



Determinación del riesgo por erosión e inundación costera en el marco del cambio climático, en el sector entre Punta Rey - río Hobo, departamentos de Antioquia y Córdoba a través de la evaluación de variables hidrodinámicas

Nery Sirley Barrientos Porras

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Gestión Ambiental

Director

Vladimir G. Toro Valencia, Doctor (PhD) en Oceanografía Física

Asesor

Héctor García Nava, Doctor (PhD) en Oceanografía Física

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gestión Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

Cita	(Barrientos-Porras, 2025)
Referencia	Barrientos-Porras, N. (2025). <i>Evaluación de variables hidrodinámicas como herramienta para la determinación del riesgo por erosión e inundación costera en el marco del cambio climático</i> [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Maestría en Gestión Ambiental , Cohorte XI.

Grupo de Investigación. GISMAC. Grupo de Investigación en Sistemas Marinos y Costeros



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mis hijos Dylan y Alena

A mi esposo Alder

A mi madre Ana T.

A mis hermanas Ana, Carolina y Lorena

A mis sobrinas María C. y Jania.

Agradecimientos

En primer lugar, doy gracias a **Dios**, mi fuente de sabiduría y fortaleza, por guiarme en este camino y permitirme culminar esta etapa de mi formación. Sin su gracia y misericordia, este logro no habría sido posible.

A mi **familia**, mi más profundo agradecimiento por su amor incondicional, paciencia y apoyo constante. A mis hijos, por ser inspiración, luz y fuerza cada día de mi vida. A mi madre, por ser mi ejemplo de perseverancia; a mis hermanas, por su aliento en cada paso que doy; y a mi esposo, por acompañarme en los momentos de desafío/sacrificio y brindarme su apoyo incondicional. Este logro es también suyo.

A mi director de tesis, **Vladimir Toro**, por su invaluable orientación, dedicación y conocimientos compartidos durante este proceso. Sus aportes críticos, su compromiso y amor por la academia fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo. Igualmente, agradezco a mi asesor, **Héctor García**, por sus valiosas sugerencias y acompañamiento académico.

Al programa **PIMECLA** y a la **DIMAR** que hicieron posible esta investigación, facilitando el acceso a información medida, mi sincero reconocimiento. En especial, a la **Universidad de Antioquia** por brindarme las herramientas necesarias para mi crecimiento personal y profesional, desde mi pregrado hasta hoy.

Finalmente, a mis **compañeros y colegas**, por sus consejos, debates enriquecedores y por estar presentes en este recorrido. Cada uno de ustedes dejó una huella en este proceso.

Este logro no es solo mío, es el fruto que se cultivó con el apoyo de quienes me rodearon.
¡Gracias!

Tabla de contenido

Resumen	10
Abstract.....	11
Introducción.....	12
1. Objetivos.....	14
1.1. Objetivo general	14
1.2. Objetivos específicos	14
2. Área de estudio	15
3. Marco teórico.....	17
3.1. Erosión costera	17
3.1.1. Modelo estadístico para el cálculo de las tasas de avance/retroceso de la línea de costa.....	19
3.2. Inundación costera.....	19
3.3. Amenaza, vulnerabilidad y riesgo	20
3.4. Modelación numérica	23
4. Metodología.....	25
4.1. Identificación de la amenaza	26
4.1.1. Variables/criterios que influyen en la erosión e inundación costera	27
4.1.1.1. Evolución temporal de la línea de costa	27
4.1.1.2. Ascenso del Nivel del Mar (ANM)	28
4.1.1.3. Caracterización hidrodinámica de la zona costera	29
4.1.1.4. Geomorfología.....	35
4.1.1.5. Protección de la línea de costa.....	35
4.1.2. Cuantificación de la amenaza por erosión costera.....	35
4.1.3. Cuantificación de la amenaza por inundación costera.....	41
4.2. Análisis de la vulnerabilidad	42
4.2.1. Variables/criterios que influyen en la vulnerabilidad.....	42

4.2.2.	Cuantificación de la vulnerabilidad física y socioeconómica	44
4.2.3.	Cuantificación de la vulnerabilidad total.....	47
4.3.	Cuantificación del riesgo por erosión e inundación costera	47
5.	Resultados y discusiones	49
5.1.	Identificación de la amenaza	49
5.1.1.	Variables/criterios que influyen en la erosión e inundación costera	49
5.1.1.1.	Evolución temporal de la línea de costa	49
5.1.1.2.	Ascenso del Nivel del Mar (ANM)	55
5.1.1.3.	Caracterización hidrodinámica de la zona costera	58
5.1.1.4.	Geomorfología.....	66
5.1.1.5.	Protección de la línea de costa.....	67
5.1.2.	Cuantificación de la amenaza por erosión costera.....	68
5.1.3.	Cuantificación de la amenaza por inundación costera.....	69
5.2.	Análisis de la vulnerabilidad	71
5.2.1.	Recopilación, procesamiento y análisis de las variables/criterios que influyen en la vulnerabilidad	71
5.2.2.	Cuantificación de la vulnerabilidad física y socioeconómica	78
5.2.3.	Cuantificación de la vulnerabilidad total.....	80
5.3.	Cuantificación del riesgo por erosión e inundación costera	81
6.	Conclusiones.....	85
7.	Recomendaciones	87
	Referencias bibliográficas	88

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio. Fuente capa drenaje sencillo: IGAC (2014). Fuente capas geomorfología: INVEMAR (2017) y Alcaldía de Arboletes (2000).	15
Figura 2. Representación de los procesos de erosión/acreción del Caribe colombiano. Fuente: Pérez <i>et al.</i> (2022).	18
Figura 3. Esquema metodológico de la propuesta de investigación.	26
Figura 4. Cambio global del nivel medio del mar relativo al año 1900. Escenarios SSP1 a SSP5. Fuente: IPCC (2022).	29
Figura 5. Dominios de cálculo, topo-batimetría y datos utilizados para forzar y validar el modelo.	32
Figura 6. Flujograma para la modelación del oleaje en aguas profundas-intermedias.	33
Figura 7. Clasificación de los niveles de riesgo por erosión e inundación costera.	48
Figura 8. Áreas de erosión y acreción de Arboletes para el periodo de 2004 a 2020.	49
Figura 9. Áreas de erosión y acreción de Arboletes para el periodo de 2020 a 2022.	50
Figura 10. Áreas de erosión y acreción de Arboletes para el periodo de 2022 a 2023.	51
Figura 11. Áreas de erosión y acreción de Arboletes para el periodo de 2004 a 2023.	52
Figura 12. Localización de las líneas de costa en todos los periodos analizados.	53
Figura 13. Amenaza por el criterio de tasa de erosión.	55
Figura 14. Serie de tiempo y línea de tendencia del ANM local (Copernicus Marine Service).	56
Figura 15. Amenaza por el criterio de ANM.	57
Figura 16. Régimen medio del oleaje en el punto 5. A) rosa de oleaje. B) Tabla de estadísticos básicos. C) Probabilidad conjunta entre Hs y Tp. D) Función de Distribución Acumulada (CDF).	58
Figura 17. Régimen medio del oleaje en el punto 8. A) rosa de oleaje. B) Tabla de estadísticos básicos. C) Probabilidad conjunta entre Hs y Tp. D) Función de Distribución Acumulada (CDF).	59
Figura 18. Régimen extremo de la altura de la ola. A) Punto 5. B) Punto 8. C) Punto 9. D) Punto 10.	60

Figura 19. Validación de la modelación de oleaje. A) Comparación de la altura de la ola. B) Dispersión entre datos medidos vs. modelados de altura de ola. C) Comparación del periodo pico.	63
Figura 20. Altura de ola significativa resultante del modelo SWAN para cada uno de los cuatro casos.	64
Figura 21. Altura de ola significativa resultante del modelo SWASH para cada uno de los casos mencionados.	65
Figura 22. Amenaza por el criterio de altura de ola.	66
Figura 23. Amenaza por el criterio de geomorfología.....	67
Figura 24. Amenaza por el criterio de protección de la línea de costa.....	68
Figura 25. Amenaza por erosión costera en el sector Punta Rey - rio Hobo para los escenarios RM ANM local y PR100 SSP5-8.5 2100.....	69
Figura 26. Amenaza por inundación costera para los escenarios RM ANM local y PR100 SSP5-8.5 2100.....	70
Figura 27. Vulnerabilidad por el criterio de la pendiente del terreno.....	71
Figura 28. Vulnerabilidad por el criterio de la geomorfología.....	72
Figura 29. Vulnerabilidad por el criterio de la distancia desde la costa.....	73
Figura 30. Vulnerabilidad del criterio de densidad poblacional.....	74
Figura 31. Vulnerabilidad del criterio de edades.....	75
Figura 32. Vulnerabilidad del criterio de estratos socioeconómicos.....	76
Figura 33. Vulnerabilidad por el criterio de zonas con usos no residenciales.....	77
Figura 34. Vulnerabilidad por el criterio de número de viviendas.....	78
Figura 35. Vulnerabilidad física.....	79
Figura 36. Vulnerabilidad socioeconómica.....	80
Figura 37. Vulnerabilidad total.....	81
Figura 38. Riesgo por erosión costera para los escenarios RM ANM local y PR100 SSP5-8.5 2100.....	82
Figura 39. Riesgo por inundación costera para los escenarios RM ANM local y PR100 SSP5-8.5 2100.....	84

Índice de tablas

Tabla 1. Escala fundamental, tomada de Saaty (1990).....	22
Tabla 2. Descripción de la información utilizada para el análisis de la línea de costa.....	27
Tabla 3. Descripción de la información utilizada para la tendencia local del ANM.....	28
Tabla 4. Información procesada del oleaje en aguas profundas.	30
Tabla 5. Datos utilizados para integrar la topo-batimetría del sector rio Hobo – Punta Rey.	31
Tabla 6. Información procesada de viento.....	32
Tabla 7. Clasificación de los criterios de amenaza por erosión costera y su justificación. ..	36
Tabla 8. Matriz de comparación por pares de los criterios de amenaza por erosión costera.	39
Tabla 9. Matriz normalizada y pesos de los criterios de amenaza por erosión costera.	39
Tabla 10. Clasificación de los criterios de amenaza por inundación costera y su justificación.	42
Tabla 11. Información física y sociodemográfica utilizada para el cálculo de la vulnerabilidad.	43
Tabla 12. Clasificación de los criterios de vulnerabilidad física y socioeconómica y su justificación.	45
Tabla 13. Resumen de las tasas y áreas de erosión y acreción de los periodos analizados. En colores rojos erosión, en azules acreción	54
Tabla 14. Tendencia de ANM global.	57
Tabla 15. Casos de modelación de SWAN.....	62

Resumen

El entendimiento de los procesos hidrodinámicos marino-costeros es fundamental en la determinación del riesgo litoral. Las costas colombianas están expuestas a riesgos costeros que han generado deterioros ambientales, desplazamiento de comunidades y pérdidas económicas y ecológicas. Estos riesgos se han agudizado cada vez más en poblaciones como el municipio de Arboletes (Caribe colombiano), debido a la intensificación de los eventos extremos naturales y a efectos antrópicos como la construcción de obras costeras inadecuadas. En este sentido, este estudio busca evaluar las variables hidrodinámicas como una herramienta para la determinación del riesgo por erosión e inundación costera en el marco del cambio climático de manera específica en el sector Punta Rey a río Hobo. Con este fin, se calculó la amenaza por medio de la caracterización del cambio de la línea de costa, el clima marítimo del oleaje y la inundación, usando los modelos numéricos SWAN y SWASH. Esto permitió analizar variables como la energía del oleaje, el nivel del mar, la geomorfología, el nivel de protección costera, la tasa de erosión costera y el run-up horizontal máximo relacionado con la inundación. Se determinó la vulnerabilidad total a partir del análisis de criterios físicos y socioeconómicos. Finalmente, se integraron todos los resultados obtenidos para una evaluación del riesgo costero asociado a escenarios de cambio climático. Los resultados del escenario más extremo de cambio climático indican que el 21 % de la línea de costa presenta riesgo de muy alto-alto por erosión costera (riesgo dominante, proceso activo y progresivo), y el 5% del área evidencia riesgo alto-medio por inundación costera (riesgo localizado pero crítico al afectar zonas pobladas y turísticas). Los sectores con un mayor riesgo potencial de erosión e inundación costera son: río Hobo, Punta Rey, Minuto de Dios, las playas urbanas de Arboletes y zonas aledañas al Volcán de lodo. A través del uso de los modelos numéricos, que incluyen escenarios de cambio climático, es posible establecer zonas de riesgo que deben ser monitoreadas por los tomadores de decisiones.

Palabras clave: *Riesgo costero por erosión, Riesgo costero por inundación, Cambio climático, SWAN, SWASH, Caribe colombiano.*

Abstract

Understanding marine-coastal hydrodynamic processes is essential for determining coastal risk. The Colombian coasts are exposed to coastal hazards that have led to environmental degradation, displacement of communities, and both economic and ecological losses. These risks have intensified in communities such as the municipality of Arboletes (Colombian Caribbean), due to the increasing frequency of extreme natural events and anthropogenic factors such as the construction of inadequate coastal infrastructure. In this context, this study aims to evaluate hydrodynamic variables as a tool for assessing erosion and coastal flooding risk under climate change conditions, specifically in the area between Punta Rey and the Hobo River. To achieve this, hazard levels were calculated through the characterization of shoreline change, wave climate, and coastal flooding, using the numerical models SWAN and SWASH. This made it possible to analyze variables such as wave energy, sea level, coastal geomorphology, coastal protection level, coastal erosion rate, and maximum horizontal run-up associated with flooding. Overall vulnerability was determined based on the analysis of physical and socioeconomic criteria. Finally, all results were integrated to conduct a comprehensive assessment of coastal risk under climate change scenarios. Under the most extreme climate change scenario, results indicate that 21% of the coastline is at very high to high risk of coastal erosion (dominant risk, active and progressive process), and 5% of the area shows medium to high risk of coastal flooding (localized but critical risk due to its impact on populated and tourist areas). The areas with the highest potential risk from erosion and flooding include the Hobo River, Punta Rey, Minuto de Dios, the urban beaches of Arboletes, and zones surrounding the mud volcano. The use of numerical models that incorporate climate change scenarios makes it possible to identify risk-prone areas that should be monitored by decision-makers.

Keywords: *coastal erosion risk, coastal flooding risk, climate change, SWAN, SWASH, Colombian Caribbean.*

Introducción

La erosión e inundación costera son procesos con múltiples causas de origen natural o antrópico que impactan negativamente a las comunidades locales, los ecosistemas, la infraestructura costera (Coca-Domínguez y Ricaurte-Villota, 2019; INVEMAR, 2022), y las actividades turísticas (Daniel y Abkowitz, 2005). Estos efectos se han visto agravados por la ocupación inadecuada de la franja costera (González-Velandia, 2014) y por la intensificación de eventos extremos, como el aumento en la energía del oleaje y el Ascenso del Nivel del Mar (ANM), según Zamora-Bornachera *et al.* (2019) y el IPCC (2021a).

Según proyecciones y escenarios elaborados por entidades gubernamentales, hacia el año 2100, cerca de 60 municipios costeros del Caribe y Pacífico colombiano (~9 % de la zona costera) estarían en riesgo de inundación por el ANM, y aproximadamente el 1 % del área costera podría verse afectada por erosión. En cuanto a los ecosistemas de manglar, se estima que el 80 % del área estaría comprometida por el ANM (26 % en el Caribe y 74 % en el Pacífico), y un 5 % del área por erosión costera (31 % Caribe y 69 % Pacífico) (INVEMAR e IDEAM, 2017; INVEMAR, 2022).

En el litoral Caribe colombiano se han identificado 86 sitios con retroceso de la línea costera y 36 zonas con afectaciones a ecosistemas, entre ellas la franja costera del departamento de Antioquia, y en particular, el municipio de Arboletes (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016). Históricamente, este municipio ha registrado una de las tasas de erosión más altas en el golfo de Urabá, con valores entre 1.5 m/año y 4.1 m/año (Llorente, 2020; Gob.ANT, UdeA, UNAL, UNINORTE, 2021; López y Dussan, 2023), llegando a reportarse tasas máximas de 40 m/año y una pérdida de más de 4.5 km² en el sector de Puerto Rey (Correa y Vernet, 2004; Correa *et al.*, 2007). Esto ha provocado el desplazamiento de comunidades, la degradación de la base ecosistémica y la amenaza a sitios turísticos como el volcán de lodo (Rangel-Buitrago *et al.*, 2015; Stronkhorst *et al.*, 2018).

Actualmente, el municipio de Arboletes cuenta con 38 obras de protección costera construidas en su mayoría sin respaldo técnico, lo que ha incrementado el problema de

erosión (Grisales, 2021). Aunque existen estudios sobre la erosión en el municipio, estos se han concentrado en puntos críticos específicos como son: Punta Rey, río Hobo y volcán de lodo, evidenciando la necesidad de un análisis espacial que permita una comprensión integral de la hidrodinámica y su influencia en la morfodinámica.

Asimismo, se ha identificado que este municipio es vulnerable al ANM y a eventos climáticos extremos (Correa y Vernet, 2004; Londoño y Murillo, 2018). El único estudio de inundación en esta zona indica que, bajo escenarios de aumento del nivel del mar y temperaturas entre 1.5 °C y 2.0 °C, se podría afectar entre el 27 % y 38 % del litoral (Hurtado, 2019; Niño y Hurtado, 2019). Sin embargo, dicho estudio utiliza condiciones estáticas, por lo que se requiere análisis dinámicos con datos actualizados.

Es importante resaltar que el territorio costero (sector entre Punta Rey y río Hobo) presenta diferentes características a lo largo de su costa, incluyendo playas, acantilados, zonas con obras de protección antiguas y recientes, áreas medianamente intervenidas e incluso sectores naturales. Esta heterogeneidad morfológica, junto con la amplia disponibilidad de información de la zona, permitirá analizar la aplicabilidad de metodologías novedosas para la determinación del riesgo por erosión e inundación costera.

Comprender los procesos de erosión e inundación desde la perspectiva de la hidrodinámica requiere estudios a escala fina (local), debido a que cada sector mencionado responde de manera diferente a estos riesgos. En este sentido, los modelos numéricos costeros, que integran variables como el oleaje y la inundación, resultan herramientas fundamentales para analizar escenarios a corto, mediano y largo plazo. Así como la posibilidad de caracterizar el riesgo de manera espacial y temporal, para proponer estrategias de mitigación acordes con las dinámicas locales.

Teniendo en cuenta lo anterior, este trabajo busca dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación: **¿Cuál es el riesgo potencial por erosión e inundación costera en el sector Punta Rey - Arboletes - río Hobo ante condiciones medias y escenarios de cambio climático?**

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Determinar el riesgo por erosión e inundación costera en el marco del cambio climático, en el sector entre Punta Rey - río Hobo, departamentos de Antioquia y Córdoba a través de variables hidrodinámicas.

1.2. Objetivos específicos

- ✓ Determinar la amenaza causada por los fenómenos de erosión e inundación costera en el sector Punta Rey - río Hobo.
- ✓ Identificar la vulnerabilidad asociada a los fenómenos de erosión e inundación costera en el sector Punta Rey - río Hobo.
- ✓ Establecer el riesgo ante los fenómenos de erosión e inundación costera bajo condiciones medias de la zona de interés.
- ✓ Analizar el riesgo costero en la zona de estudio considerando los escenarios del IPCC relacionados con trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP, por sus siglas en inglés).

2. Área de estudio

La franja costera de estudio se localiza en el suroeste del mar Caribe colombiano, abarcando territorio de dos departamentos: desde Punta Rey en el municipio de Los Córdoba (Córdoba) hasta la desembocadura del río Hobo en el municipio de Arboletes (Antioquia). Se analizó un área de 7.19 km² (3.61 km de línea de costa) en el municipio de Los Córdoba, y de 9.77 km² (8.56 km de línea de costa) en Arboletes (Figura 1).

