumento térmico y la disminución de la precipitación. Los resultados de correlación y regresión revelan una relación débil, aunque coherente, entre las condiciones climáticas y las tasas de erosión, lo que sugiere una influencia indirecta del cambio climático sobre la dinámica costera, amplificada por la presión antrópica. Estos hallazgos confirman que la erosión litoral en Moñitos responde a la interacción de factores climáticos, oceanográficos y humanos, destacando la necesidad de fortalecer la gestión costera adaptativa.

Palabras clave: erosión costera; análisis multitemporal; DSAS.

Abstract

This study assesses the impact of climate change on the shoreline retreat dynamics of the municipality of Moñitos (Córdoba, Colombian Caribbean) between 1990 and 2023, integrating remote sensing techniques, multitemporal analysis, and climatic correlation. Based on the processing of Landsat imagery and the application of the Digital Shoreline Analysis System (DSAS), shoreline change rates were calculated using the End Point Rate (EPR) and Linear Regression Rate (LRR) indicators, revealing a predominance of erosive processes along the northern and central sections of the coast, with rates exceeding -2 m/year. The analysis of the spectral indices MNDWI and NDVI showed a progressive loss of vegetation cover and a shoreline advance over continental areas, while climatic variables exhibited a trend of increasing temperature and decreasing precipitation. Correlation and regression analyses revealed a weak but consistent relationship between climatic conditions and erosion rates, suggesting an indirect influence of climate change on coastal dynamics, intensified by anthropogenic pressure. These findings confirm that coastal erosion in Moñitos results from the interaction between climatic, oceanographic, and human factors, highlighting the need to strengthen adaptive coastal management, geospatial monitoring, and ecological restoration strategies to ensure the environmental sustainability of the Caribbean coastline.

Key words: shoreline; multitemporal analysis; DSAS.

1 Introducción

El cambio climático constituye una de las problemáticas ambientales más trascendentales del siglo XXI, cuyos efectos se manifiestan de forma diferenciada en los ecosistemas costeros del

planeta. Estas zonas de transición, donde confluyen los sistemas marinos y terrestres, presentan una alta sensibilidad a las variaciones climáticas, convirtiéndose en indicadores tempranos de los cambios ambientales globales. Entre las consecuencias más evidentes se encuentran el ascenso del nivel medio del mar, la intensificación de los procesos erosivos, la intrusión salina en acuíferos, y la pérdida progresiva de hábitats naturales como manglares, humedales y arrecifes de coral (IPCC, 2014; Nerem et al., 2018; IPCC, 2021). Estos fenómenos no solo alteran la morfología costera, sino que también comprometen la sostenibilidad de las comunidades humanas que dependen de los recursos marino-costeros (Ojeda et al., 2009; Pizarro et al., 2019; Gomes da Silva et al., 2024).

De acuerdo con los reportes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, el nivel medio del mar podría incrementarse entre 52 y 98 cm para finales del siglo XXI, como resultado de la expansión térmica del océano y el deshielo de glaciares continentales (IPCC, 2019; IPCC, 2021). Este aumento representa una amenaza directa para las poblaciones asentadas en zonas de baja elevación, especialmente en los países tropicales y en desarrollo, donde la capacidad adaptativa es limitada (Nerem et al., 2018; Ogunrayi et al., 2024). Estudios recientes confirman que el aumento térmico global también intensifica los eventos extremos y acelera los procesos de erosión, modificando el equilibrio sedimentario y favoreciendo el retroceso de la línea de costa (Mendoza & Muñoz, 2022; Vela Pelaez et al., 2024).

En el Caribe colombiano, la erosión costera se ha convertido en un proceso dominante que amenaza los ecosistemas y los asentamientos humanos del litoral. Investigaciones como las de Correa y Vernet (2004) documentan que la baja cohesión de los sedimentos litorales, junto con la intervención antrópica (particularmente la construcción de espolones, malecones y la extracción no regulada de materiales), ha acelerado el retroceso costero en el departamento de Córdoba. Ferrucho et al. (2022) señalan que, en sectores del Caribe central, las tasas negativas del End Point Rate (EPR) y Linear Regression Rate (LRR) calculadas a partir de la herramienta DSAS (Himmelstoss et al., 2006), evidencian una pérdida sostenida de sedimentos, vinculada al ascenso relativo del nivel del mar y a la intensificación de las corrientes litorales. De manera complementaria, Garzón et al. (2021) destacan que la combinación de imágenes multitemporales y análisis geoespacial permite detectar con precisión los patrones erosivos y su evolución temporal, constituyéndose en una herramienta esencial para el monitoreo costero.

El municipio de Moñitos constituye un ejemplo representativo de esta problemática. Su litoral, caracterizado por playas arenosas de baja pendiente y manglares fragmentados, ha

experimentado un retroceso sostenido de la línea de costa durante las últimas décadas, evidenciado por la pérdida de superficie de playa, el avance del mar sobre terrenos agrícolas y el deterioro de la infraestructura costera. Estas transformaciones se ven agravadas por factores locales como la deforestación de manglares, la expansión urbana desordenada, la reducción del aporte sedimentario fluvial y la ausencia de medidas de gestión integral (Morales-Giraldo et al., 2023; Castaño González, 2024). Asimismo, la variabilidad climática interanual asociada al fenómeno de El Niño–Oscilación del Sur (ENSO) ha contribuido a modificar los patrones de precipitación, incrementando la aridez y afectando la estabilidad morfodinámica del litoral (IDEAM, 2023; NOAA, 2024).

Frente a este contexto, se hace necesario analizar la dinámica de retroceso costero del municipio de Moñitos mediante un enfoque multitemporal y climático, que integre la teledetección satelital y el análisis estadístico. El empleo del Digital Shoreline Analysis System (DSAS), en combinación con índices espectrales y registros climáticos, permite cuantificar las tasas de cambio del litoral y evaluar su relación con variables como la precipitación, la temperatura y el ascenso del nivel del mar (Xu, 2006; Barrantes & Sandoval, 2021; Ogunrayi et al., 2024). De acuerdo con Gomes da Silva et al. (2024), la aplicación de estas metodologías multiescales facilita la comprensión de los procesos erosivos y la identificación de áreas críticas para la intervención. En esta línea, el presente estudio busca evaluar el impacto del cambio climático en la dinámica de retroceso de la línea de costa de Moñitos (Córdoba) entre los años 1990 y 2023, generando información clave para la planificación territorial, la gestión costera adaptativa y el diseño de estrategias de restauración ecológica orientadas a fortalecer la resiliencia ambiental del Caribe colombiano.

2 Metodología

El estudio adopta un enfoque analítico-deductivo desde el punto de vista de la geografía como ciencia espacial, complementado con técnicas comparativas (percepción remota multitemporal, cartografía digital) y correlacionales inmersas en el método cartográfico y estadístico, permitiendo evaluar la dinámica del retroceso de la línea de costa en el municipio de Moñitos. Este enfoque permite comprender cómo los cambios morfodinámicos del litoral responden tanto a factores naturales como a variaciones climáticas interanuales y estacionales que influyen sobre la energía del oleaje, y los procesos de erosión/acreción.

2.1 Área de estudio

El área de estudio corresponde a la zona costera del municipio de Moñitos, ubicado en el departamento de Córdoba, en el Caribe colombiano (Figura 1). Este litoral presenta altos niveles de vulnerabilidad costera, resultado de la interacción de diversos factores naturales y dinámicos. La línea de costa tiene una extensión aproximada de 30 km, y se caracteriza por un material parental predominantemente sedimentario, compuesto por depósitos de texturas que varían de finas a gruesas, con una presencia significativa de material orgánico de origen coralino (Servicio Geológico Colombiano, 2022; Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2016).

Desde el punto de vista climático, la zona registra temperaturas medias anuales que oscilan entre 23 °C y 34 °C, propias de un clima tropical con marcada influencia marítima. La precipitación anual alcanza valores comprendidos entre 1000 y 1400 mm, con una distribución estacional asociada a la migración de la Zona de Convergencia Intertropical. Los vientos dominantes presentan velocidades promedio entre 10 km/h y 20 km/h, intensificándose durante los meses de diciembre a febrero, periodo en el cual se registran las condiciones de oleaje más energético. Asimismo, se observa un aumento relativo del nivel del mar entre los meses de diciembre y marzo, lo que contribuye a la intensificación de los procesos de erosión y a la dinámica de retroceso de la línea de costa (Weatherspark, 2025; Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2021; Almar et al., 2023).

2.2 Extracción multitemporal de la línea de costa

Se procesaron imágenes Landsat 5, 7 y 8 (años 1990, 2000, 2010, 2020 y 2023) con resolución de 30 metros descargadas del portal del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (Tabla 1), aplicando correcciones radiométricas y atmosféricas con DOS (Dark Object Subtraction) de Chávez (1988). Se emplearon los índices espectrales NDVI (Rouse et al., 1974) y MNDWI (Xu, 2006) para la detección de la transición tierra–agua y posterior vectorización de la línea costera mediante digitalización.

Los índices calcularon cambios en la reflectancia permitiendo identificar zonas donde la línea de costa se retrae o avanza. Estos valores también fueron posteriormente comparados con periodos climáticos específicos para detectar si los cambios espectrales coincidían con fases climáticas que favorecen mayor nivel del mar o mayor energía del oleaje. La ecuación para calcular NDVI es:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

Donde:

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

NIR: Banda del infrarrojo cercano

Red: Banda del rojo

La fórmula para calcular MNDWI es:

$$MNDWI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR)$$

Donde:

MNDWI: Modified Normalized Difference Water Index

Green: Banda del verde

SWIR: Banda del infrarrojo de onda corta

Tabla 1. Información de las imágenes de satélite.