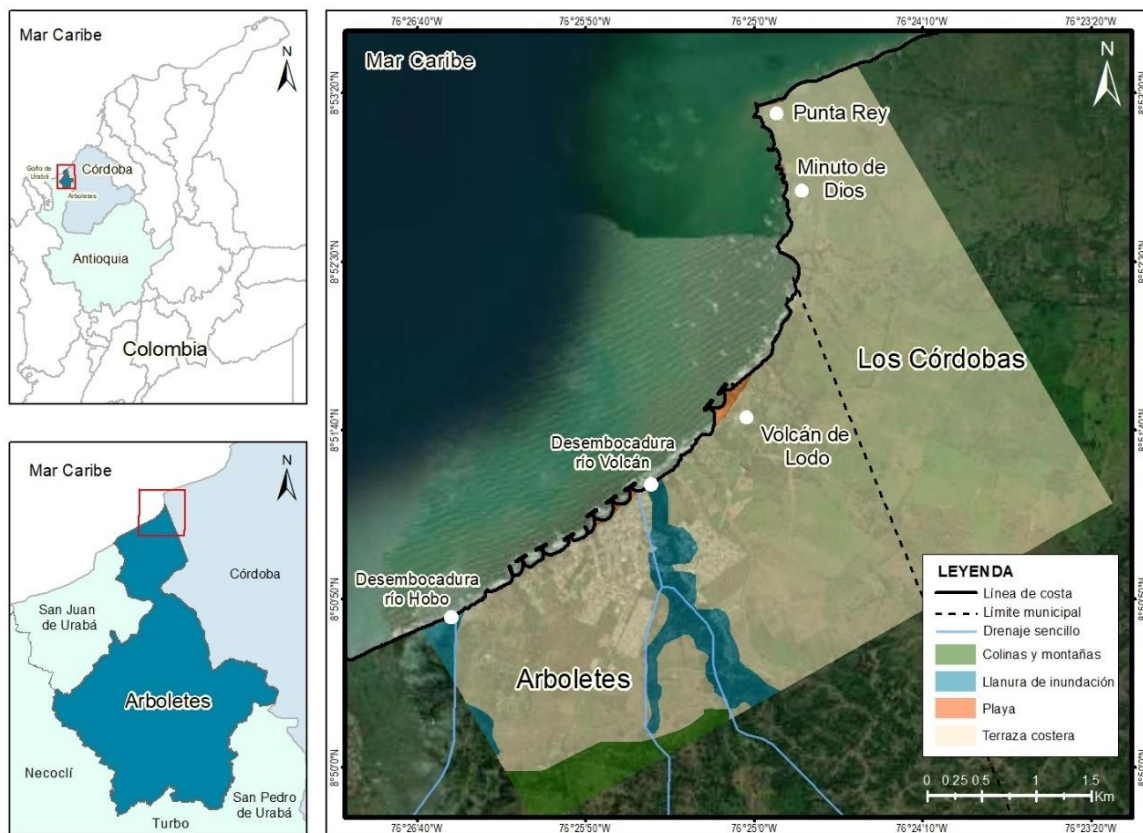


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio. Fuente capa drenaje sencillo: IGAC (2014). Fuente capas geomorfología: INVEMAR (2017) y Alcaldía de Arboletes (2000).

El municipio de Arboletes tiene una extensión de 712 km² y una línea de costa aproximada de 12 km. Se caracteriza geológicamente por tener terrazas marinas emergidas, diapiros o volcanes de lodo activos y algunas playas con valles aluviales (Correa y Paniagua-Arroyave, 2016). En este municipio la erosión ha provocado la socavación y pérdida de la terraza marina, por lo cual se ha intervenido el litoral con numerosas obras de protección costera,

algunas de las cuales ha permitido la conformación de playas artificiales (Verdeza *et al.*, 1999).

La batimetría de la zona muestra una profundidad máxima de aproximadamente 5 m a una distancia de hasta 1 km desde la línea de costa, lo que indica la presencia de pendientes suaves. En el sector cercano al río Hobo se encuentra una playa corta con una pendiente del 3 %, mientras que al noreste de su desembocadura se localiza un acantilado con una pendiente superior al 55 %. En el área del volcán de lodo predominan playas con pendientes menores al 3 %, y tanto al norte como al sur de este punto se desarrollan acantilados con pendientes de hasta el 25 % (Gob.ANT *et al.*, 2021).

Según investigaciones realizadas en la zona, el régimen de oleaje está principalmente influenciado por los vientos alisios del norte y noroeste durante la temporada seca (diciembre–abril), y por vientos del sur en la temporada húmeda (mayo–noviembre). La altura significativa del oleaje varía entre 0.6 y 1.6 m, con un período asociado al pico espectral entre 3 y 7 segundos, y una dirección predominante del noroeste y nor-noroeste (Correa y Vernet, 2004; Orejuela, 2020; Gob.ANT *et al.*, 2021).

En cuanto al nivel del mar, la marea es de tipo mixta, principalmente semidiurna, con una amplitud máxima cercana a los ± 40 cm (micromareal). Sus principales constituyentes armónicos son K1 y M2 (Quintana *et al.*, 2021). Además, la tasa de ascenso del nivel medio del mar (ANM), calculado para el período comprendido entre 1994 y 2015, se estima en aproximadamente 4.2 mm/año (Londoño y Murillo, 2018).

Por último, se ha identificado que las corrientes superficiales en Arboletes se desplazan principalmente hacia el noreste, con una ocurrencia del 57 % durante todo el año y una magnitud media de 0.2 m/s en superficie. Por otro lado, la corriente litoral tiene direcciones que dependen de la época climática del año (húmeda y seca), con direcciones hasta el oeste y este, respectivamente (Gob.ANT *et al.*, 2021).

3. Marco teórico

3.1. Erosión costera

La erosión costera es el retroceso de la franja litoral debido a la pérdida de sedimentos e influenciada por factores naturales (viento, oleaje, corrientes litorales, marea, entre otros) y actividades antrópicas (asentamientos humanos, construcción inadecuada de obras de protección costera, tala de mangle, extracción de arena) (Gob.ANT *et al.*, 2021). Este proceso puede ser evaluado mediante mediciones *in situ*, imágenes satelitales o incluso modelación numérica (Khodkar, 2019).

La pérdida de terreno puede ser cuantificada a través del cálculo de la tasa de erosión, la cual se define como la velocidad a la que se desplaza la línea de costa -ya sea hacia el mar o hacia el continente- y suele expresarse en metros por año (m/año) (Thieler *et al.*, 2009). En el Caribe colombiano, diversos estudios sobre erosión han empleado imágenes satelitales para identificar las zonas más vulnerables a este fenómeno (Rangel-Buitrago *et al.*, 2018; Rojas-Vargas, 2021; Vélez-Castaño *et al.*, 2021; Pérez *et al.*, 2022). Específicamente, Rangel-Buitrago *et al.* (2015) propusieron una clasificación del nivel de erosión en función de las tasas de avance/retroceso de la línea de costa. Es de notar, que el litoral del sector Punta Rey – río Hobo, se encuentra dentro de la categoría de erosión alta.

El valor de esta tasa está relacionado con el área analizada, y depende del período de estudio y la calidad de la información disponible. Pérez *et al.* (2022) realizaron una revisión sobre la erosión en el Caribe colombiano entre 2001 y 2021, concluyendo que el 49% del litoral -incluida la playa de Arboletes- presenta tasas elevadas de erosión (Figura 2). En este sentido, estudios como los de Correa y Vernet (2004) y Rangel-Buitrago *et al.* (2015) reportaron tasas de entre 3.0 y 3.4 m/año en el noreste del golfo de Urabá. Más recientemente, Gob.ANT *et al.* (2021) identificaron retrocesos de 3.5 m/año en la zona del río Hobo y de 1.5 m/año en el volcán de Lodo. Mientras que López y Dussan (2023) reportaron una tasa de 4.1 m/año a partir de un análisis multitemporal con imágenes de 2001, 2010 y 2022.

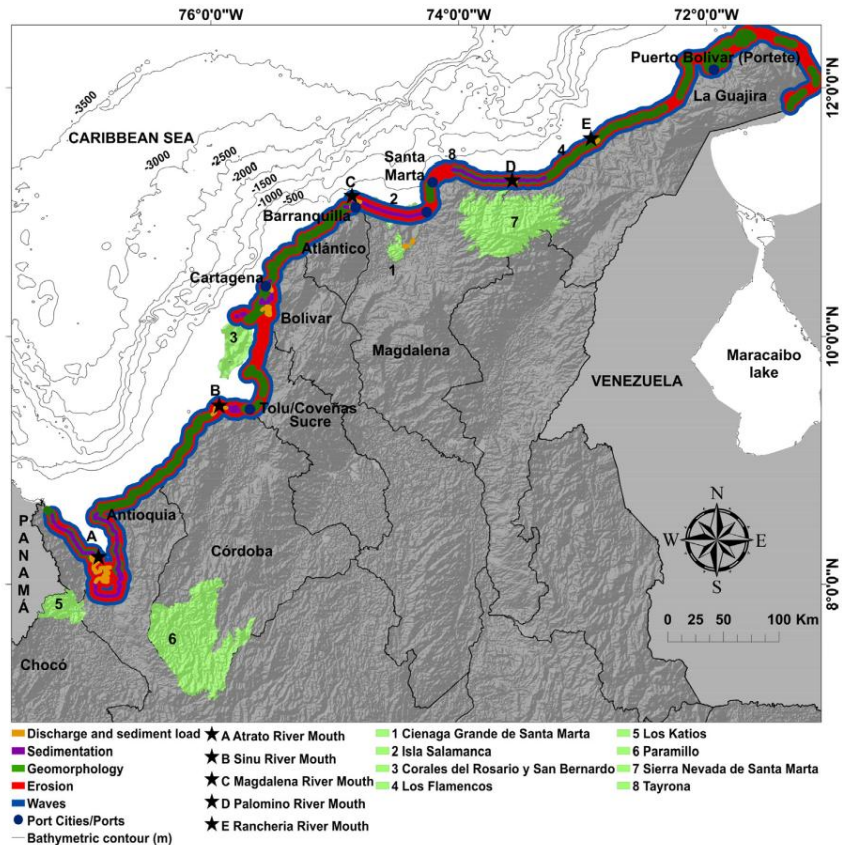


Figura 2. Representación de los procesos de erosión/acreción del Caribe colombiano. Fuente: Pérez *et al.* (2022).

Adicionalmente, se han proyectado escenarios futuros de erosión para el año 2059 utilizando modelos como Sunamura (Sunamura, 1992) y SCAPE (Walkden y Hall, 2005). Con estos modelos se han estimado retrocesos de entre 64 m y 198 m, de acuerdo con diferentes tasas de ascenso del nivel del mar (2.3 mm/año y 22 mm/año, respectivamente) (Paniagua, 2013).

En términos generales, los estudios coinciden en que la erosión en la zona de estudio responde a una combinación de factores geológicos y geotécnicos (diapirismo de lodo y las propiedades desfavorables del sustrato), intervenciones antrópicas (extracción de arena y la construcción de obras inadecuadas), y procesos naturales como el ascenso del nivel del mar y el incremento de la energía del oleaje (Correa y Vernet, 2004; Correa *et al.*, 2007; Correa y Paniagua, 2016; Gob.ANT *et al.*, 2021).

3.1.1. Modelo estadístico para el cálculo de las tasas de avance/retroceso de la línea de costa

El Digital Shoreline Analysis System (DSAS) es una aplicación desarrollada por el United States Geological Survey (USGS) que opera como una extensión del software ArcGIS. Su función principal es cuantificar las tasas de cambio temporal de la línea de costa representadas como datos vectoriales (Himmelstoss *et al.*, 2018).

La base matemática de DSAS se centra en modelos geométricos y estadísticos que miden el cambio de la posición de la línea de costa (en un sistema de coordenadas planas, como UTM) a lo largo del tiempo. El método requiere trazar una línea base (paralela a las líneas de costa) y transectos (líneas perpendiculares a la tendencia general de la costa), donde los puntos de intersección entre cada línea de costa con cada transecto se traducen en distancia (Anexo I). DSAS cuenta con diferentes métodos estadísticos, uno de los más utilizados es la tasa de punto final o End Point Rate (EPR), su fundamento es la regresión lineal entre dos puntos y utiliza la Ecuación 1.

$$EPR = \frac{\text{Intersección final} - \text{Intersección inicial}}{\text{Tiempo final} - \text{Tiempo inicial}} = \frac{\text{distancia entre líneas de costa}}{\text{periodo entre líneas de costa}} \quad (1)$$

3.2. Inundación costera

La inundación costera es otro fenómeno que afecta las zonas litorales, se define como la máxima elevación que alcanza el nivel del mar en un sitio. Su análisis suele implicar el cálculo de la cota máxima de inundación (CI), determinada por la suma del nivel medio del mar (NMM), la marea astronómica (MA), el residual de marea (RM) y el run-up del oleaje (Ru), según la Ecuación 2 (Vásquez *et al.*, 2018a).

$$CI = NMM + MA + RM + Ru = NM + Ru \quad (2)$$

En ausencia de datos mareográficos locales confiables, se han utilizado registros satelitales para estimar el NMM (Londoño y Murillo, 2018). Para calcular el Ru, se han usado tanto

formulaciones empíricas (Clarindo, 2014; Navarro, 2018) como modelación numérica, ante la escasez de datos *in situ* de largo plazo (Orejarena, 2013; Vásquez *et al.*, 2018a, 2018b).

En el caso de Arboletes, la información disponible sobre cota de inundación es escasa. El único estudio identificado utilizó modelos cualitativos y cuantitativos con condiciones estáticas, superponiendo imágenes satelitales de la herramienta Surging Seas y Google Earth Pro con planimetría del DANE (Hurtado, 2019).

3.3. Amenaza, vulnerabilidad y riesgo

Este trabajo adopta como marco de referencia las definiciones de amenaza, vulnerabilidad y riesgo propuestas por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) en su Sexto Informe de Evaluación (AR6; IPCC, 2021a) y por la Ley para la Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia (Ley 1523 de 2012). Para contextualizar la investigación en el ámbito local, se parte de las definiciones consolidadas en el Artículo 4 de la Ley 1523 de 2012, según esta norma:

- La **amenaza** se define como el “peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales”.
- La **vulnerabilidad** es la “susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y/o animales y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos”.

- El **riesgo**, “corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad.” (Ley 1523 de 2012, Art. 4).

Es de notar que numerosos estudios han abordado estos componentes mediante índices y mapas, y por lo tanto sus aproximaciones tienden a ser estáticas. Sin embargo, dada la naturaleza dinámica de los sistemas litorales, se requieren herramientas como la modelación numérica, que permitan representar su comportamiento temporal.

Para determinar la amenaza, vulnerabilidad y riesgo, se utiliza comúnmente la metodología propuesta por Hammar-Klose y Thieler (2001), la cual permite evaluar la influencia de un conjunto de variables geomorfológicas, hidrodinámicas y socioeconómicas. Esta metodología asigna ponderaciones a los subcriterios de estas variables en una escala de 1 a 5, donde 1 representa un nivel muy bajo y 5 un nivel muy alto de amenaza, vulnerabilidad o riesgo.

Ahora bien, para determinar la importancia relativa de cada variable dentro de la cuantificación de la amenaza, vulnerabilidad o riesgo, se han aplicado metodologías como el Analytic Hierarchy Process (AHP). Esta aproximación tiene un enfoque multicriterio, ampliamente utilizada por su capacidad para jerarquizar variables según su importancia relativa, integrando la calificación de personas expertas y el álgebra matricial (Saaty, 1990; Nantes, 2019). Esta metodología emplea comparaciones por pares de variables utilizando una escala de valores (Tabla 1), lo que permite integrar eficazmente múltiples factores en la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y/o riesgo.

Tabla 1. Escala fundamental, tomada de Saaty (1990).

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Las actividades contribuyen de igual forma al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a una actividad sobre la otra
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Una actividad es fuertemente favorecida y su dominio se demuestra en la práctica
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre otra es del más alto nivel posible de afirmación
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes
Recíprocos	Si una actividad i tiene uno de los valores anteriores cuando se compara con la actividad j , entonces j tiene el valor recíproco cuando se compara con i $a(ij)=1/a(ji)$	

A nivel nacional, el análisis de vulnerabilidad física, social y ambiental ha sido comúnmente abordado mediante análisis espaciales e índices que clasifican variables como la densidad poblacional y el número de viviendas, así como los elementos expuestos (Salas, 2021). Adicionalmente, se ha usado la metodología del Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC), que integra los criterios técnicos y ambientales más influyentes, como la geomorfología, la tasa de erosión, la pendiente del perfil de playa, el rango mareal, la energía del oleaje y el nivel del mar (Hinestroza, 2020; García-Echeverría, 2021; Escorcía, 2023). En Arboletes, se usó el IVC en el área del volcán de Lodo y el río Hobo, concluyendo que ambas zonas presentan una vulnerabilidad alta (García-Echeverría, 2021); y se implementó un modelo de evaluación cualitativa y cuantitativa para estimar la vulnerabilidad frente al NMM (Hurtado, 2019)

En cuanto a la evaluación del riesgo por erosión, INVEMAR (2003, 2022) ha propuesto una metodología que incluye tres componentes para la amenaza (magnitud, ocurrencia y susceptibilidad), y tres para la vulnerabilidad (exposición, fragilidad y resiliencia). Esta metodología ha sido aplicada en diversos sitios críticos del Caribe y Pacífico colombiano.

Por su parte, la Universidad de Antioquia, la Gobernación de Antioquia, el DAGRAN, la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad del Norte, desarrollaron el proyecto “*Investigación para reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia*” y

posteriormente el DAGRAN y la UdeA llevaron a cabo el “*Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño*” (PIMECLA). A través de este programa se ha evidenciado un alto riesgo a la erosión en puntos críticos del área de interés y se han realizado experimentos *in situ* que han permitido avanzar en el conocimiento para la mitigación de la erosión costera por medio de soluciones verdes (Gob.ANT *et al.*, 2021).

Respecto al riesgo por inundación, en el litoral Caribe colombiano, los estudios realizados se enfocan en determinar la amenaza y han sido realizados desde el ámbito académico e institucional por entidades como DIMAR, INVEMAR, INGEOMINAS, Universidad de Antioquia, Universidad Nacional, Universidad EAFIT y Universidad del Norte. Sin embargo, son pocos los trabajos de investigación que consideran el enfoque de vulnerabilidad socioeconómica como un factor clave en la gestión del riesgo por inundación (Villegas, 2020; Rhenals-Arteaga, 2023).

3.4. Modelación numérica

La modelación numérica es una herramienta que utiliza ecuaciones matemáticas y métodos computacionales para simular y predecir el comportamiento de las olas, las corrientes, la inundación, el transporte de sedimentos, entre otros. En este sentido, uno de los modelos más utilizados es SWAN (Simulating WAVes Nearshore), un modelo espectral de tercera generación diseñado específicamente para predecir la propagación y transformación de las olas en aguas profundas, intermedias y poco profundas, teniendo en cuenta procesos como el viento, la refracción, la fricción del fondo, disipación y la ruptura de las olas (SWAN team, 2021). Siendo un modelo de gran escala al tener un área de aplicación del orden de cientos de kilómetros (Reyes *et al.*, 2021).

Este modelo se basa en la ecuación de balance de acción (Ecuación 3) que describe cómo la energía de las olas se conserva y se transforma a medida que se propaga, representando que el cambio en la densidad de acción (N) en un punto específico y para una frecuencia y

dirección dadas es igual a la suma de todos los procesos físicos que la afectan (S) (Reyes *et al.*, 2021).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (3)$$

Donde, N es la densidad de acción, t es el tiempo, c es la velocidad de propagación de la onda en el espacio geográfico (x, y), espectral (σ) y direccional (θ). El término S , representa la suma de los procesos físicos de generación, disipación y redistribución de energía. Los términos N y S , se definen en las Ecuaciones 4 y 5, respectivamente.

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (4)$$

$$S = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (5)$$

Donde, $E(\sigma, \theta)$ es el espectro de varianza que distribuye la energía de las olas sobre las frecuencias, S_{in} es la generación de olas por viento, S_{nl3} y S_{nl4} representa la transferencia no lineal de energía, y S_{ds} refleja la disipación de la energía por whitecapping ($S_{ds,w}$), fricción del fondo ($S_{ds,b}$) y rotura ($S_{ds,br}$).

Por otro lado, **SWASH** (Simulating WAVes till Shore) es un modelo numérico no hidrostático que resuelve las ecuaciones no lineales de aguas someras. Diseñado para pequeñas escalas, simula con alta resolución la propagación, transformación no lineal y ruptura de olas en la costa, capturando con precisión la dinámica en la zona de rompientes y swash (Zijlema *et al.*, 2011; SWASH team, 2020). Por ello, es una herramienta fundamental para caracterizar el run-up máximo y evaluar amenazas de erosión e inundación costera (da Silva *et al.*, 2020). De acuerdo con Zijlema *et al.* (2011), las formulaciones que gobiernan este modelo son las ecuaciones incompresibles de Navier Stokes que comprenden la conservación de la masa (Ecuación 6) y el momento (Ecuaciones 7 y 8).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{xy}}{\partial y} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h\tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{yy}}{\partial y} \right) \quad (8)$$

Donde, t es el tiempo, $\zeta(t, x, y)$ representa la elevación de la superficie respecto al nivel del agua en reposo, $d(x, y)$ es la profundidad del agua, h es la profundidad total del agua, es decir la suma de ζ y d . Los términos de $u(x, y, t)$ y $v(x, y, t)$ son las velocidades horizontal y vertical promediadas en profundidad, $q(x, y, z, t)$ es la presión no hidrostática, g es la gravedad, c_f es la fricción del fondo, y τ es el esfuerzo horizontal turbulento.

4. Metodología

La Figura 3 presenta un resumen del proceso metodológico que se llevó a cabo en esta investigación para la determinación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo por erosión e inundación costera, considerando escenarios de cambio climático. Cada uno de estos aspectos se explicarán de manera detallada en adelante.

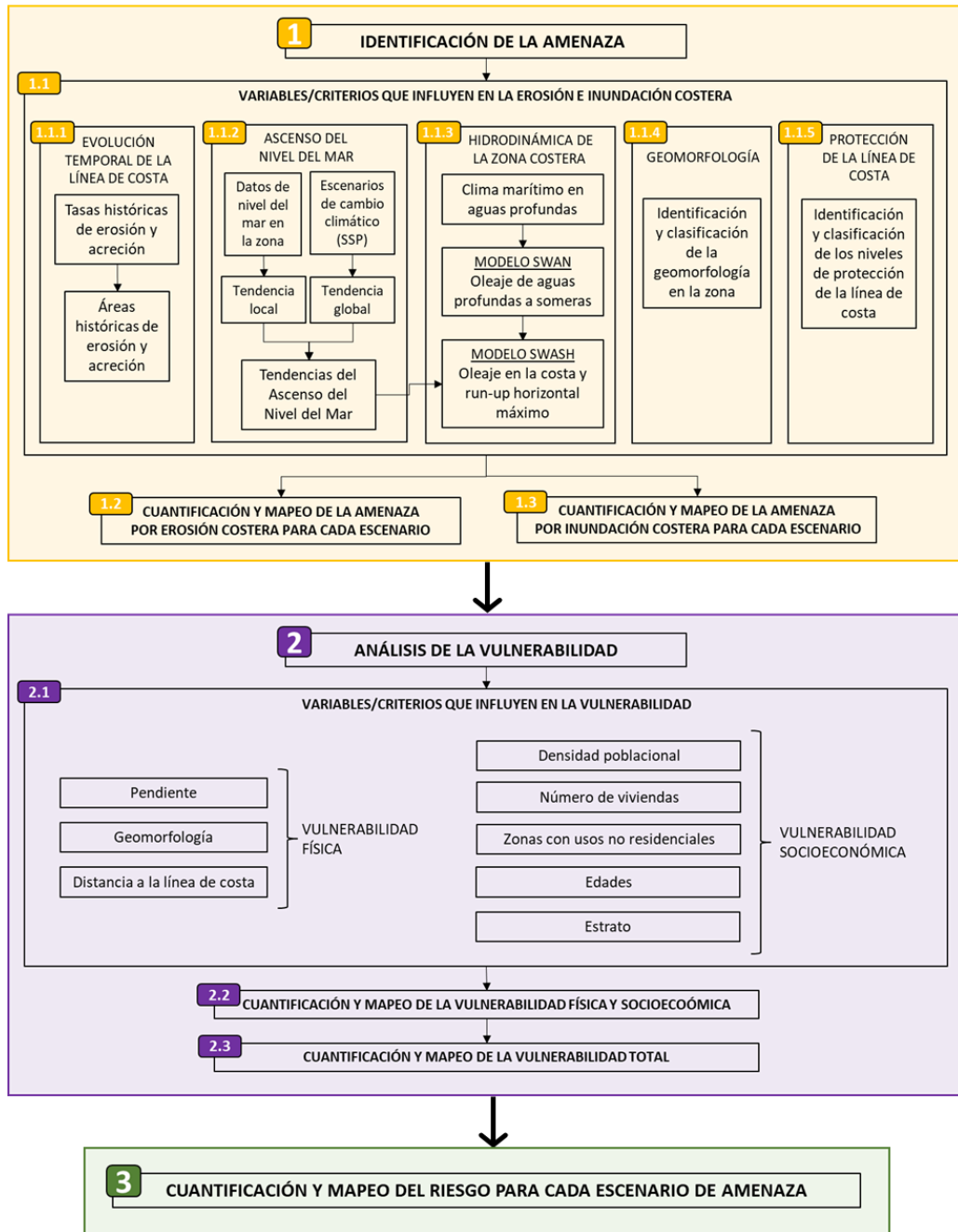


Figura 3. Esquema metodológico de la propuesta de investigación.

4.1. Identificación de la amenaza

La amenaza se caracterizó en términos de su tipo y magnitud, considerando escenarios de cambio climático (Unión Europea, 2014). Con este fin se analizaron las variables relacionadas con la erosión e inundación costera, como: tasa de erosión/acreción de la línea

de costa, altura de la ola, geomorfología, nivel de protección de la línea de costa y aumento del nivel del mar.

4.1.1. Variables/criterios que influyen en la erosión e inundación costera

4.1.1.1. Evolución temporal de la línea de costa

Se analizó la variación temporal de la línea de costa en el periodo de 2004 – 2023 mediante el uso de imágenes satelitales, aerofotografías y orto-mosaicos. El detalle de la información utilizada se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción de la información utilizada para el análisis de la línea de costa.

Línea de costa #	Fecha de la imagen	Tipo de imagen	Fuente de la imagen
1	2004	Orto mosaico	IGAC
2	2020	Imagen satelital	Google Earth Pro
3	2022	Aereofotografía	IGAC
4	2023	Imagen satelital	Google Earth Pro

El procesamiento y análisis de la información se llevó a cabo mediante la herramienta DSAS versión 5.1 de ArcGis (Himmelstoss *et al.*, 2018). La información de entrada de DSAS son dos líneas de costa (antigua y reciente), con las cuales se determina el cambio en un período de tiempo específico. Para su digitalización, se consideró como criterio principal la interfaz tierra-agua en la zona de playas, y en lugares con la presencia de acantilados, la parte baja del talud.

Las tasas de acreción y erosión expresadas en metros por año (m/año) se determinaron mediante el método End Point Rate (EPR), el cuál calcula la tasa de cambio de regresión lineal para el periodo de tiempo analizado. Para ello, DSAS genera transectos perpendiculares a la costa y determina la relación entre la distancia neta de las líneas de costa (antigua y reciente) y la diferencia de años analizados (por ejemplo, 2024-2016=8 años).

Una vez analizadas las tasas de avance y retroceso, en ArcGIS se calcularon las áreas de erosión y acreción a partir de los polígonos generados por la intersección de las dos líneas de costa. Este análisis se llevó a cabo para los períodos 2004-2020, 2020-2022, 2022-2023 y 2004-2023, y los resultados se emplearon como insumo para la valoración de la amenaza por erosión costera.

4.1.1.2. Ascenso del Nivel del Mar (ANM)

4.1.1.2.1. Tendencia local del ANM

Para la caracterización del ANM en el sector de interés, se realizó el análisis y procesamiento de la información medida en la zona. Se contó con datos de nivel del mar medidos con un sensor de presión en el marco del proyecto PIMECLA en el sector de Arboletes, entre agosto a noviembre del año 2021. Así como datos medidos por el mareógrafo de DIMAR en el corregimiento de Sapzurro a 104 km lineales de la zona de interés, para el periodo de 2015-2022 (DIMAR, 2023).

Se realizaron comparaciones de las series de tiempo y se calcularon las principales constituyentes de la marea para ambas series de tiempo utilizando la herramienta U_TIDE de Matlab. Sin embargo, debido a que solo se contaba con un periodo corto de información disponible, se recopiló y procesó información satelital ya que requería un análisis a largo plazo (> 30 años). Los detalles de la información utilizada se presentan en la Tabla 3 y la coordenada del sitio analizado se observa en la Figura 5. Finalmente, se obtuvo la tendencia de los datos y se calculó la pendiente que corresponde al ANM/año.

Tabla 3. Descripción de la información utilizada para la tendencia local del ANM.

Base de datos/ Producto	Coordenadas de los sitios	Período	Resolución temporal y espacial	Fuente
Copernicus Marine Service/ Global Ocean Physics Analysis and Forecast	-76.4167° W y 8.9167° N	01/01/1993 – 23/07/2024	Datos diarios, distribuidos espacialmente 0.083° × 0.083° (9.2 km)	https://doi.org/10.48670/moi-00016

4.1.1.2. Tendencia global del ANM

Para el análisis del ANM global se utilizaron los escenarios propuestos en el Sexto Informe (AR6) del IPCC (IPCC, 2022). Estos escenarios consideran el efecto de Gases de Efecto Invernadero (GEI), contaminantes atmosféricos y factores socioeconómicos que afectan directamente las emisiones de GEI. Además, tienen en cuenta la capacidad de adaptación al cambio climático, tales como la desigualdad, el aumento de la población, la economía, la tecnología, entre otros (Escoto-Castillo *et al.*, 2017).

El AR6 presenta cinco escenarios para el ANM en el año 2100, el primero de ellos muy bajo de emisiones de GEI (SSP1-1.9) con valores entre 0.28 m y 0.55 m. El escenario bajo (SSP1-2.6) con valores entre 0.32 m y 0.62 m. El escenario intermedio (SSP2-4.5) con valores entre 0.44 m y 0.76 m. El escenario alto (SSP3-7.0) con valores entre 0.55 m y 0.90 m. Y finalmente, el escenario muy alto (SSP5-8.5) con un aumento entre 0.63 m y 1.01 m. En este trabajo de investigación se usaron los valores del ANM de los escenarios SSP1-1.9 y SSP5-8.5 para los años 2030, 2050 y 2100 (Figura 4).

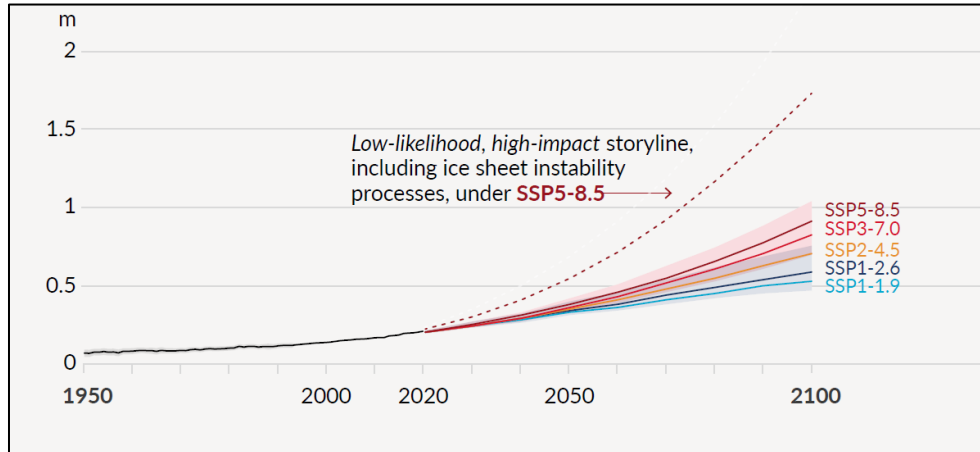


Figura 4. Cambio global del nivel medio del mar relativo al año 1900. Escenarios SSP1 a SSP5. Fuente: IPCC (2022).

4.1.1.3. Caracterización hidrodinámica de la zona costera

Para caracterizar la hidrodinámica costera se usó información de bases de datos de acceso libre y dos modelos numéricos, para caracterizar la energía del oleaje desde aguas profundas a someras y el run-up horizontal máximo asociado a la inundación. La información permitió

definir las características del oleaje en aguas profundas y trasladar el oleaje a aguas someras utilizando la técnica de downscaling (Antolínez *et al.*, 2018). Esta se basa en determinar los valores de altura del oleaje cerca de la línea de costa por medio de condiciones hidrodinámicas regionales.

4.1.1.3.1. Determinación del clima marítimo del oleaje en aguas profundas

Con el objetivo de determinar el clima marítimo en aguas profundas, se analizó el comportamiento estadístico a largo plazo de cuatro series de tiempo de parámetros integrales del oleaje (altura significativa, período asociado al pico espectral y dirección promedio) provenientes de la base de reanálisis de Copernicus Marine Service. La Tabla 4 presenta en detalle la información procesada, y la Figura 5 muestra la ubicación de los sitios donde fueron analizadas las series (P5, P8, P9 y P10).

Tabla 4. Información procesada del oleaje en aguas profundas.

Base de datos / Producto	Variabes	Periodo disponible	Resolución espacial	Resolución temporal	Fuente
Copernicus Marine Service / Global Ocean Waves Reanalysis	Altura significativa del oleaje, periodo pico, dirección media de la ola	01/01/1993 - 30/04/2023	0.2° × 0.2° (~22.2 km)	Horaria	https://doi.org/10.48670/moi-00022

A partir de estos datos, se analizaron los parámetros integrales del oleaje tanto para el régimen medio (condiciones más probables) como para condiciones extremas. Para determinar el oleaje con mayor probabilidad en Arboletes, se realizaron rosas oleaje, diagramas de probabilidad conjunta y se calcularon los estadísticos básicos. Para determinar el oleaje extremo, se estudiaron los periodos de retorno de la altura de ola empleando los valores máximos mensuales, mediante el método de Distribución Generalizada de Valores Extremos (GEV, por sus siglas en inglés). Los resultados de la caracterización del clima marítimo del oleaje se emplearon para definir las condiciones de frontera del modelo numérico SWAN y los casos de simulación desde aguas profundas a someras.

4.1.1.3.2. Modelación del oleaje en aguas profundas

Para propagar el oleaje hasta aguas someras, se empleó el modelo numérico Simulating WAVes Nearshore - SWAN (SWAN team, 2021), debido a que reproduce adecuadamente los procesos de refracción, asomeramiento y disipación (Reyes *et al.*, 2021).

Para implementar este modelo se usó información topo-batimétrica de la zona de estudio, la cual integra batimetría, topografía, línea de costa y perfiles de playa. El datum vertical de las diferentes fuentes de información de topografía y batimetría es Mean Sea Level (MSL). La Tabla 5 contiene las características principales de la información utilizada.

Tabla 5. Datos utilizados para integrar la topo-batimetría del sector río Hobo – Punta Rey.

Variable	Año	Zona de influencia	Fuente
Batimetría	2021	Zona costera de toda el área de interés	PIMECLA
Perfiles de playa y Topografía		Río Hobo y Volcán de Lodo	PIMECLA
Batimetría		Toda el área de estudio	Servicio Hidrográfico Nacional de DIMAR (SHN)
Línea de costa	2023	Toda el área de estudio	Imagen Satelital de Google Earth
Topografía	2022	Zona urbana de Arboletes	IGAC
Topografía	2012	Toda el área de estudio	Satélite Alos proyecto Palsar

Se estableció una malla computacional regular para el modelo SWAN con una resolución espacial de 200 m y un total de 220 celdas en x y 254 celdas en y . El dominio de la malla y la interpolación de la batimetría se presentan en la Figura 5.

Se llevaron a cabo los procesos de calibración y validación del modelo con el fin de verificar que los datos simulados representan el comportamiento adecuado del oleaje. El periodo de calibración y validación fue octubre del 2021, utilizando como condición de frontera los datos de las series de oleaje P1, P2, P3 y P4 (Tabla 4) y la variación espacio temporal del viento (datos descritos en la Tabla 6). Además, se analizaron los datos medidos de altura y

periodo del oleaje, determinando estadísticos como el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de correlación (R^2) y el sesgo (bias).

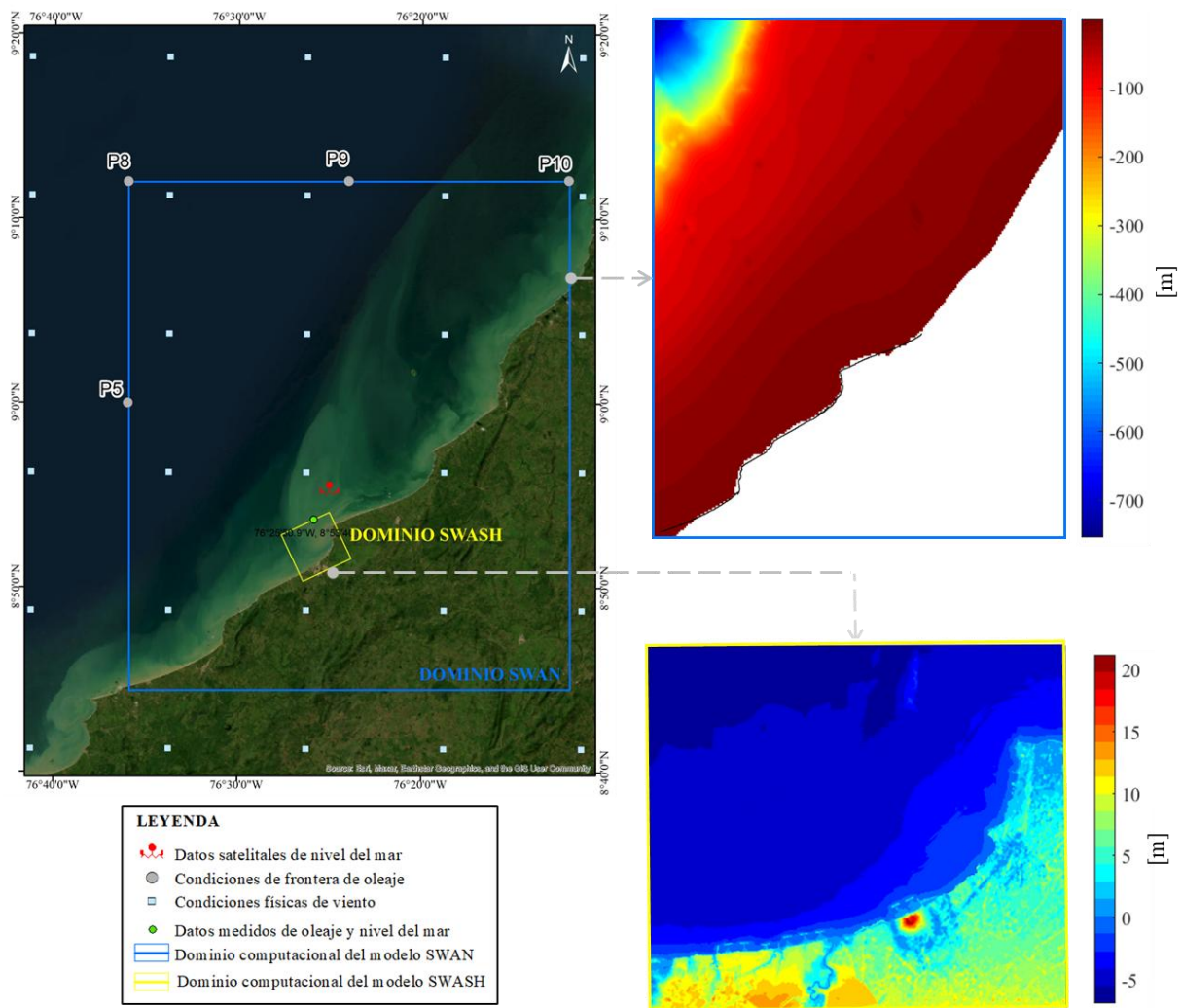


Figura 5. Dominios de cálculo, topo-batimetría y datos utilizados para forzar y validar el modelo.