IMAGEN	SATELITE	SENSOR	PATH/ROW	FECHA	%NUBES	EPOCA
LT05_L1TP_010054_19900302_20200916_02_T1	Landsat 5	TM	10/54	2/3/1990	45%	Normal
LE07_L1TP_010054_20010204_20200917_02_T1	Landsat 7	ETM+	10/54	8/12/2000	41%	Lluvia
LE07_L1TP_010054_20100128_20200911_02_T1	Landsat 7	ETM+	10/54	28/1/2010	33%	Seca
LC08_L1TP_010054_20200217_20200823_02_T1	Landsat 8	OLI-TIRS	10/54	17/2/2020	62%	Normal
LC08_L1TP_010054_20230225_20230301_02_T1	Landsat 8	OLI-TIRS	10/54	1/3/2023	22,50%	Seca

Fuente: elaboración propia con base en el USGS (2023)

2.3 Cálculo de tasas de cambio costero

Mediante el complemento de ArcGIS, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) (Himmelstoss et al., 2006), se generaron transectos perpendiculares a la costa con ayuda de los índices espectrales mencionados anteriormente (NDVI y MNDWI). Sobre ellos se aplicaron las herramientas, End Point Rate (EPR) y Linear Regression Rate (LRR), que permiten estimar tasas de retroceso expresadas en metros por año.

Para reforzar el análisis morfodinámico, estas tasas de retroceso se enlazaron posteriormente con las anomalías climáticas (temperatura y precipitación) obtenidas de IDEAM, NASA POWER y NOAA, permitiendo evaluar si los años con anomalías cálidas o precipitaciones extremas coincidían con un aumento en la velocidad de erosión.

2.4 Análisis climático y correlacional

Se recopilieron series de temperatura, precipitación y nivel del mar anuales obtenidas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), NASA POWER, Dirección

Marítima General (DIMAR) y la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) este último para el caso de la variabilidad climática asociada al fenómeno de El Niño/Oscilación Sur. Para la precipitación y temperatura, se utilizaron datos carga pluviométrica total anual y para la temperatura se tomaron los datos promedios anuales obtenidas de las estaciones climáticas que estaban alrededor de la zona de estudio, pertenecientes al IDEAM y se utilizó datos satelitales de NASA POWER, por las zonas que se encontraban sin información. Las interpolaciones de los datos climáticos se hicieron por medio del modelo geoestadístico *Kriging*.

Para los años 1990, 2000 y 2010 no se dispone de registros mareográficos locales continuos en la zona costera de Moñitos. En consecuencia, el análisis del nivel del mar se abordó mediante el uso de tendencias regionales del Caribe colombiano, derivadas de estaciones mareográficas de largo plazo, haciendo uso de estaciones a nivel regional como la de Cartagena. Y para los 2020 y 2023, se obtienen datos mas locales que se encuentran registrados en la estación ubicada en Isla Fuerte perteneciente a la DIMAR.

Todo lo anteriormente planteado, permitió analizar de manera detallada las fluctuaciones climáticas que influyen directamente en los procesos costeros.

Posteriormente, se aplicaron lo métodos estadísticos:

Regresiones lineales. Para evaluar el efecto individual de cada variable climática sobre las tasas EPR y LRR.

Correlación de Pearson. Para determinar si los años con anomalías climáticas positivas (mayor temperatura oceánica y mayor nivel del mar) se asocian con retrocesos más acelerados de la línea de costa.

Esta integración permitió identificar relaciones significativas entre variabilidad climática y procesos de erosión en Moñitos.

2.5 Zonificación de vulnerabilidad

Los resultados se integraron mediante una suma ponderada en el marco de un Análisis Multicriterio (AHP), lo que permitió distinguir con claridad las zonas críticas con mayor nivel de vulnerabilidad a procesos de erosión y/o agradación. A partir de esta síntesis espacial se elaboró un mapa de vulnerabilidad costera que constituye un insumo para la gestión del territorio y la planificación adaptativa frente al cambio climático.

Las variables consideradas y sus calificaciones en el cálculo se presentan en la Tabla 2, con una escala ordinal de 1 = bajo, 2 = moderado y 3 = alto y así mismo el peso de cada una.

Antes del cálculo final, se aplicó el método AHP (Saaty, 1990) para derivar y validar la asignación de pesos entre criterios. La consistencia de los juicios por pares se evaluó con la Tasa de Consistencia (CR); en nuestro caso $CR \approx 0,01$ (1 %) teniendo en cuenta las 7 variables y el rango de importancia entre ellas, dicho resultado está por debajo del umbral $CR \leq 0,10$, por lo que la matriz se considera coherente y aceptable. Aplicando las siguientes formulas:

$$Ci = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Donde:
Ci: Índice de consistencia
 λ max: LAMDAi
n: número de variables

$$Rci = \frac{1,98 * (n - 2)}{n}$$

Donde:
Rci: Índice aleatorio
n: número de variables

$$CR = Ci/Rci$$

Donde:
CR: Tasa de consistencia
Ci: Índice de consistencia
Rci: Índice aleatorio

Con las variables previamente clasificadas en 1–3 (bajo, moderado, alto) y los pesos asignados, se integraron en ArcGIS Pro mediante Raster Calculator, aplicando la suma ponderada:

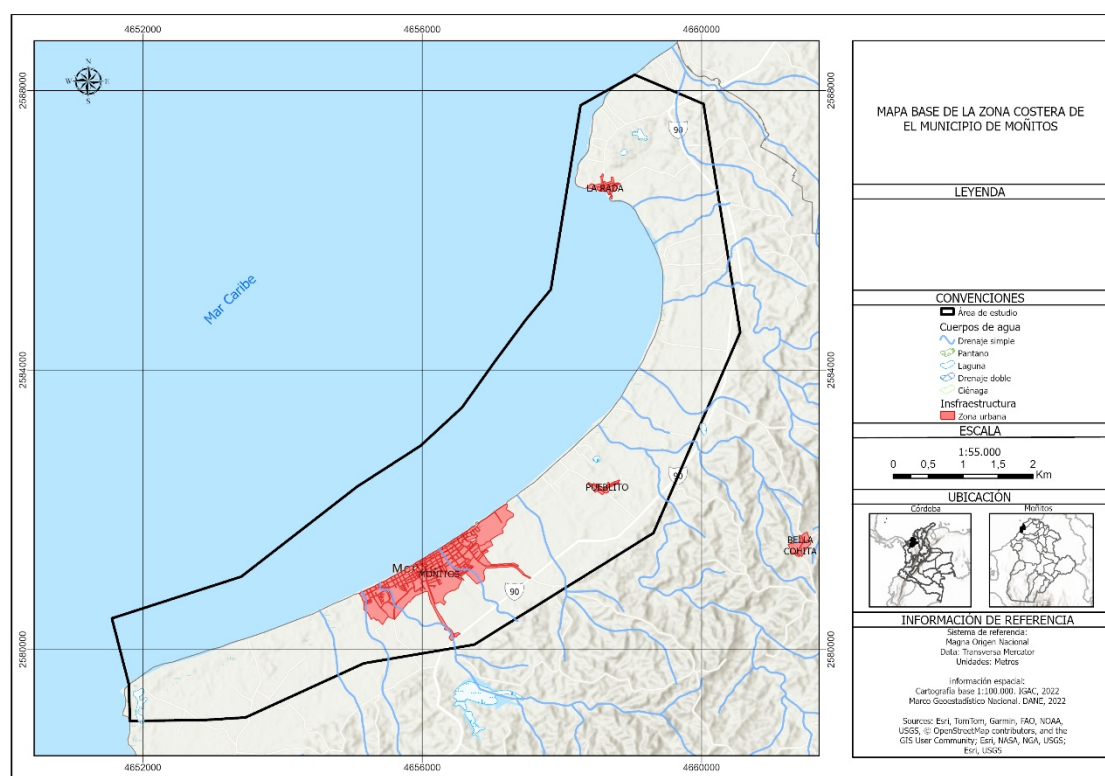
$$ICVI = 0.19 * Gm + 0.15 * Ge + 0.14 * CLC + 0.14 * Cons + 0.14 * ZU + 0.12 * So + 0.12 * Sa$$

Tabla 2. Información utilizada y su calificación

CRITERIO SÍMBOLO	INDICADOR OPERATIVO	CLASIFICACIÓN 1–3 (REGLA ABREVIADA)	PESO AHP	FUENTE/INSUM O PRINCIPAL
Geomorfología (Gm)	Unidad geomorfológica costera	1: lomas/terrazas altas · 2: cordones/terrazas medias · 3: planos de marea/plataforma	0.19	Cartografía geomorfológica IGAC
Geología (Ge)	Litología/cohesión del sustrato	1: ígneas/metamórficas/arenis- cas duras · 2: sedimentarias blandas · 3: no consolidados/arcillas	0.15	Mapas SGC
Coberturas CLC (CLC)	Uso/cobertura del suelo (CORINE)	1: bosques/vegetación natural · 2: agrícolas/matorral · 3: urbano/industrial/playas/i- ntermareal	0.14	CLC/IDEAM– IGAC; clasificación Sentinel/Landsat
Construcciones (Cons)	% área construida en buffer costero	1: <10% · 2: 10–30% · 3: >30% (buffer 500 m–1 km)	0.14	OSM/IGAC; catastro; fotointerpretación
Zonas urbanas (ZU)	Proximidad/intensi- dad urbana	1: >1 km · 2: 300 m–1 km · 3: <300 m o dentro	0.14	POT/DANE/OS- M; límites urbanos
Suelos (So)	Textura/drenaje/es- tabilidad	1: arenosos/buen drenaje · 2: franco/medio · 3: arcillosos/mal drenaje	0.12	Estudios de suelos IGAC
Degradación salina (Sa)	CE (dS/m) / evidencia de intrusión	1: CE <4 · 2: 4–8 · 3: >8	0.12	IDEAM, 2018

Fuente: elaboración propia

Figura 1. Mapa de localización



Fuente: elaboración propia

3 Resultados

El análisis multitemporal de la línea de costa del municipio de Moñitos permitió identificar variaciones espaciales y temporales significativas en la dinámica litoral entre los años 1990 y 2023. Mediante la aplicación del Digital Shoreline Analysis System (DSAS), se calcularon las tasas de cambio mediante los indicadores End Point Rate (EPR) y Linear Regression Rate (LRR), evidenciando los sectores con procesos dominantes de erosión y acreción. Estos resultados se complementaron con el análisis de las variables climáticas de precipitación, temperatura y nivel del mar obtenidos de IDEAM y DIMAR, con el fin de establecer su relación con los patrones morfodinámicos observados, para así obtener niveles específicos de vulnerabilidad costera.

3.1 Índices espectrales para la obtención de la línea costera

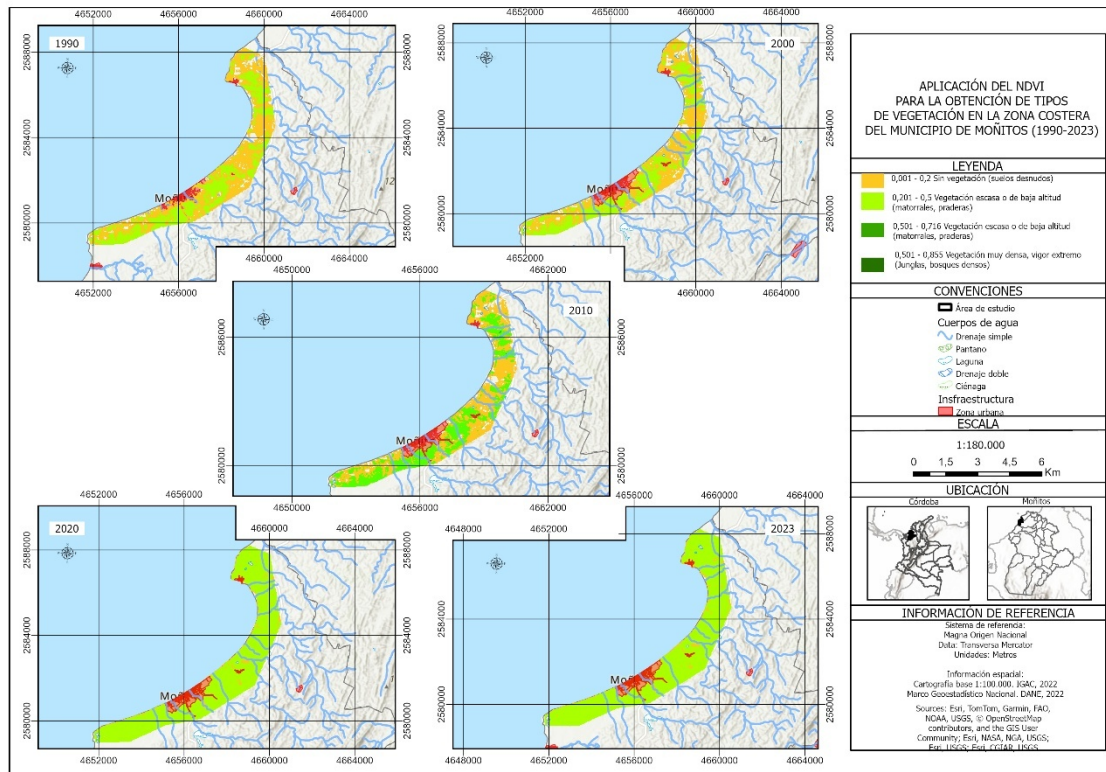
La aplicación del NDVI entre 1990 y 2023 evidencia una evolución gradual de la cobertura vegetal en la franja costera de Moñitos, predominando valores bajos a medios durante todo el periodo. En las primeras décadas, estos valores reflejan la presencia de suelos desnudos, vegetación rala y coberturas herbáceas de baja densidad, condiciones típicas de ambientes costeros sometidos a alta salinidad, acción del viento y limitada estabilidad del sustrato.

Con el avance temporal, especialmente a partir de 2010, se observa una mayor continuidad espacial de valores medios de NDVI, lo que sugiere una expansión de vegetación secundaria y matorral costero. No obstante, la ausencia de valores altos persistentes indica que la vegetación densa sigue siendo escasa, lo cual limita su función como barrera natural frente a la energía del oleaje y los procesos erosivos. Esta situación refleja un equilibrio frágil entre recuperación vegetal y perturbación ambiental.

Por su parte, el MNDWI permite identificar la variabilidad espacial del límite marítimo a lo largo del periodo analizado. Los cambios observados en la extensión de las áreas inundadas y en la proximidad del mar hacia el continente evidencian una dinámica costera activa, con avances y retrocesos del agua que responden a los factores geomorfológicos de la zona, principalmente en el corregimiento de La Rada. Estas variaciones condicionan directamente la distribución y persistencia de la vegetación costera.

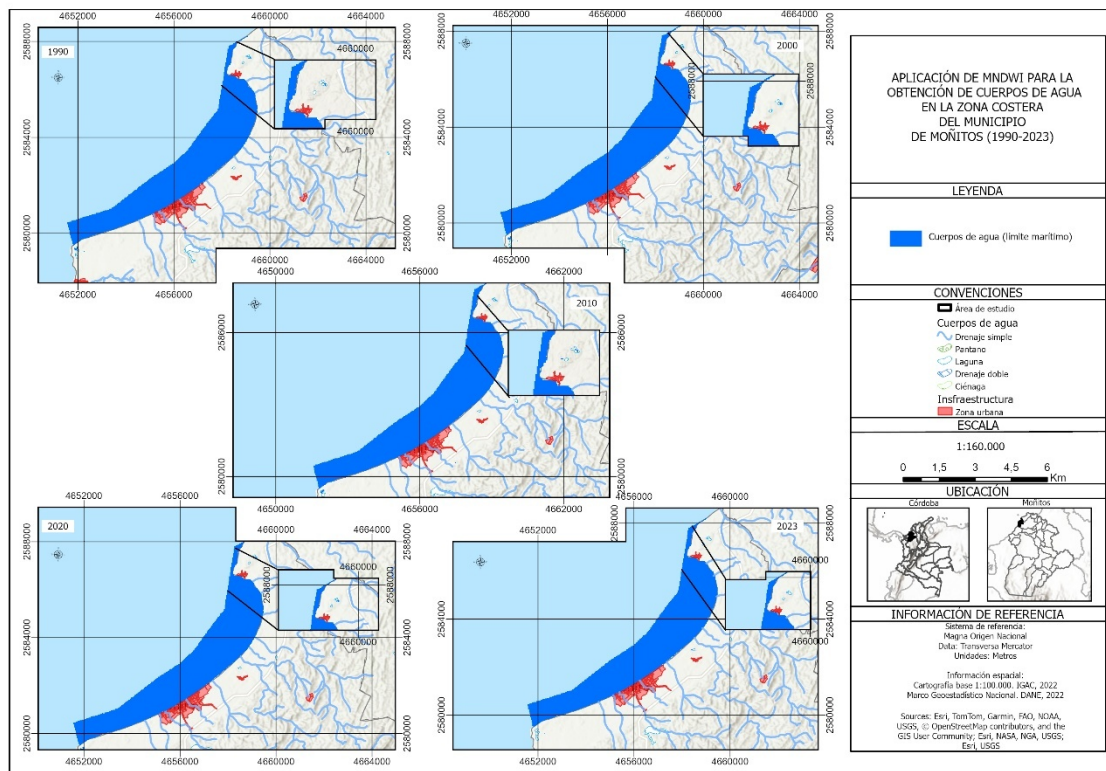
La relación conjunta entre NDVI y MNDWI pone de manifiesto un sistema altamente interdependiente, donde el aumento de la influencia hídrica y marina restringe el desarrollo vegetal, mientras que los sectores con mayor estabilidad sedimentaria favorecen coberturas vegetales incipientes. Esta interacción constituye un eslabón fundamental para comprender los patrones térmicos, pluviométricos y de cambio costero analizados en los siguientes conjuntos de mapas (Figura 2 y Figura 3).