Tabla 6. Información procesada de viento.

Base de datos / Producto	VARIABLES	Periodo disponible	Resolución espacial	Resolución temporal	Fuente
Copernicus Marine Service / Global Ocean - Wind and Stress - Hourly - Reprocessed - From Scatterometer and Model	Componente zonal y meridional del viento a 10 m de altitud	2007 – 2024	0.125° × 0.125° (~13.86 km)	Horaria	https://doi.org/10.48670/moi-00185

Finalmente, se propusieron casos donde el modelo fue forzado con información de los estados de mar del régimen medio y extremal del oleaje resultantes del análisis climatológico realizado. Y se usaron valores de magnitud/dirección del viento de la base de datos de Copernicus (Tabla 6). El proceso para la modelación numérica se muestra en la Figura 6.

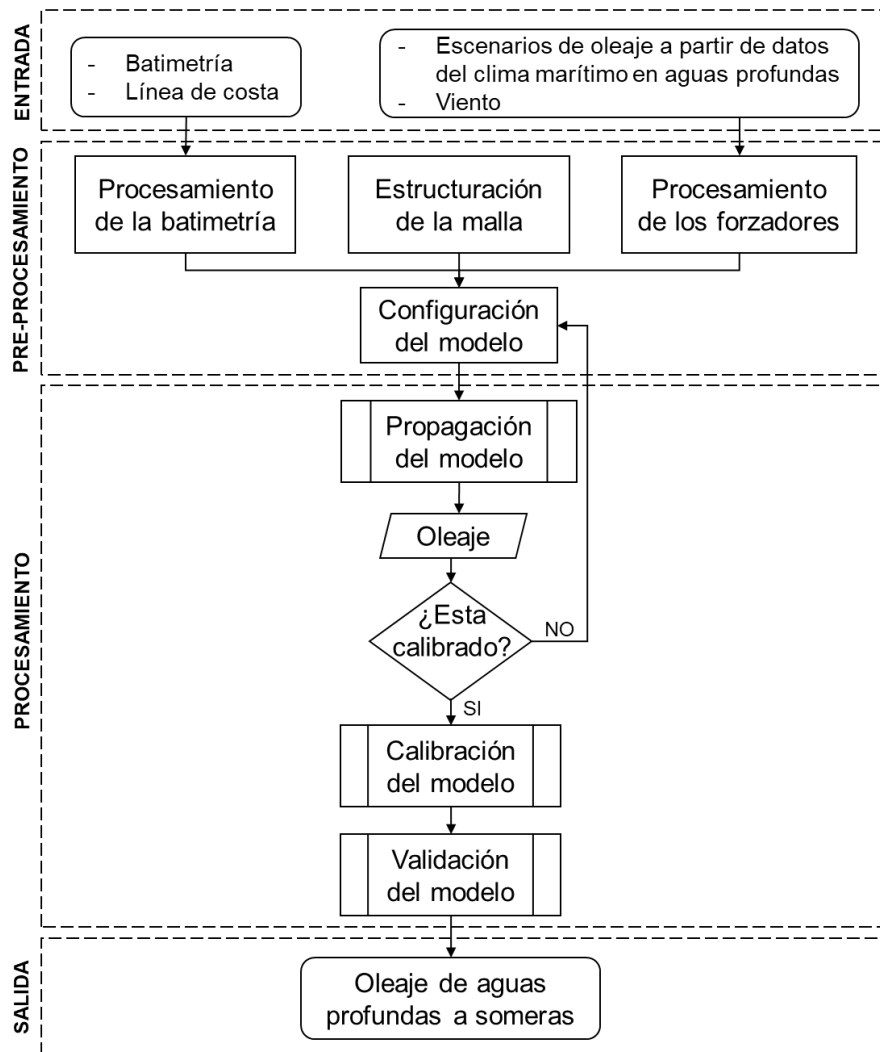


Figura 6. Flujograma para la modelación del oleaje en aguas profundas-intermedias.

4.1.1.3.3. Determinación del oleaje y el run-up en la línea de costa

En esta etapa se implementó el modelo numérico SWASH debido a que proporciona información adecuada en la zona de rompiente y en la zona swash, calculando variables como la altura de ola significativa y el run-up horizontal máximo, que corresponde a la cota de inundación (Zijlema *et al.*, 2011; da Silva *et al.*, 2020).

En la Figura 5 se presenta el resultado de la interpolación topo-batimetría y la malla de cálculo utilizada del modelo SWASH. Luego de diferentes pruebas se definió una malla regular con una resolución espacial de 10 m, con 530 celdas en x y 510 celdas en y .

El modelo se forzó con valores del ANM local y global y un espectro direccional paramétrico que utiliza como base el espectro JONSWAP. El forzamiento se realizó en la frontera norte, debido a que este modelo puede tener problemas al incluir fronteras abiertas con zonas de tierra, como en este caso, las fronteras este y oeste. Para las diferentes corridas del modelo, el espectro del oleaje en las fronteras se generó utilizando los parámetros integrales del oleaje (H_s , T_p , dispersión angular), generados en las simulaciones con SWAN, y el periodo del ciclo. De acuerdo con el manual de usuario, el periodo del ciclo es el tiempo necesario de simulación para que el modelo realice cálculos estadísticamente confiables y se puede estimar como 300 periodos de onda, en este caso, aproximadamente 37 minutos.

Finalmente, se debe aclarar que la altura de la ola que se ingresa a este modelo como forzante es una variable estacionaria que se calcula como cuatro veces la desviación estándar de la elevación de la superficie a lo largo de un periodo definido por el usuario. En este caso se estableció un periodo de simulación de 45 minutos considerando la relación establecida en el manual, entre el periodo del ciclo y el periodo de calentamiento. Y la altura de la ola se calculó para una duración de 15 minutos al final de la simulación. El modelo usa la Ecuación 9 para el cálculo de la altura significativa del oleaje, donde $E(f)$ es el espectro de la densidad de la varianza y f es la frecuencia.

$$H_s = 4 \sqrt{\int E(f)df} \quad (9)$$

La validación del modelo SWASH, se realizó usando la metodología propuesta por Orejarena (2013). Se comparó la cota de inundación de una ortofoto tomada el 13 de diciembre de 2024 entre las 14:00 y 16:00 con la cota de inundación resultante del modelo SWASH al incluir forzadores de ese periodo de tiempo.

4.1.1.4. Geomorfología

Se usaron dos fuentes de información de geomorfología para determinar la clasificación principal en el sector entre río Hobo y Punta Rey, y a partir de esto se extrajo la información de la geomorfología litoral. La primera fuente de información fue INVEMAR (2017) y la segunda Alcaldía de Arboletes (2000). Este procesamiento se realizó en ArcMap.

4.1.1.5. Protección de la línea de costa

Mediante imágenes satelitales y ortofotografías del área de estudio se identificó el estado actual de la línea de costa. Se delimitaron las zonas con obras de protección como diques exentos o rompeolas, espolones, obras verdes, obras laterales, playas anchas, playas angostas y zonas sin playa ni obras (totalmente expuestas). Este procesamiento se realizó en ArcMap.

4.1.2. Cuantificación de la amenaza por erosión costera

Se evaluó la amenaza por erosión costera en el sector Arboletes - Punta Rey, tomando en cuenta los siguientes criterios: la tasa de erosión/acreción costera, altura del oleaje, geomorfología, ANM y la protección de la línea de costa. Cada criterio fue clasificado cualitativamente (Muy Baja, Baja, Media, Alta y Muy Alta) y cuantitativamente (1, 2, 3, 4 y 5), lo que permitió una valoración más precisa del riesgo asociado a la erosión en esta zona (Tabla 7).

Tabla 7. Clasificación de los criterios de amenaza por erosión costera y su justificación.

Amenaza	Criterios	Intervalos de amenaza					Justificación
		Muy bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy alto (5)	
Erosión costera	Tasa de erosión y acreción (m/año) ¹	≥ 13	(13, 5)	[5, -0.1)	[-0.1, -2)	≤ -2	La tasa de erosión se interpreta inversamente al tener valores negativos, entonces, cuanto menor sea la tasa de erosión se tendría una mayor pérdida de terreno por año y la amenaza por erosión sería más alta. Por el contrario, cuanto mayor sea la ganancia de terreno por año (valores positivos), el nivel de amenaza es menor. La clasificación se tomó de Hinestroza (2020).
	Altura significativa del oleaje en la costa (m)	[0, 0.5]	(0.5, 1]	(1, 1.5]	(1.5, 2]	> 2	Cuanto mayor es la altura de la ola concentra una mayor cantidad de energía para socavar un acantilado o arrastrar el sedimento (Correa y Vernet, 2004), por lo que incrementa la amenaza potencial en la zona. Sin embargo, zonas con alturas de ola pequeñas (con poca energía) representan una amenaza baja. Diferentes autores concuerdan que alturas de ola superiores a 2 m generan una amenaza muy alta por erosión costera (Rangel-Buitrago y Posada, 2013; Rangel-Buitrago <i>et al.</i> , 2015; Hinestroza, 2020; Escorcia-Pinto, 2023)

Amenaza	Criterios	Intervalos de amenaza					Justificación
		Muy bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy alto (5)	
	Geomorfología	Colinas y montañas	Terraza marina con acantilados altos (> 10 m)	Terraza marina con acantilados medios (10 – 3 m) y tómbolos	Terraza marina con acantilados bajos (< 3 m) y tipo de sustrato de arcillolitas/lodolitas, y playas	Llanuras de inundación	Se integraron las clasificaciones definidas por Rangel-Buitrago y Posada (2013), Hinestroza (2020) y Escorcía-Pinto (2023), y se modificaron en función de la geomorfología existente en el área de interés y de la información disponible. Las llanuras de inundación, las playas y las terrazas marinas pequeñas de sustrato de arcillolitas/lodolitas se consideran con una amenaza alta al estar más expuestas y presentar mayor debilidad (Correa y Vernet, 2004). Cabe resaltar, que para esta clasificación se asume que cuanto mayor sea el acantilado, al momento de la erosión se aporta un mayor volumen de sedimentos y por ende se tendría un nivel de amenaza menor; sin considerar el efecto del transporte del sedimento.
	Ascenso del Nivel del Mar (m)	< 0.1	[0.1, 0.3]	(0.3, 0.5]	(0.5, 0.9]	> 0.9	De acuerdo con escenarios planteados por INVEMAR (2003) en un estudio de Colombia, se consideró que los ANM superiores a 90 cm generan una amenaza alta, entre 30 cm y 50 cm una amenaza media y menores a 30 cm no generan ninguna amenaza. Así mismo, el IPCC en su Sexto Informe, señala que incluso dentro de su escenario extremo al año 2100 el aumento estaría entre 0.6 m y 1 m (IPCC, 2021b).

Amenaza	Criterios	Intervalos de amenaza					Justificación
		Muy bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy alto (5)	
	Protección de la línea de costa	Rompeolas – diques exentos	Obras verdes o laterales	Espolones o playas anchas	Playas angostas con ausencia de obra de protección	Ausencia de playas y obras de protección	La ausencia de playas o estructuras de protección incrementa la amenaza de la costa frente al fenómeno de la erosión costera, ya que estos elementos actúan como barreras naturales o artificiales que mitigan el impacto. Por su parte, las obras duras como espolones o obras laterales y verdes han generado cierto grado de protección en Arboletes en ese orden, se conoce que los espolones producen acreción a un lado y erosión al otro (por eso amenaza generan amenaza media). En la actualidad, y los resultados de este estudio lo comprueban, en la zona de interés los rompeolas y obras laterales han generado una ganancia de terrero.

¹ Los intervalos de las tasas están escritos en orden decreciente para mantener la secuencia lógica del análisis.

Una vez realizada la clasificación de los criterios se determinó el peso de cada uno de ellos de acuerdo con la amenaza por erosión en la zona de interés. Para ello, se usó la metodología de Analytic Hierarchy Process (AHP), que consta de la evaluación por pares de criterios teniendo en cuenta cuál influye más en la amenaza por erosión costera. La evaluación se llevó a cabo teniendo en cuenta la valoración de expertos y la revisión del estado del arte, asignando los valores de la escala de Saaty (Tabla 1). Esta matriz de evaluación se conoce como matriz de comparación por pares, su diagonal principal es 1 y es una matriz recíproca (Tabla 8). Finalmente, esta se normalizó y se sumó cada fila para encontrar el peso de cada criterio (Tabla 9).

Tabla 8. Matriz de comparación por pares de los criterios de amenaza por erosión costera.

Criterios	Geomorfología	Tasa de erosión y acreción	Altura de la ola	Aumento del Nivel el Mar	Protección de la línea de costa
Geomorfología	1.00	0.25	2.00	3.00	2.00
Tasa de erosión y acreción	4.00	1.00	5.00	5.00	3.00
Altura de la ola	0.50	0.20	1.00	3.00	2.00
Aumento del Nivel el Mar	0.33	0.20	0.33	1.00	0.33
Protección de la línea de costa	0.50	0.33	0.50	3.00	1.00
Total	6.33	1.98	8.83	15.00	8.33

Tabla 9. Matriz normalizada y pesos de los criterios de amenaza por erosión costera.

Criterios	Geomorfología	Tasa de erosión y acreción	Altura de la ola	Aumento del Nivel el Mar	Protección de la línea de costa	Pesos
Geomorfología	0.16	0.13	0.23	0.20	0.24	0.19
Tasa de erosión y acreción	0.63	0.50	0.57	0.33	0.36	0.48
Altura de la ola	0.08	0.10	0.11	0.20	0.24	0.15
Aumento del Nivel el Mar	0.05	0.10	0.04	0.07	0.04	0.06
Protección de la línea de costa	0.08	0.17	0.06	0.20	0.12	0.12
Total	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

La obtención de estos pesos se analizó con lo reportado en el estado del arte en la zona, considerando la dinámica local, la influencia histórica, y la capacidad predictiva de cada variable. De esta manera se estableció que la tasa de erosión costera fue el criterio con el mayor peso del análisis (**48 %**), teniendo en cuenta que a nivel nacional es un indicador

directo de la erosión y que permite identificar las zonas más afectadas. Es de notar, que en el Plan Maestro de Erosión Costera de Colombia se usó la tasa de erosión anual como un criterio de impacto físico, para priorizar los puntos más críticos que requerían intervención urgente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2016). La tasa de erosión costera ha sido una variable determinante en numerosos estudios realizados en el sector río Hobo – Puerto Rey, ya que integra los factores naturales y antrópicos y refleja la magnitud del problema histórico en la zona, brindando una tendencia a futuro (Correa *et al.*, 2007; Gob.ANT *et al.*, 2021; Otalvaro-Escobar, 2023).

De igual manera, la geomorfología en la zona de estudio es un indicador de la susceptibilidad del suelo a procesos erosivos. Si bien en la zona son comunes las terrazas marinas de alturas entre 4 m y 10 m, el tipo de sustrato es principalmente arcillolitas, lodolitas fracturadas y diapiros de lodo (Correa y Vernet, 2004; Correa *et al.*, 2007) los cuales favorecen los procesos de socavación y colapso de los acantilados (García-Echavarría *et al.*, 2022). Por lo anterior, se valida que esta variable tenga una alta influencia en el análisis de la amenaza por erosión costera con un peso de **19 %**.

Por otra parte, la altura de la ola es un factor dinámico asociado a la energía del oleaje y a la capacidad del transporte de sedimentos. De acuerdo con García-Echavarría *et al.* (2022), en las zonas de volcán de lodo y río Hobo se ha identificado que el oleaje que proviene del norte y noreste incide perpendicularmente en la zona costera, generando corrientes longitudinales que socavan la base de los acantilados. Así mismo, su influencia depende de las condiciones oceánicas como el swell, el cual puede aumentar la amenaza por erosión costera (Posada y Henao, 2008; Carreño-Duarte, 2022). Por lo tanto, su peso (**15 %**) se debe a que su impacto es puntual y menos constante en el tiempo que las variables de tasa de erosión y geomorfología.

Con relación al nivel de protección de la línea de costa, se validó el peso del **12 %** debido a la ineffectividad histórica de las obras de protección en Arboletes. De acuerdo con Correa y Vernet (2004) y Correa *et al.* (2007) señalan que la mayor parte de las obras costeras han incrementado la pérdida de sedimentos en zonas aledañas. En la actualidad, se siguen

construyendo obras de protección costera (Grisales, 2021), las cuales han contribuido a la ganancia de sedimentos en áreas puntuales. Sin embargo, aunque estas obras disminuyen relativamente la amenaza en dichas áreas, no resuelven el problema general. Por otra parte, este criterio incluyó las zonas sin playas ni obras de protección costera. Según Otálvaro-Escobar (2023), el 47 % de la costa de Arboletes presenta un riesgo muy alto de erosión debido a la ausencia de playas, por lo que estas zonas requieren prioridad en el análisis de amenazas.

Finalmente, el ANM se validó como el criterio con el menor peso (6 %), lo que se debe a dos aspectos. En primer lugar, los estudios de la zona de interés indican que el nivel del mar tiene poca influencia en la zona debido a su rango micro-mareal (± 50 cm) (Quintana *et al.*, 2021). En segundo lugar, al considerar los escenarios de cambio climático, esta variable aumenta progresivamente y a largo plazo se le otorga una mayor importancia. Sin embargo, en el corto y mediano plazo, su influencia es menor.

Con la clasificación cuantitativa y pesos de cada criterio, se calculó un promedio ponderado para determinar el nivel de amenaza por erosión costera de acuerdo con la Ecuación 10. Finalmente, los valores decimales resultantes se convirtieron al entero más cercano.

$$A_{erosion} = (TasaErosion \times 0.48) + (Geomorfologia \times 0.19) + (AlturaOla \times 0.15) + (ProteccionLC \times 0.12) + (ANM \times 0.06) \quad (10)$$

4.1.3. Cuantificación de la amenaza por inundación costera

Con el fin de evaluar el nivel de amenaza por inundación costera, se obtuvo el run-up horizontal máximo generado por el modelo SWASH usando Matlab y ArcMap. Este parámetro se adoptó como criterio único para determinar el nivel de amenaza. Los resultados permitieron identificar las áreas inundadas y las zonas secas, que fueron clasificadas según el nivel de amenaza descrito en la Tabla 10.

Tabla 10. Clasificación de los criterios de amenaza por inundación costera y su justificación.

Amenaza	Criterios	Intervalos de amenaza					Justificación
		Muy bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy alto (5)	
Inundación costera	<i>Run-up</i> horizontal máximo		Zona seca		Zona inundada		La variable de run-up horizontal máximo que calcula el modelo numérico SWASH, refleja directamente el límite entre las zonas inundadas y las zonas secas, generando la clasificación de amenaza alta a las zonas donde la suma entre la elevación del nivel del mar y el oleaje tuvieron incidencia (da Silva et al., 2020).

4.2. Análisis de la vulnerabilidad

Se evaluó el nivel de vulnerabilidad total a partir de la susceptibilidad física y socioeconómica de la zona costera. Con este fin se consideró la disponibilidad de información en el área de interés.

4.2.1. Variables/criterios que influyen en la vulnerabilidad

Para la estimación de vulnerabilidad en un contexto multiamenaza (HAZUS-MH), se tuvieron en cuenta elementos definidos por La Unión Europea (2014). Se recopiló información secundaria relacionada con aspectos sociodemográficos y físicos (Tabla 11), y se procesó en ArcMap 10.8.

Tabla 11. Información física y sociodemográfica utilizada para el cálculo de la vulnerabilidad.

Vulnerabilidad	Criterio	Fuente
Física	Pendiente del terreno	Copernicus Marine Service
	Geomorfología	INVEMAR (2017) y Alcaldía de Arboletes (2000).
	Distancia desde la línea de costa	Propuesto en este trabajo
Socioeconómica	Densidad poblacional	Capas 'MGN-Nivel Manzana integrado al CNPV2018' y 'MGN-Nivel Sector Rural integrado al CNPV2018' del DANE (https://geoportal.dane.gov.co/servicios/descarga-y-metadatos/datos-geoestadisticos/)
	Número de viviendas	
	Zonas con usos no residenciales	
	Edades	
	Estrato socioeconómico	

La pendiente del terreno se obtuvo a través de una Red Irregular Triangular (TIN, por sus siglas en inglés), luego se calculó la pendiente en porcentaje y se reclasificó en función de los niveles de vulnerabilidad (Tabla 12). En el caso de la geomorfología se integraron las diferentes fuentes de información y se clasificó en función de los niveles de vulnerabilidad (Tabla 12). El criterio de distancia desde la línea de costa determina la proximidad al borde costero, generando franjas a intervalos regulares desde la costa hacia el interior del territorio, conforme a los rangos de distancia definidos en la Tabla 12.

Con relación a la vulnerabilidad socioeconómica, se usó la información nacional del área de interés tanto para la zona urbana como para la rural, y se extrajo cada criterio para un análisis individual. Para la densidad poblacional y el número de viviendas se exportaron los datos y se clasificaron de acuerdo con los niveles de vulnerabilidad (Tabla 12). Sin embargo, variables como edades, estratos y zonas con usos no residenciales, presentaban varios datos por manzana o área. Por ejemplo, en una misma manzana existen viviendas de estrato 1, 2 y 3; por lo que se realizó un promedio ponderado para determinar cuál es el subcriterio que predomina en cada manzana o área (Ecuación 11).

$$PP_{Criterio} = \frac{\sum_{i=1}^n (Subcriterio_i \times P_{Subcriterio_i})}{\sum_{i=1}^n Subcriterio_i} \quad (11)$$

Donde, $PP_{Criterio}$ es el Promedio Ponderado de los criterios mencionados, $Subcriterio_i$ es el número de subcriterios en una manzana o área (por ejemplo, número de viviendas estrato 3 o número de personas con edades entre 20 - 29 años), y $P_{Subcriterio}$ es el peso asignado a cada subcriterio. Los subcriterios y pesos utilizados se detallan en el Anexo A. Una vez, se calculó el promedio ponderado, se realizó la clasificación de los niveles de vulnerabilidad por cada criterio de acuerdo con la Tabla 12.

4.2.2. Cuantificación de la vulnerabilidad física y socioeconómica

Una vez se procesó y clasificó cada criterio de vulnerabilidad con base en la Tabla 12, se calculó la vulnerabilidad física y la socioeconómica. Se realizó un promedio entre los criterios analizados suponiendo que es similar el aporte de cada criterio a la vulnerabilidad (Ecuaciones 12 y 13).

$$V_{física} = \frac{Pendiente + Geomorfología + Distancia a la costa}{3} \quad (12)$$

$$V_{socioecon} = \frac{Personas + Viviendas + No Residenciales + Edades + Estratos}{5} \quad (13)$$

Tabla 12. Clasificación de los criterios de vulnerabilidad física y socioeconómica y su justificación.

Vulnerabilidad	Criterios	Intervalos de vulnerabilidad					Justificación
		Muy bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy alto (5)	
Física	Pendiente (%)	> 25	12.1 - 25	7.1 - 12	3.1 - 7	0 – 3	las áreas con pendientes suaves son más propensas a inundaciones debido a que las olas penetran más fácilmente tierra adentro. Además, las costas con pendientes bajas experimentan mayores tasas de retroceso frente al aumento del nivel del mar y tormentas extremas; debido a su topografía plana y la ausencia de barreras naturales como bermas bien desarrolladas (Sánchez-Artus, 2023).
	Distancia a la costa (m)	>1201	801-1200	501-800	201-500	<200	Los lugares más alejados de la línea de costa están sujetos a una menor susceptibilidad por erosión e inundación costera (Escorcía, 2023)
	Geomorfología	Colinas y montañas	Terraza marina con acantilados altos (> 10 m)	Terraza marina con acantilados medios (10 – 3 m) y tómbolos	Terraza marina con acantilados bajos (< 3 m) y tipo de sustrato de arcillolitas/lo dolitas, y playas	Llanuras de inundación	La misma justificación descrita en la Tabla 7.
Socioeconómica	Densidad poblacional (hab/m ²)	<0.001	0.0011-0.002	0.0021-0.004	0.0041-0.005	> 0.0051	Al coexistir más personas en un espacio determinado, habría más pérdidas. Esta clasificación se realizó en función del número de habitantes en la zona.

Vulnerabilidad	Criterios	Intervalos de vulnerabilidad					Justificación
		Muy bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy alto (5)	
	Edad	10 - 29	-	30 - 59	-	≤ 9 y ≥ 60	Los adultos mayores y niños son más susceptibles a un evento extremo por erosión e inundación, debido a que dependen de otras personas y no tienen una alta capacidad de respuesta. La clasificación se tomó de Salas (2021).
	Estrato socioeconómico	> 5	4	3	2	1	Las personas con un estrato socioeconómico de 1 tienen menos capacidad de recuperación ante los fenómenos de erosión e inundación costera.
	Unidades no residenciales	Lote	En construcción, parques y zonas verdes	Comercio, industria y minero-energético	Institucionales, agropecuario y forestal	Conservación ambiental y de servicios	Se tomó la clasificación expuesta por Salas (2021). Debido a que, bajo un evento de amenaza por erosión e inundación, los lotes, las zonas en construcción y parques tendrían mínimas pérdidas económicas y de vidas. Además, se le da una alta importancia a los lugares destinados para la conservación ambiental, la prestación de servicios y el agro.
	Número de viviendas	1 - 7	8 - 15	16 - 27	28 - 46	≥ 47	Al existir más viviendas en un espacio determinado, habría más pérdidas. Esta clasificación se realizó en función del número de viviendas en la zona.

4.2.3. Cuantificación de la vulnerabilidad total

Posteriormente, se determinó la vulnerabilidad total en el área de estudio asignando un peso del 60% a la vulnerabilidad física y 40% a la vulnerabilidad socioeconómica, implementando el promedio ponderado de la Ecuación 14.

$$V_{total} = (V_{física} \times 0.6) + (V_{socioeconómica} \times 0.4) \quad (14)$$

La asignación de un 60 % de peso a la vulnerabilidad física y 40% a la socioeconómica para evaluar riesgos costeros, se fundamenta en que las características físicas (elevación, tipo de suelo, pendiente) determinan directamente la exposición a inundaciones y erosión; y las características socioeconómicas cumplen un papel secundario, debido a que aspectos como densidad poblacional, acceso a servicios básicos y capacidad institucional modulan la recuperación post-desastre (Boruff *et al.*, 2005). En Colombia, aunque no existe un estudio donde especifiquen el valor de importancia relativa, se respalda la priorización de la vulnerabilidad física por su énfasis en los trabajos desarrollados; así mismo, el Servicio Geológico Colombiano, considera las variables sociales como “mediadoras” más que determinantes (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

4.3. Cuantificación del riesgo por erosión e inundación costera

Finalmente, para establecer el nivel de riesgo por erosión e inundación costera se calculó el producto entre los niveles de amenaza y los niveles de vulnerabilidad, lo anterior, para cada escenario y tipo de amenaza. Debido a que el producto entre la amenaza y la vulnerabilidad establece valores puntuales, se clasificó el nivel de riesgo por erosión e inundación costera como se muestra en la Figura 7.

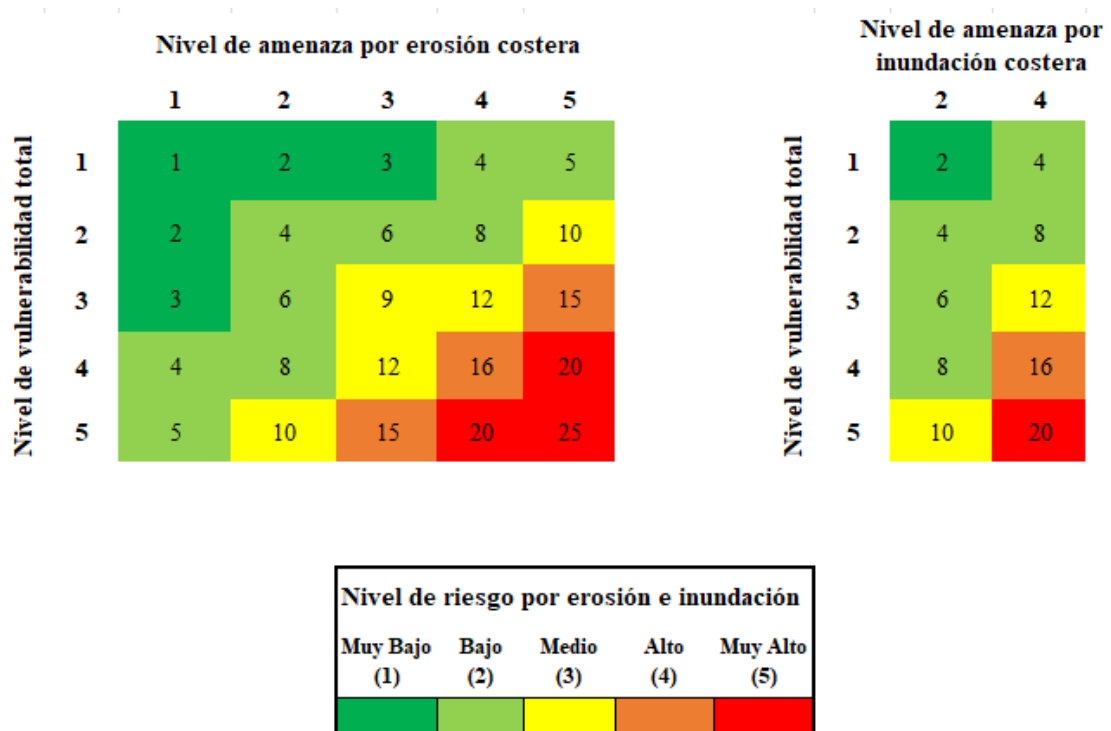


Figura 7. Clasificación de los niveles de riesgo por erosión e inundación costera.

5. Resultados y discusiones

5.1. Identificación de la amenaza

5.1.1. Variables/criterios que influyen en la erosión e inundación costera

5.1.1.1. Evolución temporal de la línea de costa

En la Figura 8 se presentan las áreas de erosión y acreción de Arboletes para el periodo de 2004 a 2020. En este período predominó la erosión en las zonas 1, 2, 3 y 5. La zona 2 presentó la mayor tasa y área de erosión (-2.8 m/año y 62707 m²) y en la zona 4 (área mayormente intervenida) se registró una acreción de 1.6 m/año. En general, se obtuvo un área de erosión de 192526 m² y un área de acreción de 38240 m² que generan un balance total de pérdida de terreno de 164287 m² (Figura 8).

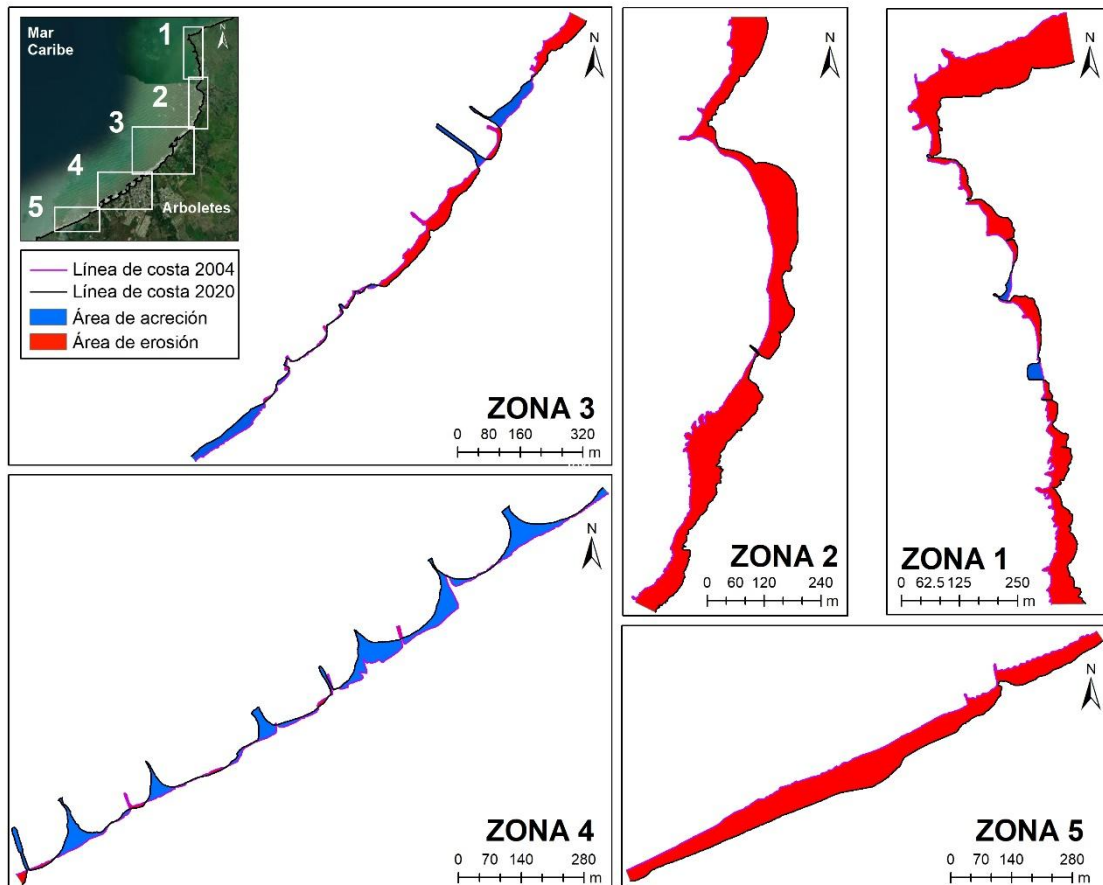


Figura 8. Áreas de erosión y acreción de Arboletes para el periodo de 2004 a 2020.

Entre los años 2020 y 2022 prevaleció la acreción en las zonas 3 y 4 (áreas mayormente intervenidas) evidenciando la mayor tasa de acreción de 19.2 m/año en la zona 3. Así mismo se observó erosión en las zonas 1, 2 y 5. Sin embargo, la mayor tasa de erosión fue de -4.6 m/año en la zona 1 (Puerto Rey). En este periodo, se registró un área de erosión de 21027 m² y un área de acreción de 70262 m² que generan un balance total de ganancia de terreno de 49234 m² (Figura 9).

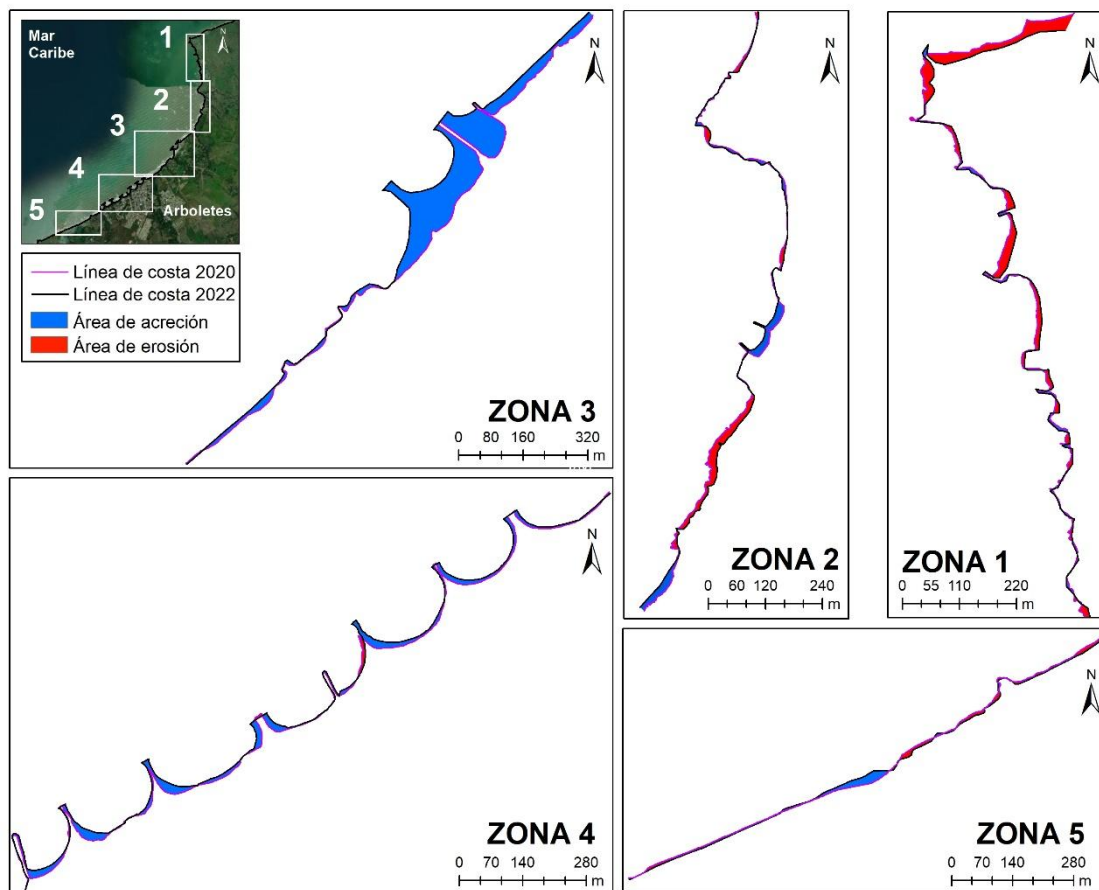


Figura 9. Áreas de erosión y acreción de Arboletes para el periodo de 2020 a 2022.

El periodo de 2022 a 2023 estuvo enmarcado por un balance total de 14576 m² de pérdida de terreno, resultado de un área total de erosión de 29118 m² y un área total de acreción de 14542 m². La mayor tasa de erosión se presentó en la zona 3 con un valor de -9.4 m/año y la mayor tasa de acreción fue de 6.5 m/año en la zona 1. Lo anterior, deja en evidencia que en este periodo predominó la erosión costera (Figura 10).