Figura 2. Índice NDVI en la zona costera de Moñitos (1990–2023)



Fuente: elaboración propia

Figura 3. Índice MNDWI en la zona costera de Moñitos (1990–2023)



Fuente: elaboración propia

3.2 Análisis climatológico

El comportamiento de la temperatura y la precipitación en la zona costera del municipio de Moñitos se encuentra fuertemente condicionado por la variabilidad climática interanual asociada al fenómeno ENSO, representado mediante el índice ONI (Figura 4). Aunque este índice se calcula a partir de anomalías de temperatura superficial del mar en el océano Pacífico ecuatorial, su influencia se manifiesta a escala regional a través de la modulación de los patrones atmosféricos que controlan el balance de energía y humedad en el Caribe colombiano. En este sentido, las fases positivas del ONI, asociadas a eventos El Niño, tienden a coincidir con condiciones más cálidas y con déficits de precipitación, mientras que las fases negativas, propias de eventos La Niña, se relacionan con un incremento de la humedad y de los acumulados pluviométricos. Esta relación constituye el marco climático general para interpretar la distribución espacial de la temperatura y la precipitación observada en los mapas del área de estudio (NOAA Climate Prediction Center, 2023).

Figura 4. Índice ONI (El Niño/Oscilación Sur)

ÍNDICE ONI (ENSO) 1990 - 2023												
Año	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.5
2020	0.6	0.6	0.5	0.3	0	-0.2	-0.4	-0.5	-0.8	-1.1	-1.2	-1.1
2023	-0.5	-0.3	0	0.3	0.6	0.8	1.1	1.4	1.6	1.8	2	2.1

Fuente: *Cold & Warm Episodes by Season (Climatic Center Prediction)* (NOAA, 2025)

Durante 1990, los valores del índice ONI se mantuvieron próximos a la neutralidad climática, con registros trimestrales comprendidos entre 0.1 y 0.4, lo que indica la ausencia de anomalías oceánicas significativas asociadas a ENSO. En correspondencia, los mapas de temperatura y precipitación muestran condiciones cercanas a los promedios regionales, con temperaturas superficiales dominantes entre 28 y 29 °C y acumulados de precipitación anual mayoritariamente entre 1600 y 1800 mm en la franja costera de Moñitos. Para este periodo, el comportamiento del nivel del mar se interpreta a partir de información mareográfica regional del Caribe colombiano, la cual indica un régimen dominado por la marea astronómica y un nivel medio del mar relativamente estable hacia finales del siglo XX, previo al incremento sostenido observado en décadas posteriores. Estudios regionales basados en estaciones mareográficas del Caribe reportan niveles medios del mar del orden de 1.9 a 2.0 m respecto al datum local y rangos

mareales cercanos a 0.4–0.6 m, valores representativos para la costa norte de Colombia en ese periodo (DIMAR, 2015; PSMSL, 2023).

En el año 2000, el índice ONI presenta valores negativos persistentes que oscilan entre -1.7 y -0.5 , correspondientes a un evento La Niña de intensidad moderada a fuerte. Bajo estas condiciones, los mapas de precipitación evidencian un incremento espacial de los acumulados, con amplias zonas del litoral registrando valores superiores a 1.900 mm e incluso cercanos a 2.100 mm anuales, mientras que la temperatura muestra una reducción relativa, con predominio de clases entre 27 y 28 °C. En ausencia de registros mareográficos locales continuos para este periodo en la zona de Moñitos, el nivel del mar se analiza mediante referencias regionales, las cuales indican que, aunque el ascenso medio del nivel del mar aún era moderado, ya se registraban tasas positivas del orden de 2.5 a 3.0 mm/año en el Caribe colombiano. Este nivel medio regional, combinado con oscilaciones mareales semidiurnas de hasta 0.6 m, favorece la interacción entre altos aportes fluviales y energía marina, incrementando la movilidad de sedimentos finos en la franja costera (DIMAR, 2018).

Para 2010, los valores del ONI reflejan una marcada variabilidad anual, iniciando con anomalías positivas propias de un evento El Niño, con valores de hasta 1.5 en DJF, y transitando hacia valores negativos intensos cercanos a -1.6 en los trimestres finales. Esta transición se manifiesta en los mapas climáticos mediante contrastes espaciales significativos, con sectores que presentan temperaturas superiores a 30 °C durante la fase cálida inicial y un incremento posterior de la precipitación que alcanza acumulados cercanos a 2.000 mm en áreas específicas. Desde el punto de vista mareográfico regional, este comportamiento ocurre sobre un nivel medio del mar que ya presenta una tendencia ascendente más clara, con tasas cercanas a 3.0–3.5 mm/año en el Caribe colombiano. Este ascenso progresivo del nivel del mar actúa como un forzamiento permanente que amplifica los efectos de la variabilidad climática, favoreciendo procesos de redistribución sedimentaria y reajustes morfodinámicos en la línea de costa (DIMAR, 2020; PSMSL, 2023).

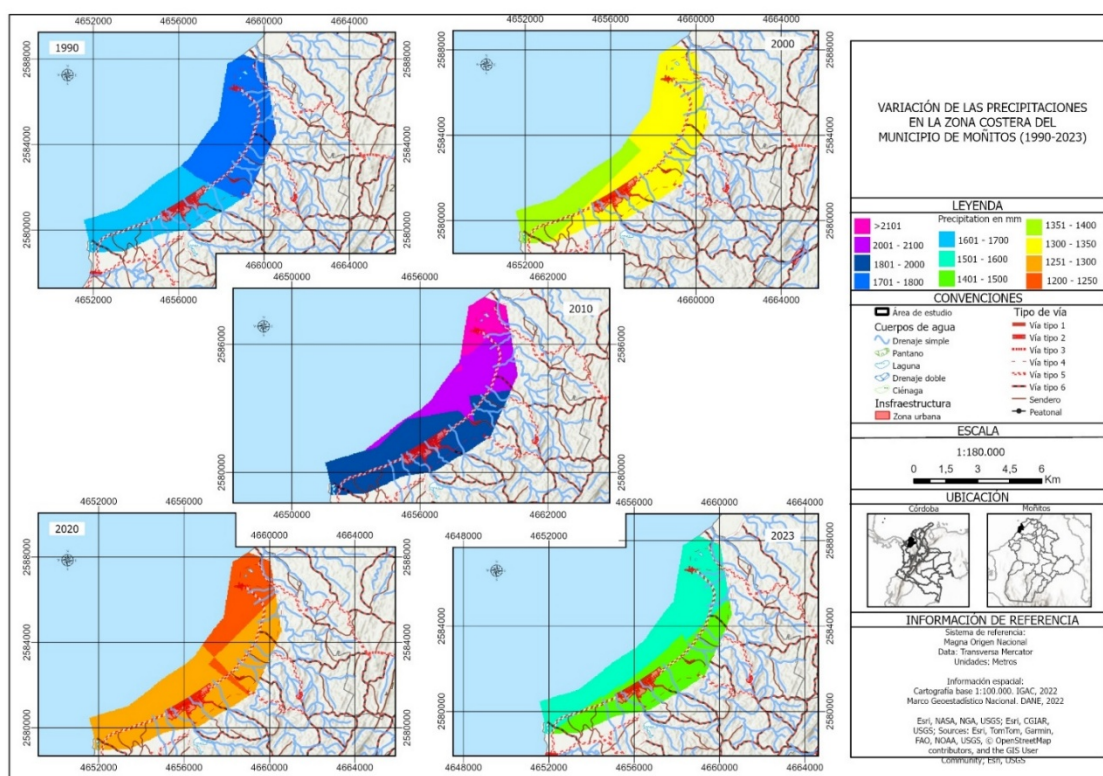
En 2020, el comportamiento del ONI indica condiciones cercanas a la neutralidad durante el primer semestre, seguidas por el establecimiento de una fase La Niña débil a moderada, con valores negativos entre -0.4 y -1.2 en la segunda mitad del año. Este patrón se expresa cartográficamente mediante un aumento gradual de la precipitación, con acumulados entre 1.700 y 1.900 mm en gran parte del litoral, acompañado de una ligera disminución de la temperatura hacia valores dominantes de 28 a 29 °C. Para este año, el análisis se sustenta en

registros mareográficos locales suministrados por DIMAR, los cuales indican un nivel medio del mar cercano a 2.00–2.05 m respecto al datum de la estación, con oscilaciones mareales máximas del orden de 0.55–0.60 m. Estas condiciones favorecen la inundación periódica de sectores bajos durante pleamares, potenciando la persistencia de cuerpos de agua someros y reflejándose en valores elevados del MNDWI y en una mayor continuidad espacial de coberturas vegetales de baja a media densidad, con valores de NDVI entre 0.3 y 0.5 (DIMAR, 2023).

El año 2023 se caracteriza por un evento El Niño fuerte y sostenido, con valores del ONI que aumentan progresivamente desde –0.5 a inicios del año hasta superar 2.0 en los trimestres finales. Este escenario se manifiesta en los mapas de temperatura mediante la expansión de las clases más altas, alcanzando valores de 30 a 31 °C en amplios sectores de la franja costera, mientras que la precipitación muestra una reducción relativa, con acumulados predominantemente entre 1400 y 1600 mm. De manera simultánea, los registros mareográficos locales reportados por DIMAR indican niveles medios del mar entre 2.05 y 2.10 m, confirmando la persistencia de un nivel marino elevado. La superposición de niveles del mar altos, reducción del aporte fluvial y estrés térmico intensifica la exposición del sustrato costero, limita el vigor de la cobertura vegetal y reduce la capacidad del sistema para amortiguar la energía del oleaje, reforzando los procesos erosivos observados en la franja litoral del municipio de Moñitos (DIMAR, 2024).

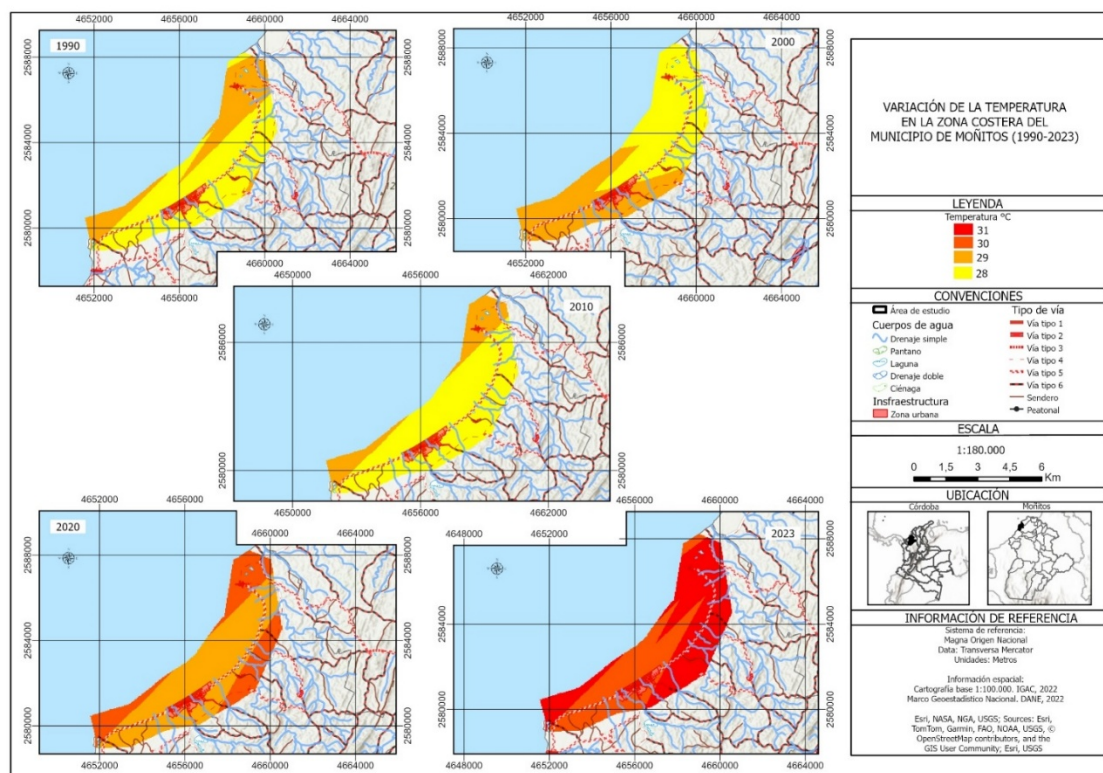
La interacción entre temperatura, precipitación (Figura 5 y Figura 6) y nivel del mar, modulada por la variabilidad ENSO, se expresa espacialmente en la dinámica superficial del territorio costero mediante cambios cuantificables en los índices espectrales y en las tasas de cambio litoral. Mientras que en los años analizados mediante proxies mareográficos regionales el nivel del mar actúa como un forzamiento de fondo que condiciona la respuesta del sistema, en 2020 y 2023 los datos locales evidencian cómo las oscilaciones mareales y el nivel medio elevado amplifican los efectos climáticos continentales. Esta superposición de forzamientos explica la coherencia espacial entre valores bajos de NDVI, incrementos del MNDWI y sectores con mayores tasas de erosión, destacando el papel del nivel del mar como componente estructural en la dinámica costera del municipio de Moñitos.

Figura 5. Precipitación en zona costera de Moñitos (1990–2023)



Fuente: elaboración propia

Figura 6. Temperatura en zona costera de Moñitos (1990–2023)

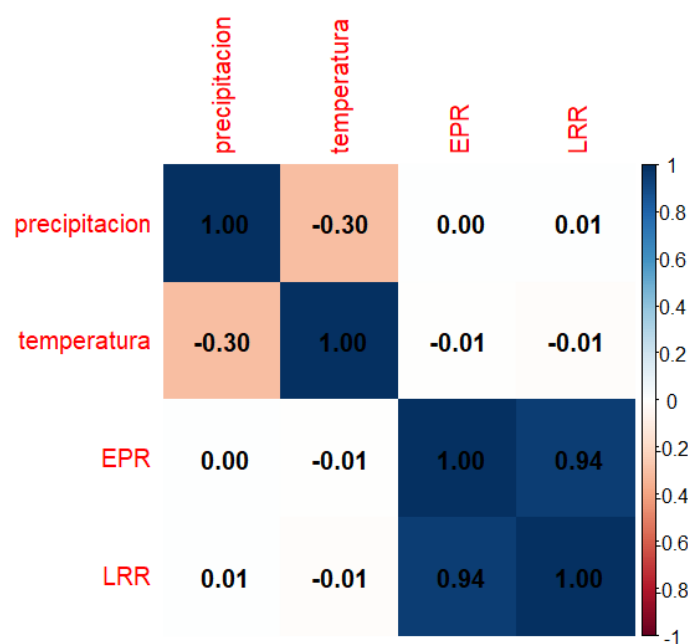


Fuente: elaboración propia

3.4 Evaluación de la línea de costa en función de la variabilidad climática

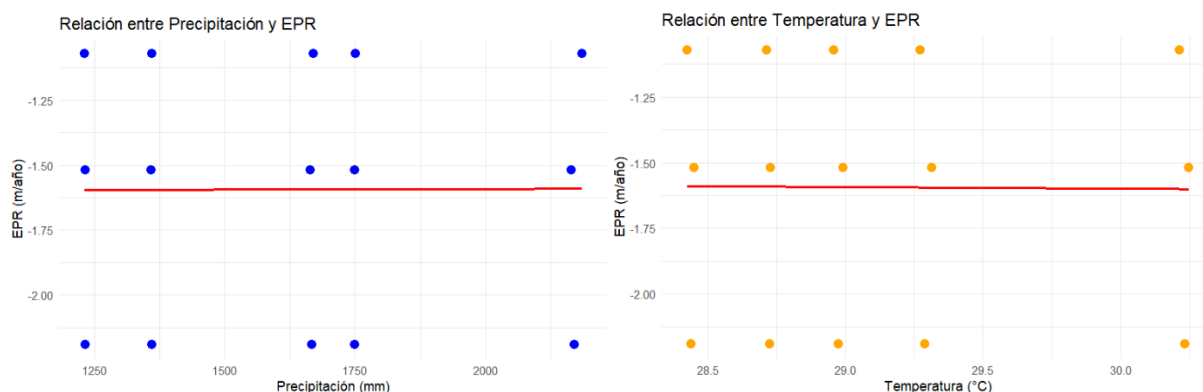
La matriz de correlación de Pearson refuerza la interpretación espacial del mapa de tasas de cambio costero al mostrar que las variables climáticas continentales ejercen una influencia estadística muy limitada sobre el desplazamiento de la línea de costa. Las correlaciones entre precipitación y EPR ($r = 0.00$) y entre temperatura y EPR ($r = -0.01$) evidencian la ausencia de una relación lineal directa, lo que coincide con los gráficos de correlación (Figura 7 y Figura 8), donde se observan pendientes prácticamente horizontales. Este comportamiento es coherente con la dominancia de tramos clasificados como estables, en los que los cambios netos permanecen dentro de umbrales bajos aún bajo condiciones climáticas contrastantes. En contraste, la correlación muy alta entre EPR y LRR ($r \approx 0.94$) confirma la consistencia interna de las tasas calculadas y respalda la robustez del análisis del cambio litoral.