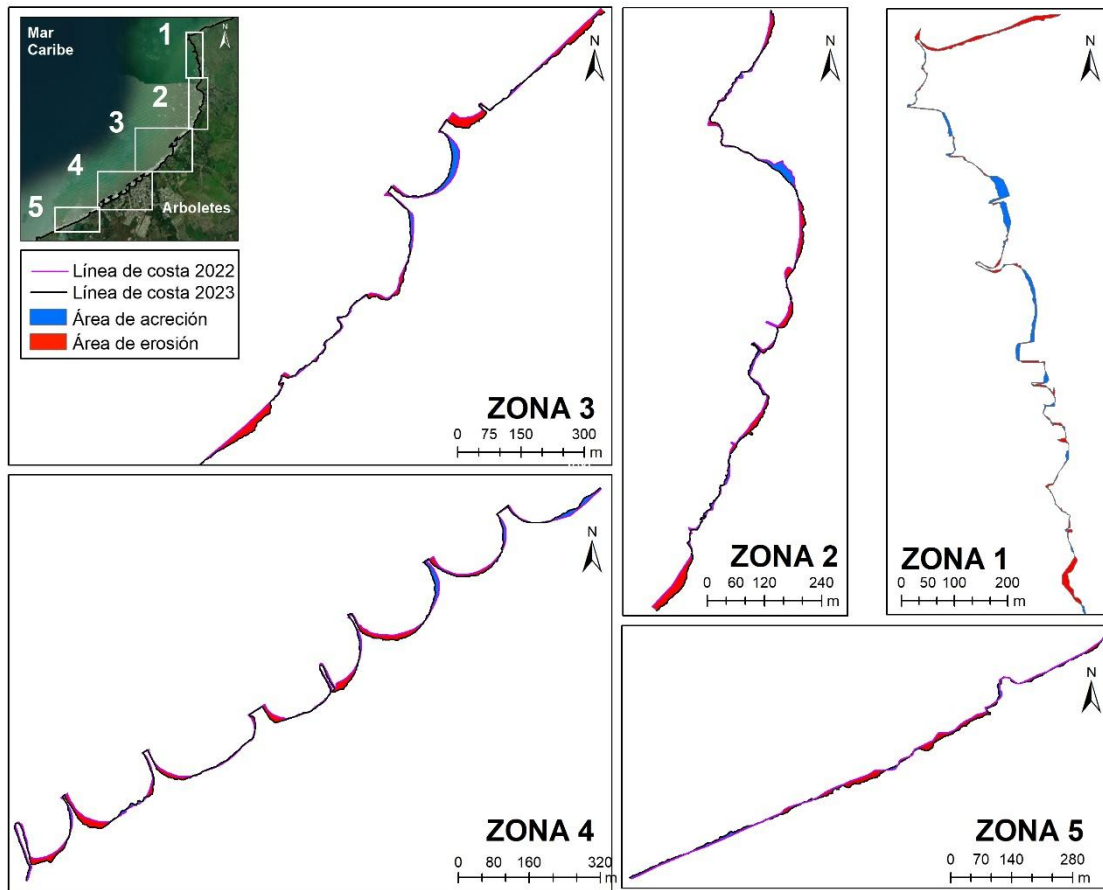


Figura 10. Áreas de erosión y acreción de Arboletes para el periodo de 2022 a 2023.

En todo el período analizado de 2004 a 2023 predominó la erosión en las zonas 1, 2 y 5, donde las mayores áreas erosionadas se presentaron en las zonas 1 y 2. Sin embargo, las tasas más altas de erosión se muestran en las zonas 2 y 5 con un valor de -2.6 m/año para ambas zonas. Por otro lado, las mayores tasas y áreas de acreción se registran en las zonas 3 y 4 (áreas intervenidas), evidenciando una ganancia de terrero de 2.1 m/año en la zona 3. En general, se obtuvo un área de erosión de 196919 m² y un área de acreción de 78954 m² que generan un balance sedimentario negativo de 117965 m² (Figura 11).

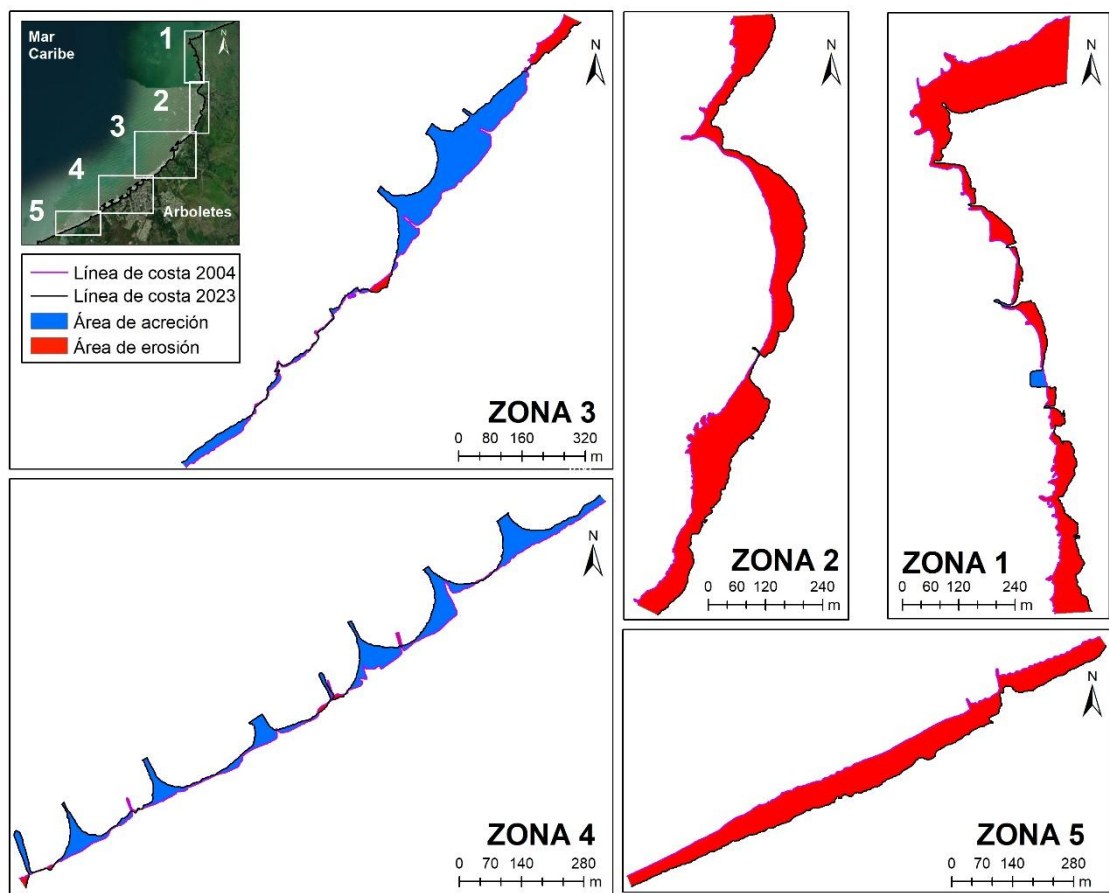


Figura 11. Áreas de erosión y acreción de Arboletes para el periodo de 2004 a 2023.

La Figura 12 y la Tabla 13 muestran que, en los periodos analizados, las zonas 1, 2 y 5 son las más afectadas por los procesos erosivos con una tasa promedio de erosión de -2.5 m/año. Correa y Vernet (2004) y Rangel-Buitrago *et al.* (2015), establecieron una tasa de erosión para el noreste del golfo de Urabá entre 3 y 3.4 m/año, respectivamente. Gobernación de Antioquia *et al.* (2021), estableció en las zonas de río Hobo (zona 5 en este estudio) y del Volcán de Lodo (zona 3), tasas de retroceso de 3.5 m/año y 1.5 m/año, respectivamente. Recientemente, López y Dussan (2023) calcularon una tasa de erosión costera en Arboletes de 4.1 m/año. Los resultados de este estudio son similares con los calculados por estos autores, sin embargo, se debe aclarar que el análisis multitemporal de la línea de costa depende de factores como el periodo de análisis, la zona de interés, los criterios de digitalización de la línea de costa y el número de transectos seleccionados.

Adicionalmente, se evidencia una tendencia a la sedimentación en las zonas 3 y 4 con una tasa promedio de acreción de 1.8 m/año. Estas zonas son áreas mayormente intervenidas con obras de protección costera, por lo que los resultados sugieren que estas estructuras han generado una ganancia de sedimentos. Sin embargo, en las zonas adyacentes a ellas se ha agudizado el fenómeno de la erosión costera. Grisales (2021), señala que existen 38 obras de protección costera de gran tamaño en la zona de estudio de las cuales sólo 15 han mitigado mínimamente el problema de la erosión.

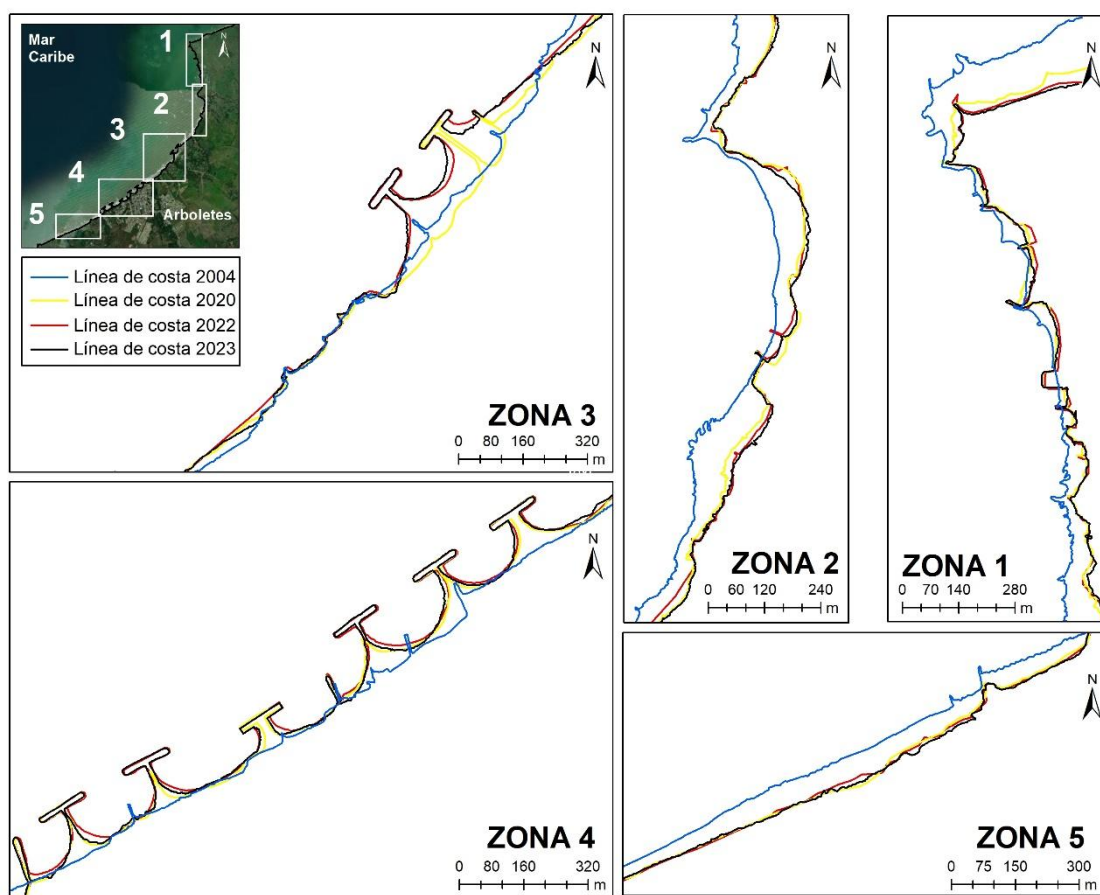


Figura 12. Localización de las líneas de costa en todos los periodos analizados.

Tabla 13. Resumen de las tasas y áreas de erosión y acreción de los periodos analizados. En colores rojos erosión, en azules acreción

Periodo	Zona	Tasa de acreción (m/año)	Tasa de erosión (m/año)	Área de acreción (m ²)	Área de erosión (m ²)	Balance sedimentario (m ²)
2004-2020	1	1.2	-2.5	1668.7	57155.8	-55487.0
	2	0.0	-2.8	58.9	62707.7	-62648.7
	3	1.1	-1.2	16720.7	11102.9	5617.8
	4	1.6	-0.5	25409.2	1701.6	23707.6
	5	0.0	-2.8	0.0	54240.6	-54240.6
2020-2022	1	1.6	-4.6	1496.1	11126.6	-9630.5
	2	3.5	-2.9	4424.6	5364.0	-939.4
	3	19.2	-0.7	48620.0	340.3	48279.7
	4	3.7	-1.9	13258.3	913.5	12344.8
	5	3.8	-1.8	2462.8	3283.0	-820.2
2022-2023	1	6.5	-3.7	3465.5	3508.5	-43.0
	2	3.9	-6.7	2395.7	5876.0	-3480.3
	3	5.7	-9.4	3542.2	7762.7	-4220.5
	4	4.8	-4.7	3779.7	7830.5	-4050.8
	5	3.3	-6.1	1358.9	4140.1	-2781.2
2004-2023	1	1.2	-2.5	1330.2	64701.7	-63371.6
	2	0.0	-2.6	37.3	67231.5	-67194.1
	3	2.1	-0.7	44290.5	5849.1	38441.3
	4	1.5	-0.5	33295.9	1293.6	32002.3
	5	0.0	-2.6	0.0	57842.8	-57842.8

Con esta información se realizó el cálculo la amenaza por la tasa de erosión (Figura 13). En general los valores van de medios a muy altos. Se evidencia que el **30 %** de la línea de costa presenta **amenaza muy alta** (Punta Rey, Los Córdoba, y río Hobo), **31 % amenaza alta** y **38. % amenaza media**.

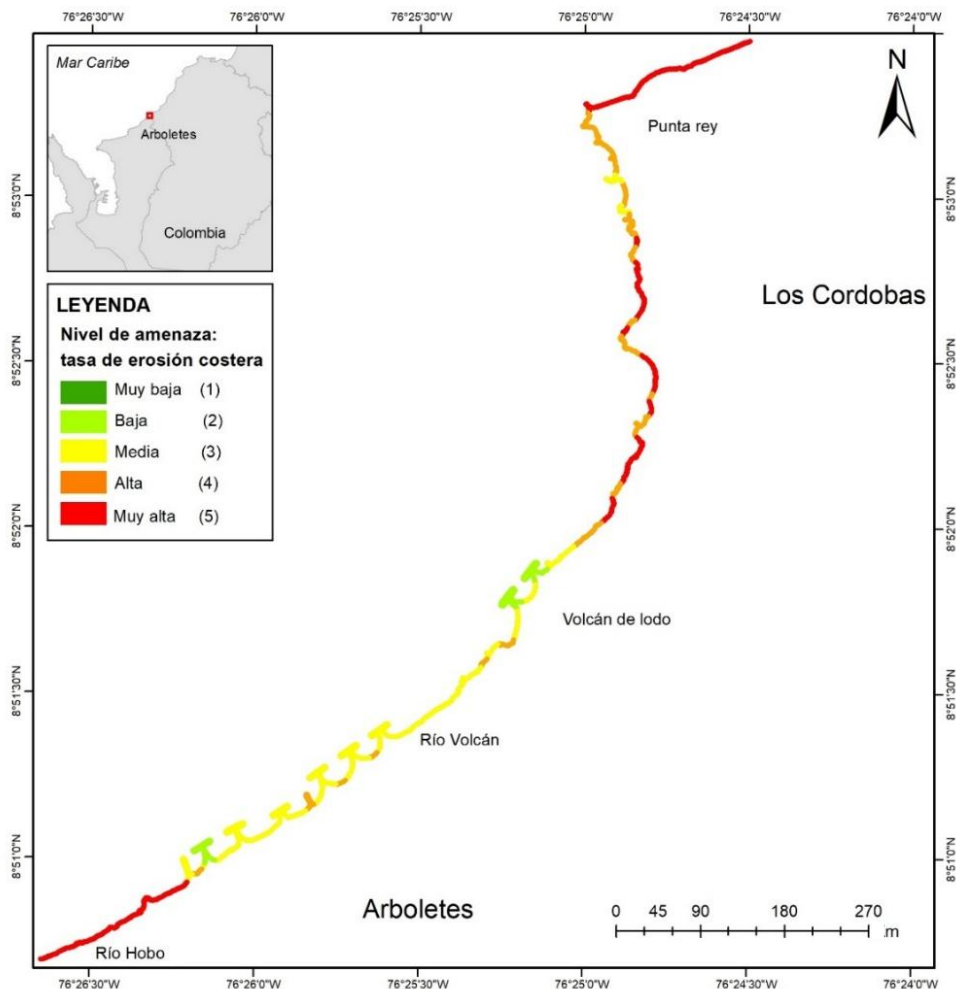


Figura 13. Amenaza por el criterio de tasa de erosión.

5.1.1.2. Ascenso del Nivel del Mar (ANM)

5.1.1.2.1. Tendencia local del nivel del mar

Al analizar las series de tiempo de nivel del mar local en Arboletes y Sapzurro, se encontró que en Arboletes la constituyente M_2 es la que más influye en el comportamiento de la marea, con tipo de marea mixta predominantemente semidiurna y un rango de marea de 30 cm. En contraste, en Sapzurro la constituyente principal es K_1 por lo que el tipo de marea es mixta predominantemente diurna y tiene un rango de marea de 40 cm (Anexo B).

De acuerdo con Quintana *et al.* (2021) la marea en el golfo de Urabá es de tipo mixta principalmente semidiurna, con una amplitud máxima de aproximadamente 50 cm y sus principales constituyentes son K1 y M2, lo que concuerda con los resultados de la caracterización local de la marea en la zona.

Por otro lado, los resultados del ANM de la base de datos Copernicus Marine Service, sugieren que una tendencia local de aproximadamente 5 mm/año para el periodo de 1993-2024 (~31.6 años), lo que se traduce en un valor de ANM de 0.16 m (Figura 14). En este sentido, Londoño y Murillo (2018) determinaron una tasa de ANM en el sector del Golfo de Urabá de ~4.2 mm/año para el periodo de 1994 – 2015, lo cual muestra similitudes con este estudio, a pesar de las diferencias en los periodos de tiempo y las bases de datos utilizadas.

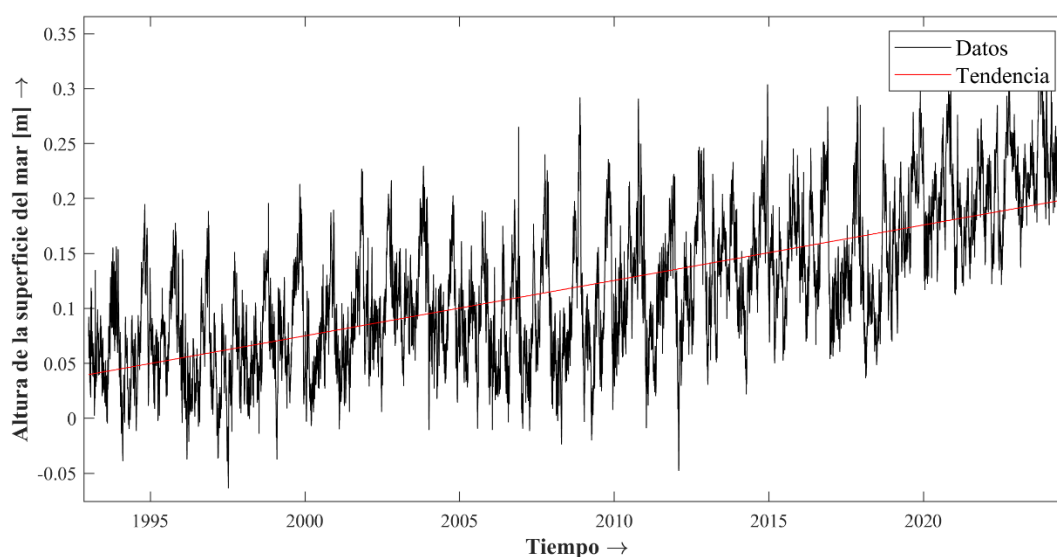


Figura 14. Serie de tiempo y línea de tendencia del ANM local (Copernicus Marine Service).[AL1]

5.1.1.2.2. Tendencia global del nivel del mar

Partiendo del análisis de los escenarios SSP de cambio climático del IPCC, se identificó el ANM global en función de algunos periodos de retorno (Tabla 14). Para efectos de este estudio, se seleccionaron los escenarios SSP1-1.9 al año 2030, SSP1-1.9 al año 2100 y SSP5-8.5 al año 2100; que corresponden a valores de ANM de 0.20 m, 0.52 m y 0.9 m, respectivamente.