Figura 7. Correlación entre los componentes climáticos y las tasas de cambio



Fuente: elaboración propia

Figura 8. Correlación EPR y precipitación—temperatura



Fuente: elaboración propia

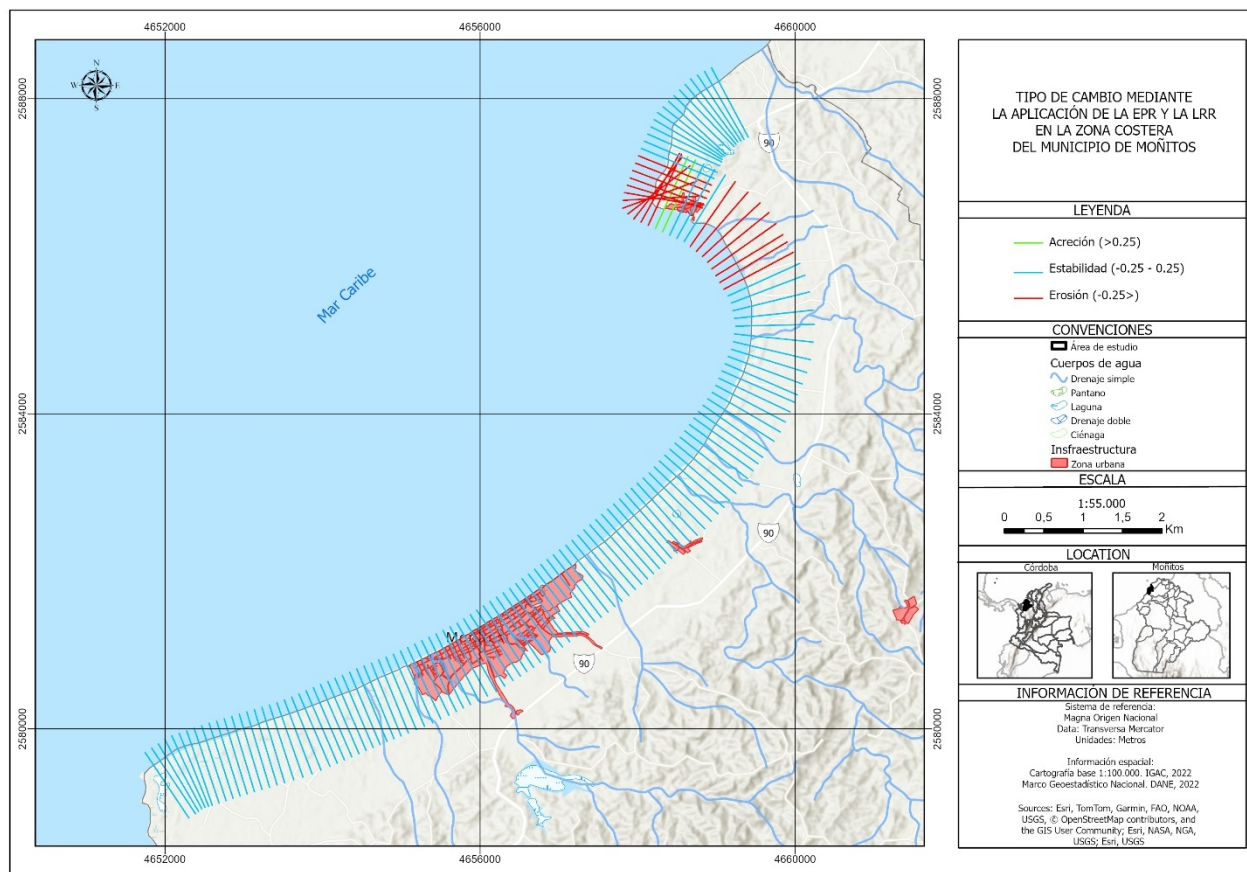
La correlación negativa moderada entre precipitación y temperatura ($r = -0.30$) refleja la dinámica climática característica del Caribe colombiano, en la cual los periodos más húmedos tienden a coincidir con temperaturas ligeramente menores, y viceversa. No obstante, esta relación climática interna no se traduce en un control directo sobre las tasas de erosión o acreción, lo que explica por qué, en el mapa, sectores con regímenes térmicos y pluviométricos similares presentan comportamientos costeros divergentes. En este sentido, la matriz confirma que la variabilidad climática actúa como un factor de fondo que modula las condiciones superficiales del territorio, pero no define espacialmente las zonas de cambio neto de la línea de costa.

Por el contrario, la correlación extremadamente alta entre EPR y LRR ($r = 0.94$) constituye un resultado clave para la interpretación del mapa, ya que valida la consistencia interna de las tasas de cambio calculadas mediante DSAS. Esta alta concordancia indica que los patrones espaciales de erosión, acreción y estabilidad no son artefactos del método, sino expresiones robustas de la dinámica litoral a lo largo del periodo analizado. En consecuencia, los núcleos de erosión identificados en el mapa (especialmente aquellos con agrupaciones continuas de transectos) representan procesos persistentes y coherentes en el tiempo, más que fluctuaciones aleatorias asociadas a años climáticamente extremos.

La lectura integrada del mapa (Figura 9) y de la matriz de correlación permite interpretar que los sectores estables dominantes corresponden a tramos donde el balance entre remoción y aporte sedimentario se mantiene compensado, aun cuando la precipitación y la temperatura varían interanualmente. Esta compensación explica la concentración de valores de EPR cercanos a cero y, por ende, la baja sensibilidad de las correlaciones climáticas. En contraste, los sectores

erosivos emergen allí donde factores geomorfológicos y marinos (como la exposición al oleaje, la geometría del litoral y el transporte litoral) rompen ese equilibrio, generando retrocesos netos que no pueden ser explicados por las variables climáticas continentales de forma aislada.

Figura 9. Representación de las tasas de cambio por EPR y LRR



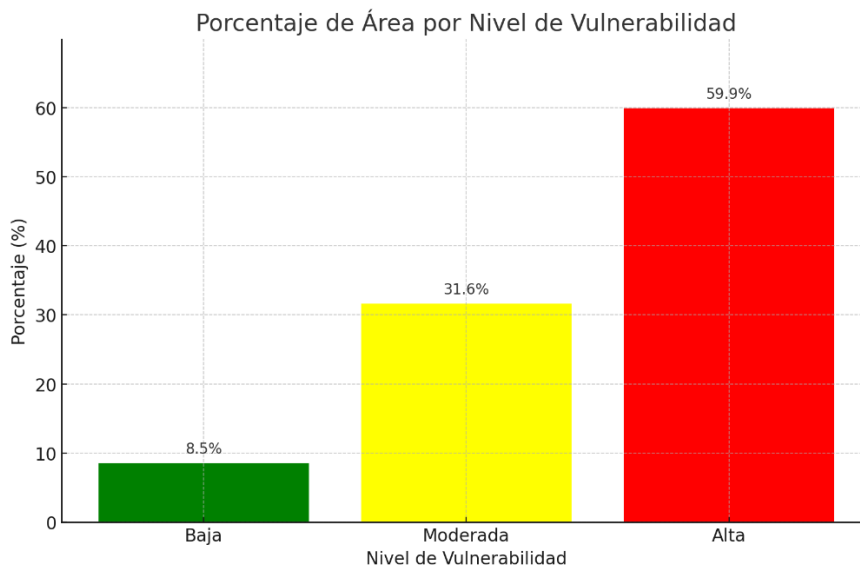
Fuente: elaboración propia

3.5 Vulnerabilidad costera

El gráfico de porcentaje (Figura 10) de área por nivel de vulnerabilidad muestra una distribución claramente asimétrica, en la que predomina la categoría de alta vulnerabilidad, que concentra aproximadamente el 59.9 % del área costera analizada, seguida por una vulnerabilidad moderada con 31.6 %, mientras que solo un 8.5 % corresponde a zonas de baja vulnerabilidad. Esta distribución cuantitativa evidencia que más de dos tercios del litoral de Moñitos se encuentran en condiciones críticas o potencialmente críticas frente a procesos de erosión, inundación y pérdida de estabilidad geomorfológica. Desde una perspectiva espacial, este patrón sugiere que los factores que controlan la vulnerabilidad no son puntuales ni aislados, sino

que operan de manera sistemática a lo largo de la franja costera, superando ampliamente las áreas que mantienen condiciones de equilibrio relativo.

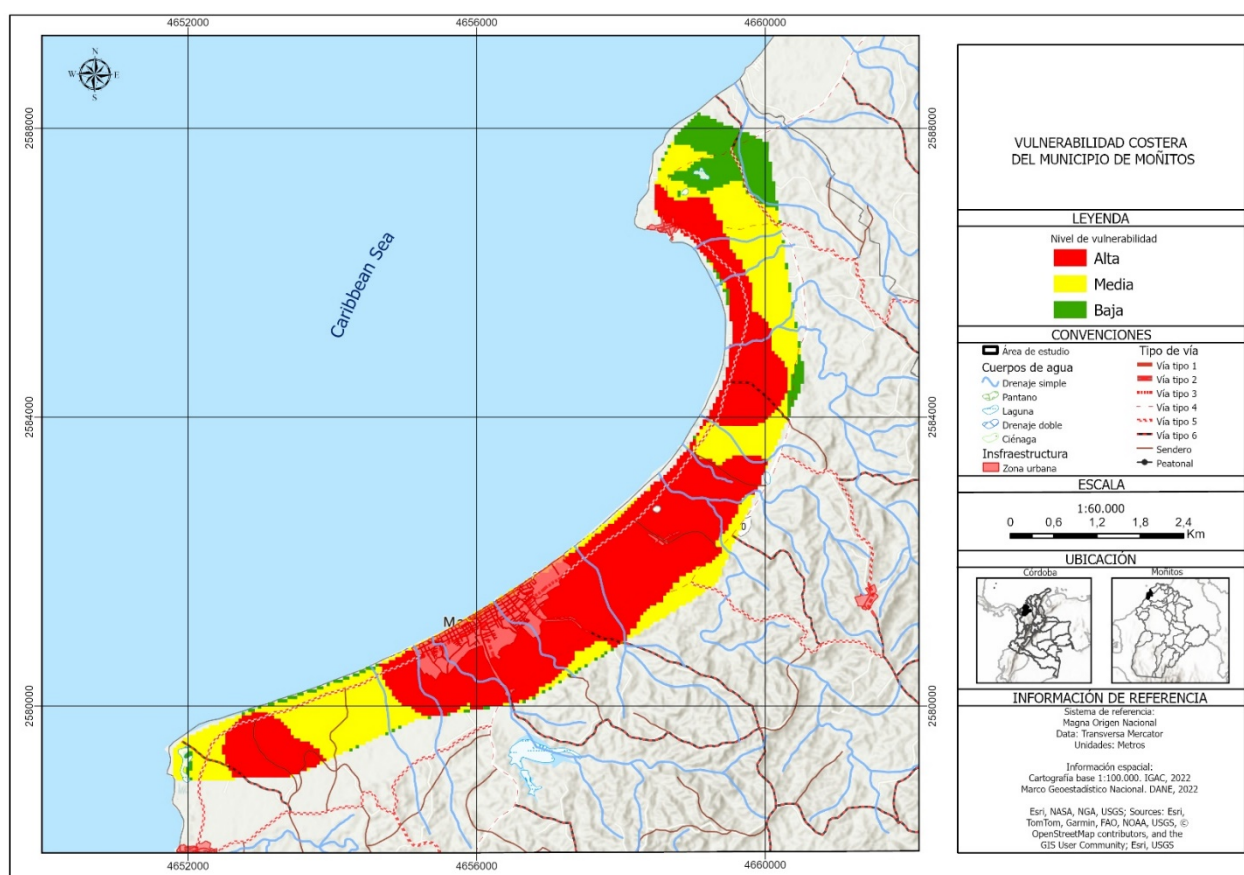
Figura 10. Porcentajes según extensión de vulnerabilidad



Fuente: elaboración propia

El mapa de vulnerabilidad costera confirma y espacializa esta tendencia, mostrando una continuidad longitudinal de sectores clasificados como alta vulnerabilidad (en rojo) que se extienden a lo largo de gran parte del frente costero como en el corregimiento de La Rada, particularmente en el tramo central y sur del municipio. Estas zonas coinciden con sectores previamente identificados como erosivos o con cambios netos significativos en la línea de costa, lo que refuerza la coherencia interna del análisis multicriterio. Las áreas de vulnerabilidad moderada (en amarillo) se disponen como franjas de transición entre los sectores altamente vulnerables y aquellos de menor afectación, sugiriendo una dinámica costera en la que pequeños cambios en los forzamientos (como variaciones en el nivel del mar, en la energía del oleaje o en la cobertura vegetal) podrían desencadenar un paso hacia estados de mayor inestabilidad. En contraste, las áreas de baja vulnerabilidad (en verde) aparecen de forma fragmentada y restringida, principalmente en el extremo norte, asociadas a sectores con mayor cobertura vegetal, menor exposición directa al oleaje y una morfología costera ligeramente más protegida, lo que limita su extensión espacial y refuerza su carácter residual dentro del sistema.

Figura 11. Vulnerabilidad costera de Moñitos



Fuente: elaboración propia

Las evidencias fotográficas aportan una validación empírica directa del patrón observado tanto en el gráfico como en el mapa. En las imágenes se documentan procesos activos de erosión costera, con socavación del borde litoral, colapso de estructuras antrópicas, pérdida de suelo y exposición directa del sustrato frente a la acción del oleaje. La presencia de enrocados improvisados, fragmentos de concreto y residuos de construcción dispuestos de manera informal a lo largo del borde costero indica intentos reactivos y no planificados de mitigación, los cuales, lejos de resolver el problema, pueden intensificar la reflexión del oleaje y acelerar la erosión local. Asimismo, se observa la proximidad inmediata de viviendas (Figura 12) y equipamientos básicos (Figura 13) a la línea de costa, lo que incrementa significativamente el componente de exposición dentro del índice de vulnerabilidad.

Figura 12. Viviendas destruidas por la erosión costera



Fuente: fotografía propia (2021)

Figura 13. Institución Educativa a menos de 8 m del mar



Fuente: fotografía propia (2021)

Adicionalmente, las imágenes muestran una cobertura vegetal costera fragmentada y en retroceso (Figura 14), con árboles inclinados o parcialmente socavados, lo que evidencia la pérdida progresiva de la función estabilizadora de la vegetación. Esta condición es coherente con los valores bajos a medios de NDVI identificados previamente y con la alta proporción de áreas clasificadas como altamente vulnerables en el mapa. La reducción de la vegetación, combinada con niveles del mar elevados y oscilaciones mareales recurrentes, favorece la saturación del sustrato y la pérdida de cohesión del material superficial, facilitando el avance del proceso erosivo incluso bajo condiciones climáticas moderadas.

Figura 14. Árboles volcados, poca vegetación y viviendas expuestas a la erosión



Fuente: fotografía propia (2021)

4 Discusión

Los resultados evidencian un proceso erosivo predominante en el litoral del municipio de Moñitos, asociado a la interacción compleja entre forzamientos climáticos, oceanográficos y antrópicos. Las tasas negativas de EPR y LRR obtenidas reflejan una pérdida sostenida de sedimentos a lo largo del periodo de análisis, lo cual concuerda con lo reportado por Ferrucho et al. (2022) para el Caribe colombiano, donde el retroceso costero se vincula principalmente con el ascenso relativo del nivel del mar y el incremento de la energía del oleaje. En este contexto, el comportamiento observado en Moñitos no constituye un fenómeno aislado, sino que se inserta dentro de una tendencia regional más amplia, caracterizada por la progresiva pérdida de estabilidad geomorfológica en costas de baja pendiente y elevada exposición marina. De manera complementaria, Mendoza y Muñoz (2022) señalan que el aumento térmico regional contribuye a intensificar la dinámica marina y a reducir la capacidad de compensación sedimentaria, efecto que resulta consistente con los patrones de erosión persistente identificados en la franja costera de Moñitos.

Desde el punto de vista metodológico, la integración del DSAS con variables climáticas permitió identificar con claridad los patrones de retroceso multitemporal de la línea de costa y diferenciar sectores con erosión crónica, estabilidad relativa y acreción localizada. No obstante, tal como advierten Gomes da Silva et al. (2024), las tasas de cambio obtenidas mediante EPR y LRR pueden presentar incertidumbres cuando no se incorporan de forma explícita factores locales como la pendiente de playa, la morfología del perfil costero, la granulometría del sedimento y las variaciones instantáneas del nivel del mar. En este sentido, Castaño González (2024) subraya

la necesidad de complementar los análisis de línea de costa con aproximaciones hidrodinámicas y ajustes batimétricos, particularmente en sistemas micromareales como el Caribe colombiano, donde pequeñas variaciones del nivel marino pueden traducirse en desplazamientos horizontales significativos de la línea de costa, amplificando los procesos erosivos aún bajo condiciones climáticas moderadas.

Las transformaciones detectadas responden tanto a procesos naturales como a presiones antrópicas acumulativas que actúan de manera sinérgica. El aumento de la temperatura media y la disminución relativa de la precipitación, asociados a la variabilidad climática regional y a la influencia de eventos ENSO, favorecen la intensificación del oleaje y la reducción del aporte sedimentario fluvial, contribuyendo a la regresión del litoral (IPCC, 2021; Mendoza & Muñoz, 2022). Estos cambios climáticos alteran el balance hidrosedimentario del sistema costero, reduciendo la capacidad natural de recuperación tras episodios de alta energía marina. A estos factores se suma la deforestación de manglares, la expansión urbana no planificada y la ocupación de zonas de amortiguamiento costero, procesos que disminuyen la capacidad del ecosistema para retener sedimentos, disipar la energía del oleaje y amortiguar la acción directa del mar sobre el sustrato costero (Barrantes & Sandoval, 2021; Morales-Giraldo et al., 2023).

Este patrón es consistente con lo documentado en otros litorales tropicales sometidos a presiones similares. Ogunrayi et al. (2024) reportan en el golfo de Guinea que la combinación entre ocupación antrópica del borde costero y forzamientos marinos persistentes acelera la pérdida de sedimentos y la degradación de las coberturas vegetales protectoras, generando escenarios de alta vulnerabilidad socioambiental. De forma comparable, Díaz et al. (2024) describen en la costa sur de Cuba un retroceso litoral asociado a la eliminación de manglares y a la modificación artificial del perfil costero, procesos que presentan paralelismos claros con la dinámica observada en Moñitos. Estas coincidencias refuerzan la idea de que la erosión costera responde a mecanismos comunes en regiones tropicales, donde el cambio climático actúa como un factor de presión adicional sobre sistemas ya debilitados por la intervención humana.

Desde la perspectiva de la gestión territorial y la política pública, los resultados son coherentes con los principios del Manejo Integrado de Zonas Costeras (MIZC) y con los instrumentos de planificación vigentes en Colombia, como los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y los Planes de Ordenamiento y Manejo Integrado de las Unidades Ambientales Costeras (POMIUAC), así como con los lineamientos técnicos de INVEMAR–DIMAR para el monitoreo de la erosión y la dinámica de la línea de costa. La identificación de tramos con erosión crónica y alta

vulnerabilidad respalda la necesidad de establecer franjas de retiro dinámicas basadas en tasas históricas de cambio, condicionar los usos del suelo según niveles de peligro y priorizar intervenciones en los sectores más críticos, evitando soluciones rígidas que puedan alterar el balance sedimentario natural y generar efectos adversos a mediano y largo plazo.

En este contexto, la restauración de ecosistemas costeros, particularmente manglares y sistemas de vegetación ribereña, emerge como una alternativa efectiva para la mitigación del impacto erosivo, tal como lo señalan Morales-Giraldo et al. (2023) para el litoral cordobés. Estas soluciones basadas en la naturaleza contribuyen no solo a la estabilización del sustrato y a la reducción de la energía del oleaje, sino también al fortalecimiento de la resiliencia ecológica y social del territorio. Combinadas con un ordenamiento territorial adaptativo y sustentado en evidencia científica, estas estrategias permiten reducir la exposición al riesgo y aumentar la capacidad de respuesta del sistema costero frente a escenarios climáticos futuros, en concordancia con las recomendaciones del IPCC (2021) sobre adaptación costera.