Tabla 14. Tendencia de ANM global.

Año	SSP1-1.9 ANM (m)	SSP5-8.5 ANM (m)
2030	0.20	0.24
2050	0.31	0.38
2100	0.52	0.90

Con base en lo anterior, se estableció la amenaza por ANM para los escenarios seleccionados (Figura 15). Nótese que los valores de ANM de los diferentes escenarios son constantes a lo largo de la línea de costa.

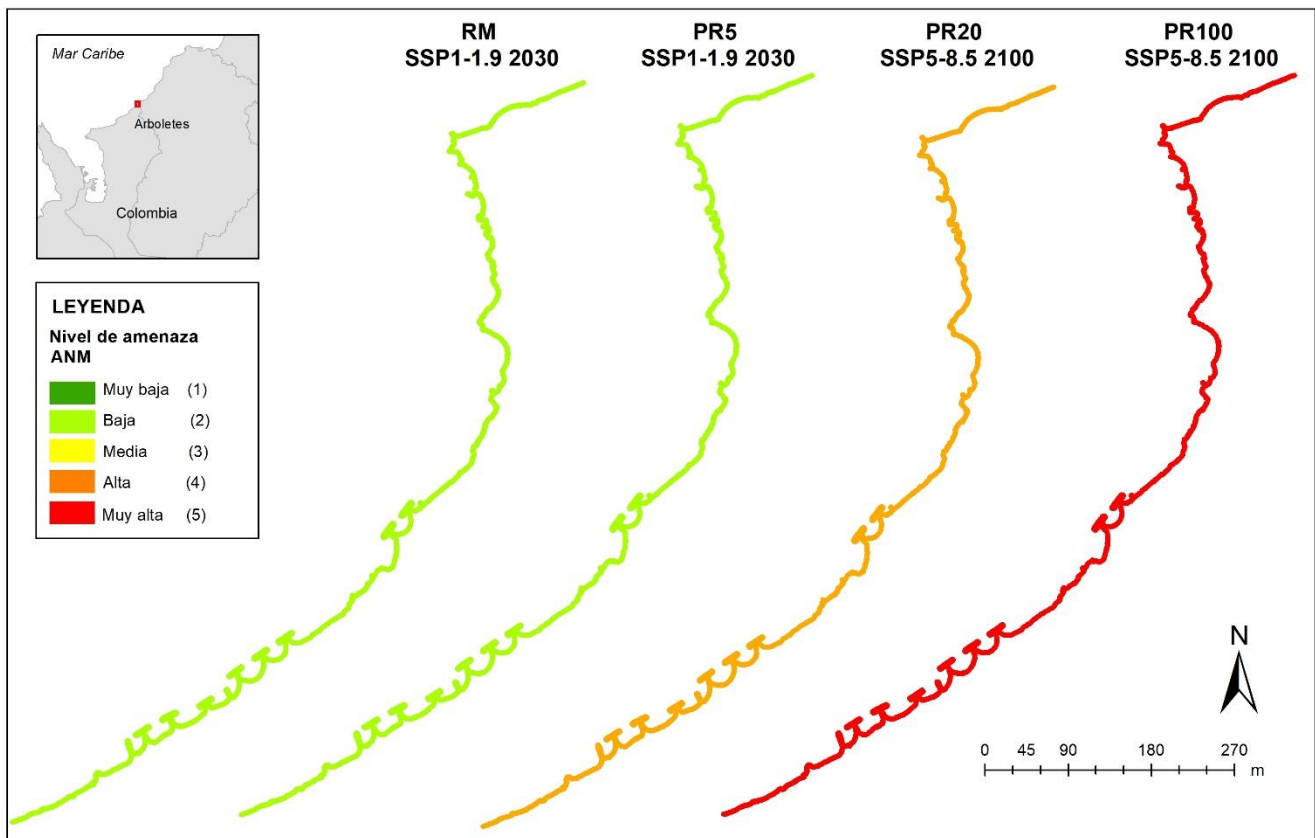


Figura 15. Amenaza por el criterio de ANM.

5.1.1.3. Caracterización hidrodinámica de la zona costera

5.1.1.3.1. Determinación del clima marítimo del oleaje en aguas profundas

Los análisis del régimen medio de los puntos P5, P9 y P10 mostraron resultados similares. Por lo tanto, a continuación, solo se presentan los resultados de los puntos P5 (punto más cercano al área de interés) y el punto P8. Los resultados de los puntos P9 y P10, así como las salidas graficas, pueden consultarse en el Anexo C.

Las Figura 16A y Figura 16B se muestran los resultados del punto P5. Se observa como las direcciones predominantes del oleaje son norte (N) y noreste (NNE), con un porcentaje de ocurrencia del 51% y 43%, respectivamente. La altura de ola con mayor frecuencia de ocurrencia varía entre 0.57 m y 0.92 m y el período pico entre 7.23 s y 8.20 s (Figura 16C). La mayor altura de ola significativa fue de 2.76 m y se encuentra en la dirección nornoroeste (NNW). En la Figura 16D se puede observar que existe un 50% de probabilidad de que la altura de ola no exceda 0.84 m y 5% de probabilidad que supere 1.7 m.

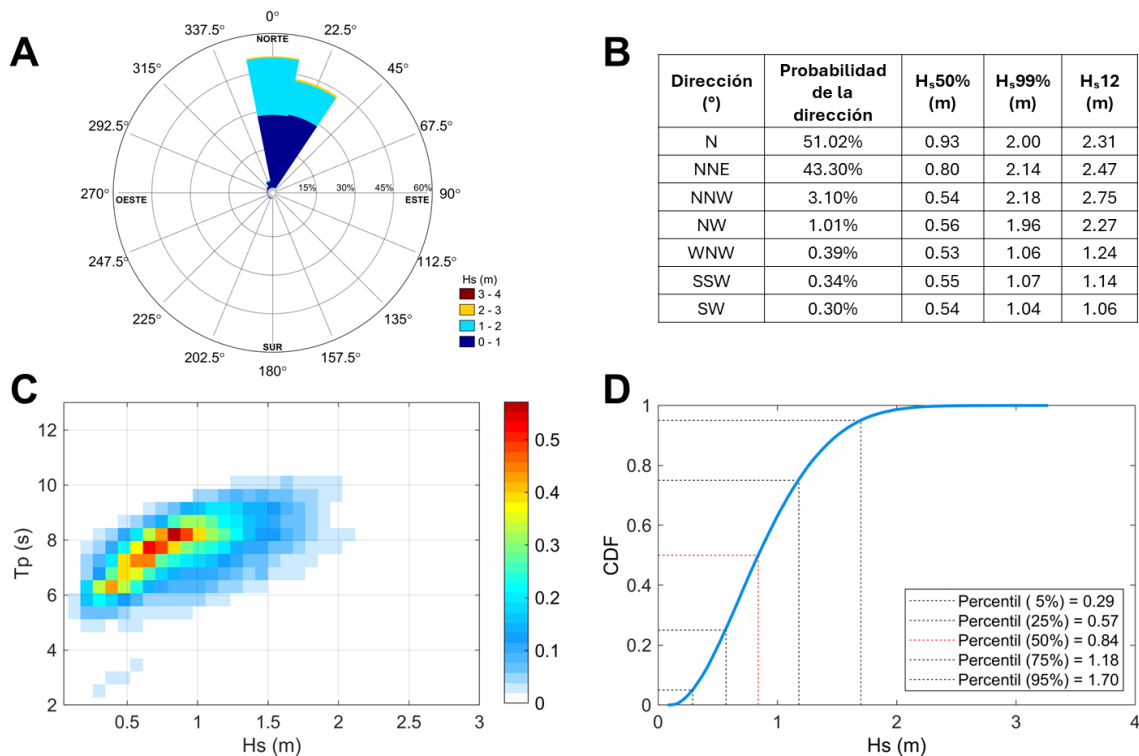


Figura 16. Régimen medio del oleaje en el punto 5. A) rosa de oleaje. B) Tabla de estadísticos básicos. C) Probabilidad conjunta entre Hs y Tp. D) Función de Distribución Acumulada (CDF).

En el punto P8 la dirección principal del oleaje es NNE con una probabilidad de ocurrencia del 72% y además se tiene un 23% de ocurrencia en la dirección N. El mayor valor de la altura del oleaje es 2.94 m en sentido NNW (Figuras Figura 17A y Figura 17B). Los parámetros con mayor probabilidad de altura significativa de la ola y período pico varían entre 0.62 m y 1.02 m y 7.40 s y 8.34 s, respectivamente (Figura 17C). El valor mayor de la altura de ola que es superada 12 horas al año (Hs12) es de 2.94 m y se presenta en la dirección NNW (Figura 17B). Adicionalmente, los datos evidencian una probabilidad de que el 50% del tiempo la altura de la ola no superará 0.95 m y que hay un 5% de probabilidad que supere 1.89 m (Figura 17D).

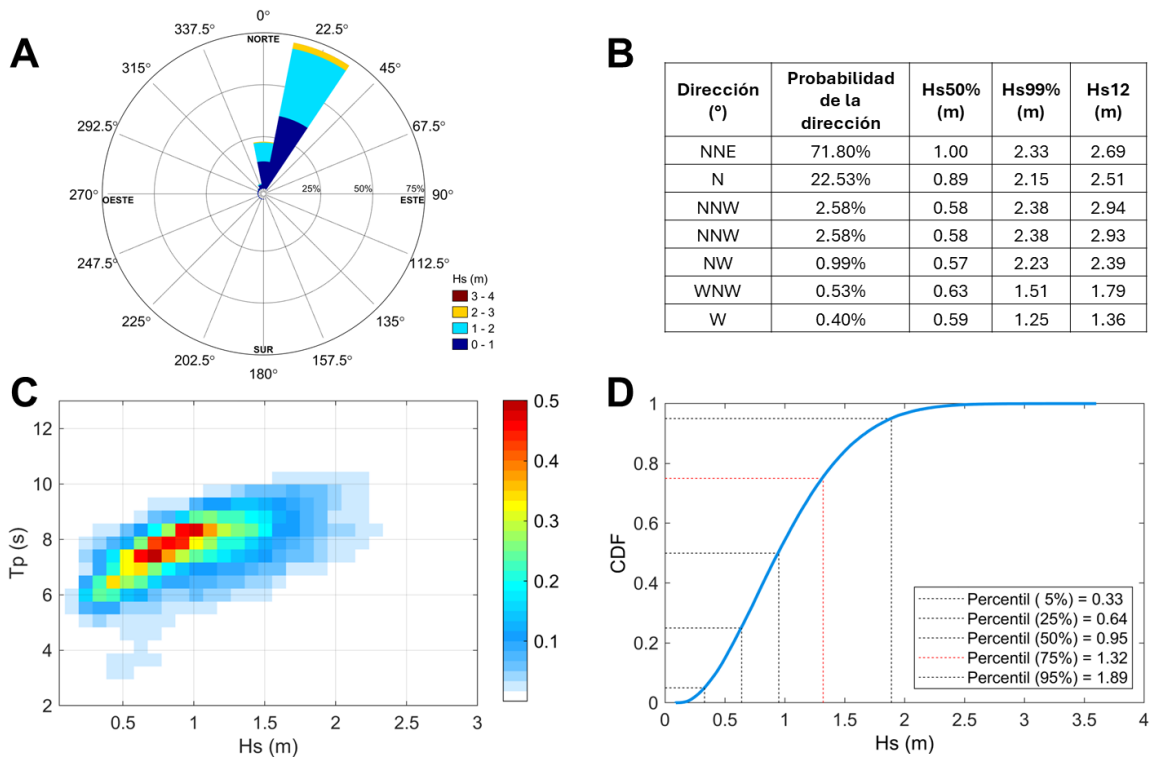


Figura 17. Régimen medio del oleaje en el punto 8. A) rosa de oleaje. B) Tabla de estadísticos básicos. C) Probabilidad conjunta entre Hs y Tp. D) Función de Distribución Acumulada (CDF).

En resumen, las cuatro series de tiempo de oleaje ubicadas en aguas profundas evidencian que la dirección predominante del oleaje es NNE y a medida que se acerca a la costa cambia hacia el N con probabilidades de ocurrencia $> 50\%$. Los valores más probables de altura significativa (Hs) y período pico (Tp) varían entre 0.5 m y 1.2 m y 6.5 s y 8.3 s, respectivamente. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Gob.ANT et al. (2021),

quienes afirman que H_s y T_p varían entre 0.6 m y 1.6 m y 3 s y 7 s, respectivamente. Además, Correa y Vernet (2004) establecieron que el oleaje es modulado principalmente por los vientos Alisios (vienen del NE y N) durante la época de verano de diciembre a mayo.

Con respecto al régimen extremo, los cálculos indican que en el punto 5, la altura significativa para períodos de retorno de 5, 20 y 100 años son de 2.85 m, 3.24 m y 3.40 m, respectivamente (Figura 18A). El análisis en el punto 8 muestra una altura significativa de 3.12 m, 3.51 m y 3.87 m para los períodos de retorno de 5, 20 y 100 años, respectivamente (Figura 18B). En el punto 9 se evidencia que la altura significativa para períodos de retorno de 5, 20 y 100 años es de 3.06 m, 3.68 m y 4.38 m, respectivamente (Figura 18C). Y el punto 10 mostró alturas de ola de 2.4 m, 2.9 m y 3.5 m para periodos de retorno de 5, 20 y 100 años, respectivamente (Figura 18D).

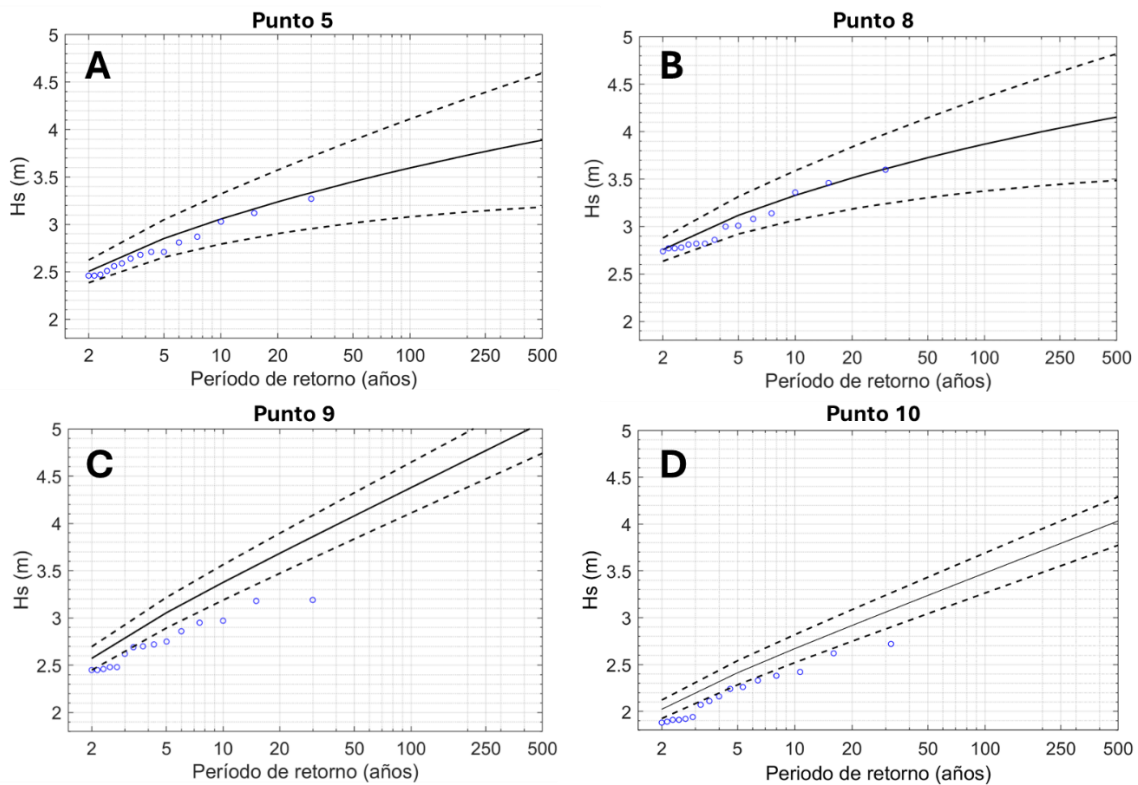


Figura 18. Régimen extremo de la altura de la ola. A) Punto 5. B) Punto 8. C) Punto 9. D) Punto 10.

5.1.1.3.2. Modelación del oleaje de aguas profundas a someras

Considerando los resultados del clima marítimo en aguas profundas y el análisis de la tendencia del ANM, se establecieron los casos de modelación. Estos se pueden observar en la Tabla 15.

El modelo SWAN se configuró para utilizar la formulación de suministro de energía por viento y de rompimiento en aguas profundas (whitecapping) de Janssen, se activaron los procesos de interacciones no lineales por cuadrupletas, el rompimiento por asomeramiento y la fricción con el fondo tipo Jonswap. Para esta última en el proceso de calibración se estableció un coeficiente de fricción igual a 0.0401.

Tabla 15. Casos de modelación de SWAN.