5 Conclusión

La zona costera del municipio de Moñitos evidencia una dinámica litoral dominada por procesos de erosión y retroceso persistente, asociados a la interacción entre forzamientos climáticos, oceanográficos y antrópicos. Las tasas negativas de EPR y LRR obtenidas a partir del análisis multitemporal confirman una pérdida progresiva de superficie terrestre, especialmente en los sectores norte y central del litoral, donde la exposición directa al oleaje, la acción de las corrientes litorales y la configuración geomorfológica de baja pendiente favorecen el avance del mar sobre áreas continentales. Este comportamiento no responde a eventos aislados, sino a una tendencia sostenida en el tiempo, coherente con los patrones de erosión documentados para otros tramos del Caribe colombiano sometidos a procesos de calentamiento regional y disminución del aporte sedimentario fluvial.

Los resultados ponen de manifiesto que, si bien las correlaciones estadísticas directas entre las variables climáticas continentales y las tasas de cambio del litoral son débiles, la coherencia espacial entre las áreas más erosionadas y los escenarios de mayor estrés térmico e hídrico sugiere una influencia indirecta del cambio climático sobre la dinámica costera. El incremento de la temperatura, la reducción relativa de la precipitación y la variabilidad asociada a eventos ENSO actúan como factores moduladores que intensifican la energía marina y alteran el balance hidrosedimentario del sistema. Estas condiciones, al interactuar con una cobertura vegetal cada

vez más fragmentada, reducen la capacidad natural del litoral para amortiguar los efectos del oleaje y favorecer la estabilidad del sustrato.

La presión antrópica emerge como un factor determinante en la intensificación de los procesos erosivos. La deforestación de manglares, la ocupación de zonas de amortiguamiento costero, la expansión urbana no planificada y la implementación de obras rígidas sin criterios integrales de diseño han contribuido a debilitar la resiliencia geomorfológica y ecológica del sistema costero. Estas intervenciones han alterado el transporte sedimentario, incrementado la exposición del litoral y acelerado la pérdida de suelo en sectores ya vulnerables, generando implicaciones directas para la seguridad de las comunidades costeras, la infraestructura y los ecosistemas asociados.

Desde el punto de vista metodológico, la integración de teledetección, análisis multitemporal de la línea de costa mediante DSAS, índices espectrales y variables climáticas permitió caracterizar de manera robusta la evolución espacial y temporal del litoral de Moñitos. Este enfoque demostró ser adecuado para identificar tramos con erosión crónica, zonas de estabilidad relativa y áreas en transición, constituyéndose en una herramienta valiosa para la evaluación de la vulnerabilidad costera y la toma de decisiones en contextos de cambio climático. No obstante, los resultados resaltan la necesidad de complementar estos análisis con información hidrodinámica y mareográfica de mayor resolución temporal, que permita capturar de forma más precisa la influencia del nivel del mar y del oleaje en la dinámica litoral.

En función de los hallazgos obtenidos, se recomienda lo siguiente:

- Fortalecer la gestión costera adaptativa mediante soluciones basadas en la naturaleza, priorizando la restauración y conservación de manglares, dunas y coberturas vegetales ribereñas, dada su función clave en la retención de sedimentos, la disipación de la energía del oleaje y la reducción de la vulnerabilidad costera.
- Implementar un sistema de monitoreo geoespacial continuo, que integre imágenes satelitales multitemporales, registros mareográficos y variables climáticas, con el fin de actualizar periódicamente las tasas de cambio de la línea de costa (EPR y LRR) y anticipar escenarios de riesgo asociados al ascenso del nivel del mar.
- Establecer franjas de retiro dinámicas basadas en evidencia científica, utilizando las tasas históricas de retroceso costero y los escenarios de ascenso del nivel del mar como criterio técnico para la delimitación de zonas de protección y la restricción de usos del suelo en sectores altamente vulnerables.

- Regular y controlar el uso del suelo en zonas de alta vulnerabilidad, evitando la expansión urbana no planificada y la ocupación de áreas de amortiguamiento costero, integrando los resultados del análisis en los instrumentos de planificación territorial (POT y POMIUAC).

Declaración responsable: Las/os autoras/es declaran que no existe ningún conflicto de interés, financiero, institucional o personal, que haya influido en el desarrollo del presente estudio. En cuanto a las contribuciones, Paola Patricia Moreno Flórez participó en la conceptualización y estructuración del proceso metodológico, realizó el trabajo de campo y lideró la redacción y organización del manuscrito; Carlos Andrés Caro Camargo contribuyó en la formulación metodológica, procesamiento y análisis de la información geoespacial, así como en la interpretación técnica de los resultados y revisión del documento; y Diego Fernando Gualdrón participó en el diseño metodológico, análisis de datos, estructuración de resultados y revisión académica del contenido. Todos los autores revisaron y aprobaron la versión final del manuscrito y asumen responsabilidad pública por su contenido.

Bibliografía

- Barrantes, G., & Sandoval, C. (2021). Evaluación de los cambios morfodinámicos del litoral Caribe sur de Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2(67), 45-62. <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.6>
- Castañó González, M. J. (2024). *Variación espaciotemporal de la hidrodinámica en el sector playa La Martina, golfo de Urabá* (Undergraduate's Final Thesis, Universidad de Antioquia, Colombia). <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstreams/9c9125f9-e994-45ba-8a91-5a249f45be64/download>
- Chávez, P.S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24(3), 459-479. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3)
- Correa, I.D., & Vernet, G. (2004). *Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo) costa Caribe colombiana*. INVEMAR.
- Díaz, R., Hernández, D., & Gómez, L. (2024). Evaluación del retroceso costero en la provincia de Mayabeque, Cuba, mediante análisis multitemporal. *Revista Cubana de Geociencias*, 43(4), 515-525. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v43i4.18374>
- Ferrucho-Maloof, I.E., Otero-Díaz, L.J., & Cueto-Fonseca, J.E. (2022). Cambios recientes de la línea de costa entre Bocas de Ceniza y Puerto Velero (Atlántico, Colombia). *Boletín de Geología*, 44(3), 159-178. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n3-2022007>
- Garzón, F., Molina, I., & Velasco, J. (2021). Análisis espacio-temporal del fenómeno islas de calor urbano y su relación con factores biofísicos extraídos de imágenes multiespectrales usando técnica PCA-MLR. *ACOFI*, 48(3), 55-70. <https://doi.org/10.26507/ponencia.1567>
- Gomes da Silva, P., Gallego, A., Pellón E., Martínez, J., & Silio-Calzada, A. (2024). Limitaciones para la detección de cambios en la línea de costa a partir de datos de satélite: la incertidumbre asociada a la pendiente de la playa. In *XII Jornadas de Geomorfología Litoral* (pp. 140-145). Valencia, September 25-27. <https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18701>
- IDEAM (2023). *Boletín climatológico anual de Colombia 2023*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019). *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Mendoza, J., & Muñoz, C. (2022). *Análisis de la variación de la línea costera debido a los procesos de erosión y sedimentación de manera natural y antropogénica en la Bahía del Callao empleando imágenes de satélite entre los años 2001 y 2020* (Doctoral dissertation, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Peru). <http://doi.org/10.19083/tesis/667263>

Morales-Giraldo, D.F., Coca, O., & Ricaurte-Villota, C. (2023). Evaluación de rasgos geológicos del frente costero: línea base para alternativas de mitigación y protección basadas en ecosistemas de la zona costera del departamento de Córdoba, Colombia. *Boletín de Geología*, 45(3), 51-62. <https://doi.org/10.18273/revbol.v45n3-2023003>

Nerem, R.S., Beckley, B.D., Fasullo, J.T., Hamlington, B.D., Masters, D., & Mitchum, G.T. (2018). Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(9), 2022-2025. <https://doi.org/10.1073/pnas.1717312115>

NOAA (2024). *Oceanic Niño Index (ONI): Historical data and analysis*. National Oceanic and Atmospheric Administration. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

Ogunrayi, O. A., Mattah, P. A. D., Folorunsho, R., Jolaiya, E., & Ikuomola, O. J. (2024). A Spatio-Temporal Analysis of Shoreline Changes in the Ilaje Coastal Area of Ondo State, Nigeria. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 18. <https://doi.org/10.3390/jmse12010018>

Ojeda, J., Álvarez, J., Martín, D., & Fraile, P. (2009). El uso de las tecnologías de la información geográfica para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza (España). *GeoFocus*, 9, 83-100. <https://geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/162>

Pizarro, O., Hormazábal, S., González, A., & Yañez, E. (2019). *Impactos del cambio climático sobre la zona costera de América Latina y el Caribe: metodologías y herramientas para la evaluación de impactos*. CEPAL.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. In S.C. Freden, E.P. Mercanti & M. Becker (Eds.), *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium* (vol. 1, pp. 309-317). NASA SP-351.

Vela Pelaez, A.A., Navarro Martínez, M.A., Mendoza Briseño, M.A., Sánchez Sánchez, J.A., & Esparza Olguín, L.G. (2024). Análisis multitemporal de cambios en el NDVI en una región con aprovechamiento forestal en la península de Yucatán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(81), 160-186. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1425>

Xu, H. (2006). *Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery*. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>