ID del caso	Descripción del caso	Nivel del mar	Oleaje en el punto 5			Oleaje en el punto 8			Oleaje en el punto 9			Oleaje en el punto 10		
			Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)
RM1 ANM local	Régimen medio del oleaje y el ANM local	0.16	0.7	7.7	15.0	0.7	7.4	15.0	0.7	7.9	15.0	0.4	6.4	5.0
PR5 SSP1.9-2030	Oleaje a un periodo de retorno de 5 años y nivel del escenario SSP1.9 al año 2030	0.20	2.9	9.0	342.0	3.1	9.1	4.0	2.9	9.0	14.0	2.4	8.7	7.0
PR20 SSP1.9-2100	Oleaje a un periodo de retorno de 20 años y nivel del escenario SSP1.9 al año 2100	0.52	3.2	9.0	12.0	3.5	9.5	16.0	3.3	9.1	14.0	2.9	13.2	332.0
PR100 SSP8.5-2100	Oleaje a un periodo de retorno de 100 años y nivel del escenario SSP8.5 al año 2100	0.90	3.6	12.0	12.0	3.9	14.0	16.0	3.7	14.0	14.0	3.5	14.0	332.0

En la Figura 19 se observa los valores de la altura de la ola y periodo asociado al pico espectral del proceso de validación. Los resultados sugieren una sobreestimación en los valores modelados, ya que se observan valores del coeficiente de determinación (R^2) de 0.67, con un sesgo de 0.19 y un Error Cuadrático Medio de 0.05 m

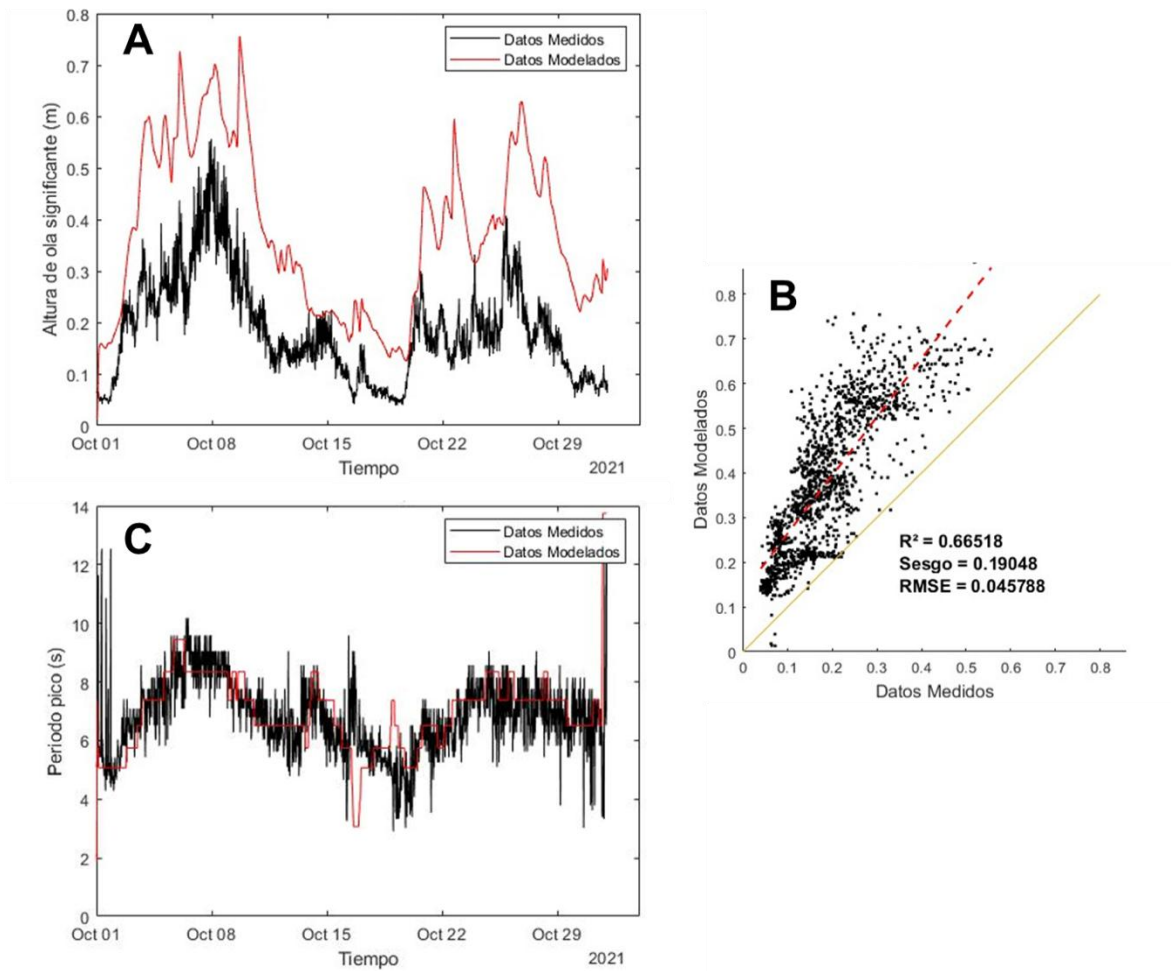


Figura 19. Validación de la modelación de oleaje. A) Comparación de la altura de la ola. B) Dispersión entre datos medidos vs. modelados de altura de ola. C) Comparación del periodo pico.

Con el modelo calibrado y validado se procedió a obtener los resultados del modelo SWAN de acuerdo con los casos mencionados (Figura 20). Los campos finales de oleaje evidencian un incremento de la altura de la ola con cada escenario y la influencia del fondo marino en la dispersión de la energía. Además, se observa que, aunque el oleaje se propague con una

dirección predominante N y NNE, en el área de estudio la dirección del oleaje gira para llegar a la costa con en sentido NW y NNW (en todos los casos). De acuerdo con Orejuela (2020) y Gob.ANT *et al.* (2021) el oleaje cerca a Arboletes hace un giro gradual por el efecto del fondo, generando una dirección predominante del NNW y NW.

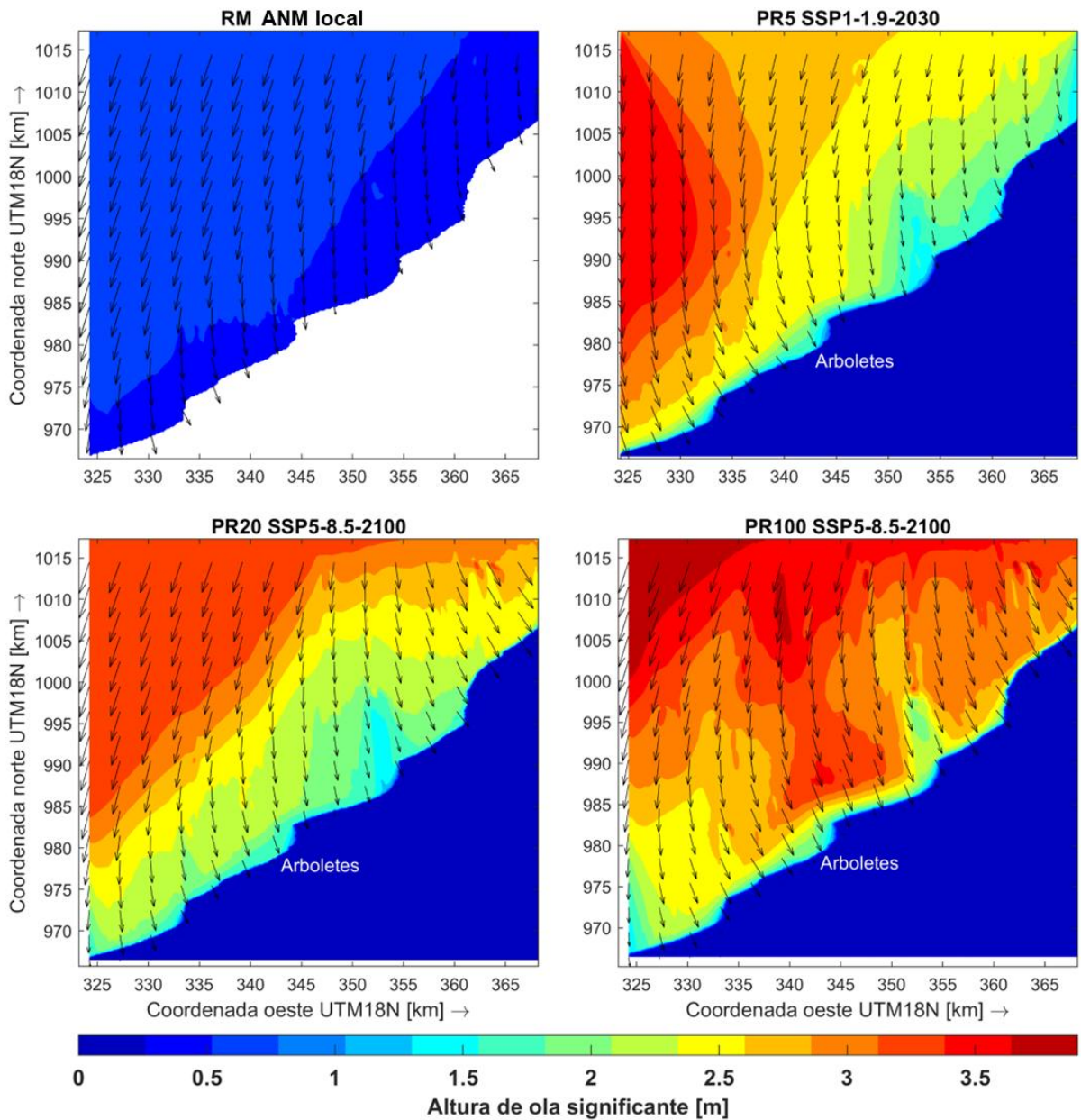


Figura 20. Altura de ola significativa resultante del modelo SWAN para cada uno de los cuatro casos.

5.1.1.3.3. Determinación del oleaje y el run-up máximo en la costa

Los campos promedios de oleaje en los últimos 15 minutos de modelación se presentan en la Figura 21. Estos campos muestran un comportamiento similar al de las salidas de SWAN, resaltando el efecto de refracción y disipación que genera en la zona de Puerto Rey el enrocado ubicado al frente de este lugar. Se evidencian alturas de ola menores de 0.5 m, con una mayor incidencia en la zona urbana de Arboletes y el sector de río Hobo.

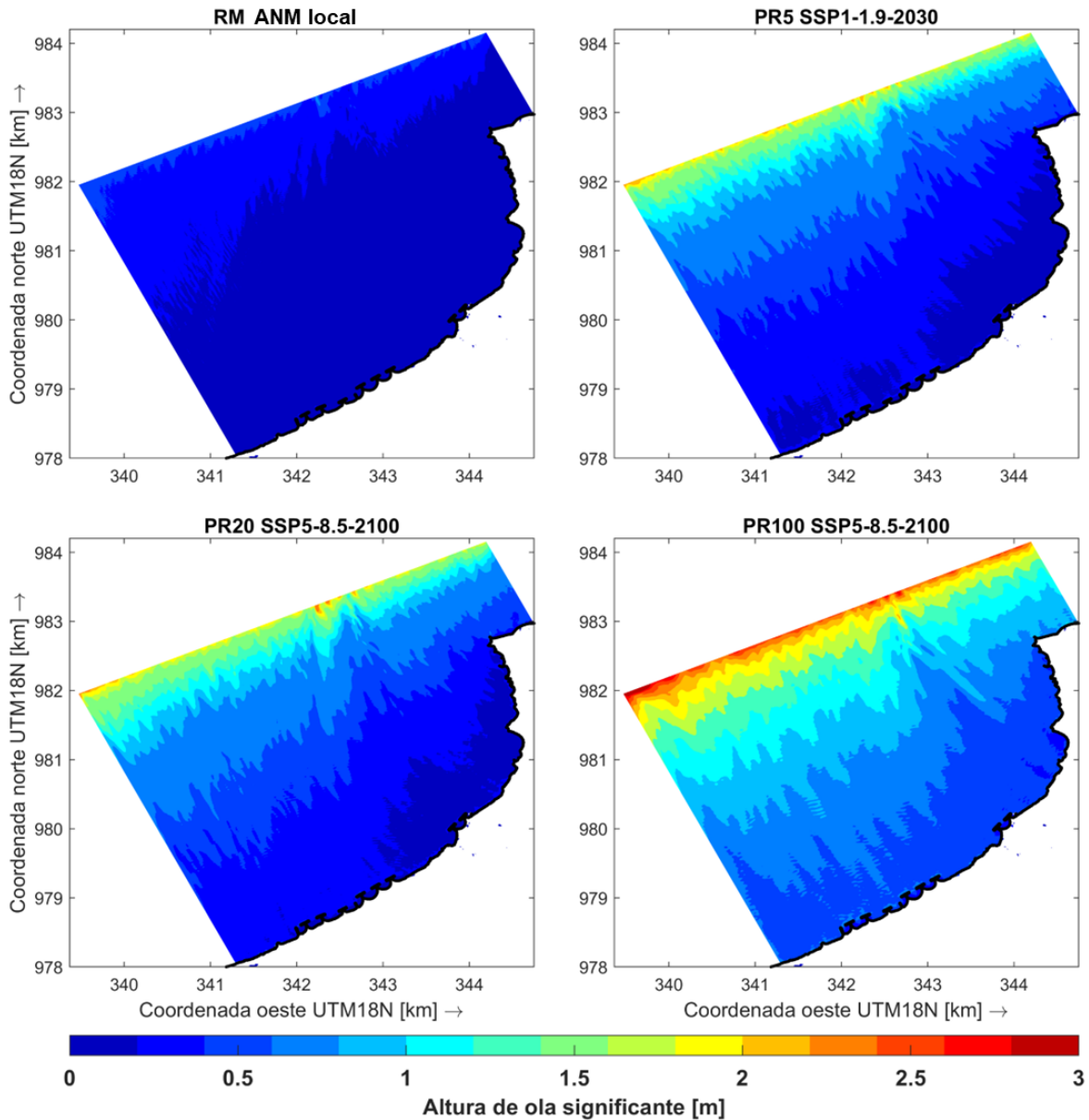


Figura 21. Altura de ola significativa resultante del modelo SWASH para cada uno de los casos mencionados.

Con base en los resultados conjuntos de SWAN y SWASH se determinó la amenaza por altura de ola para cada caso (Figura 22). En general, las zonas con mayor amenaza por altura de ola se concentran en la zona de Punta Rey, los acantilados de río Hobo y sobre las obras de protección del casco urbano de Arboletes. Los dos primeros casos no presentan una amenaza alta por altura de ola, sin embargo, en el escenario más extremo el 20 % (2.4 km) y 33 % (4 km) de la línea de costa presentan riesgo alto y medio.

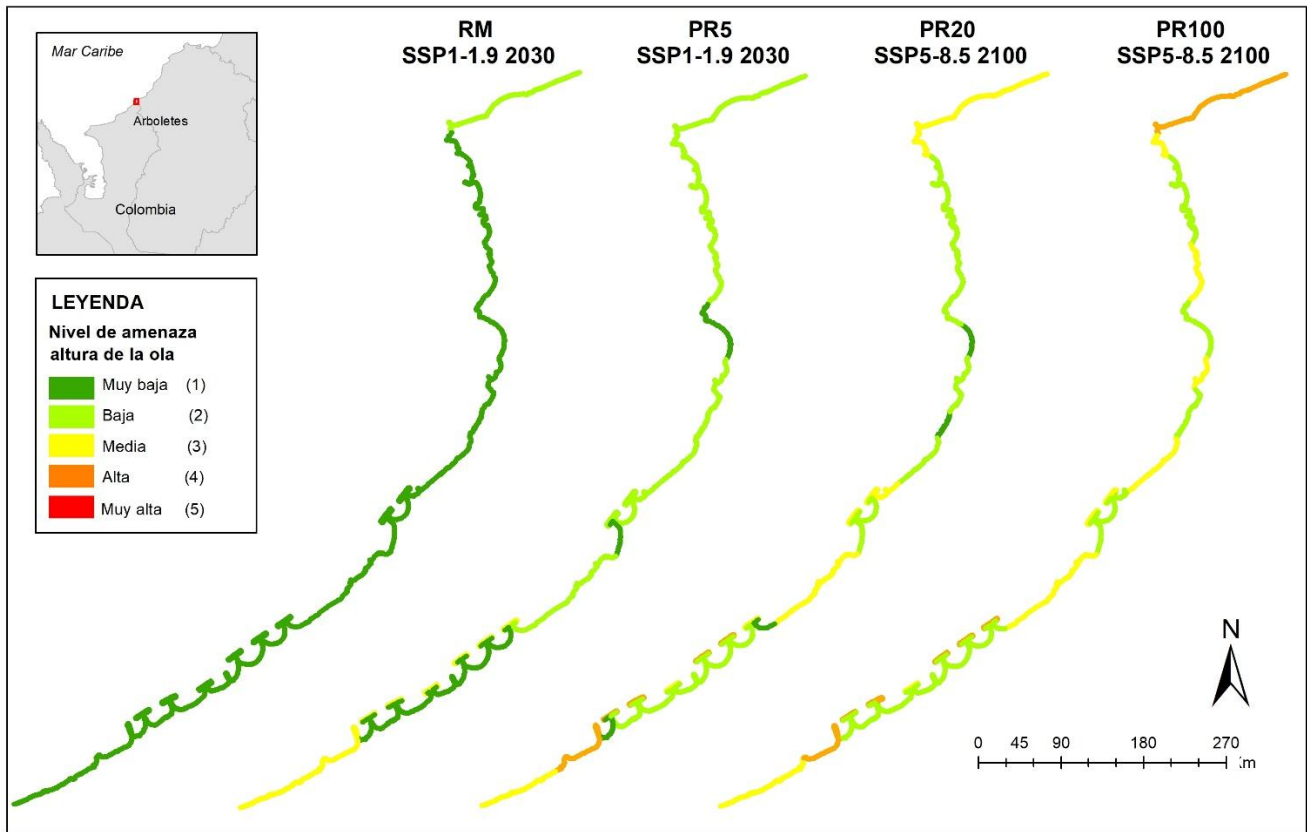


Figura 22. Amenaza por el criterio de altura de ola.

5.1.1.4. Geomorfología

De acuerdo con la clasificación establecida, la amenaza por geomorfología sugiere que el 5 % (640 m) de la línea de costa presenta amenaza muy alta, el 18 % (2.2 km) amenaza alta y el 74 % (9 km) amenaza media (Figura 23). Las zonas con amenaza muy alta están aledañas a la desembocadura de los ríos Volcán y Hobo, y la línea de costa con amenaza alta

corresponde principalmente a los acantilados de menor altura ubicados en la zona de Punta Rey y Minuto de Dios.

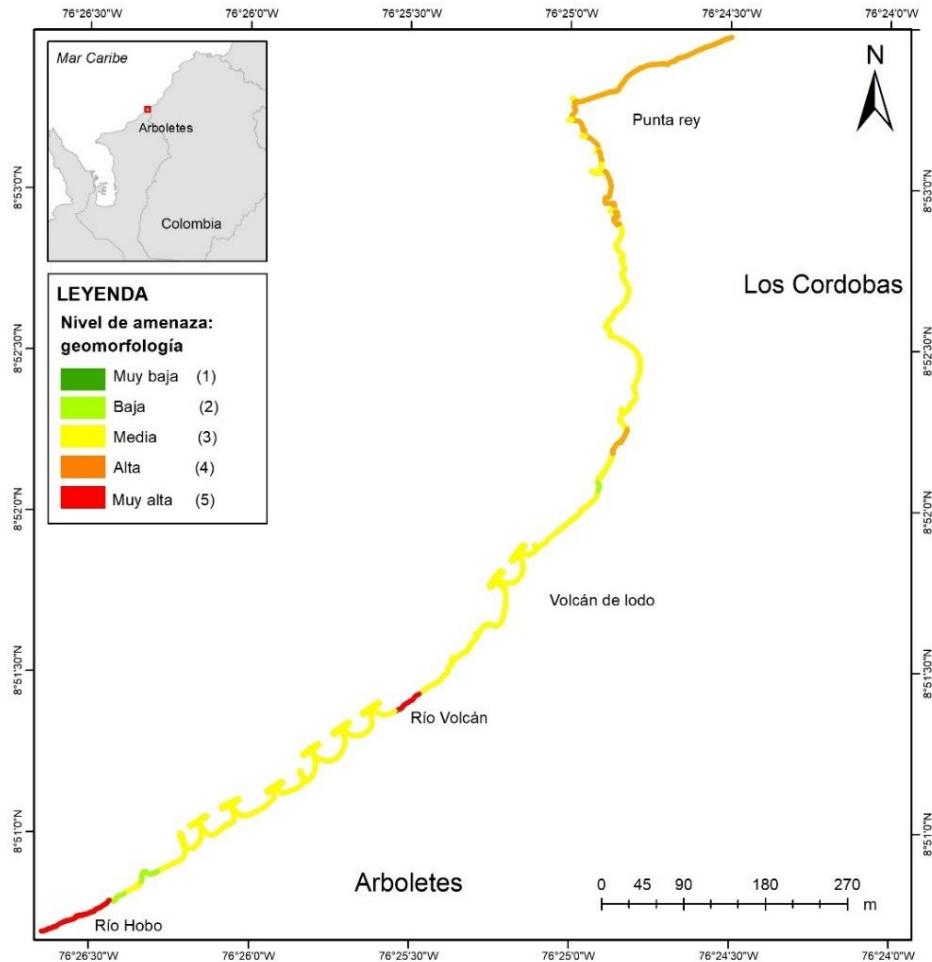


Figura 23. Amenaza por el criterio de geomorfología.

5.1.1.5. Protección de la línea de costa

La amenaza por el nivel de protección de la línea de costa refleja un alto porcentaje de zonas con amenaza muy alta (26 %, 3.2 km) debido a la ausencia de playas y obras, así mismo, evidencia un 19 % (2.3 km) de zonas con amenaza alta, y 29 % (3.5 km) con amenaza media. Es de notar que el nivel de amenaza bajo se presentan en lugares con rompeolas de la zona urbana, las obras laterales de Punta Rey y las obras verdes (en proceso de construcción) ubicadas al margen derecho de río Hobo (Figura 24).

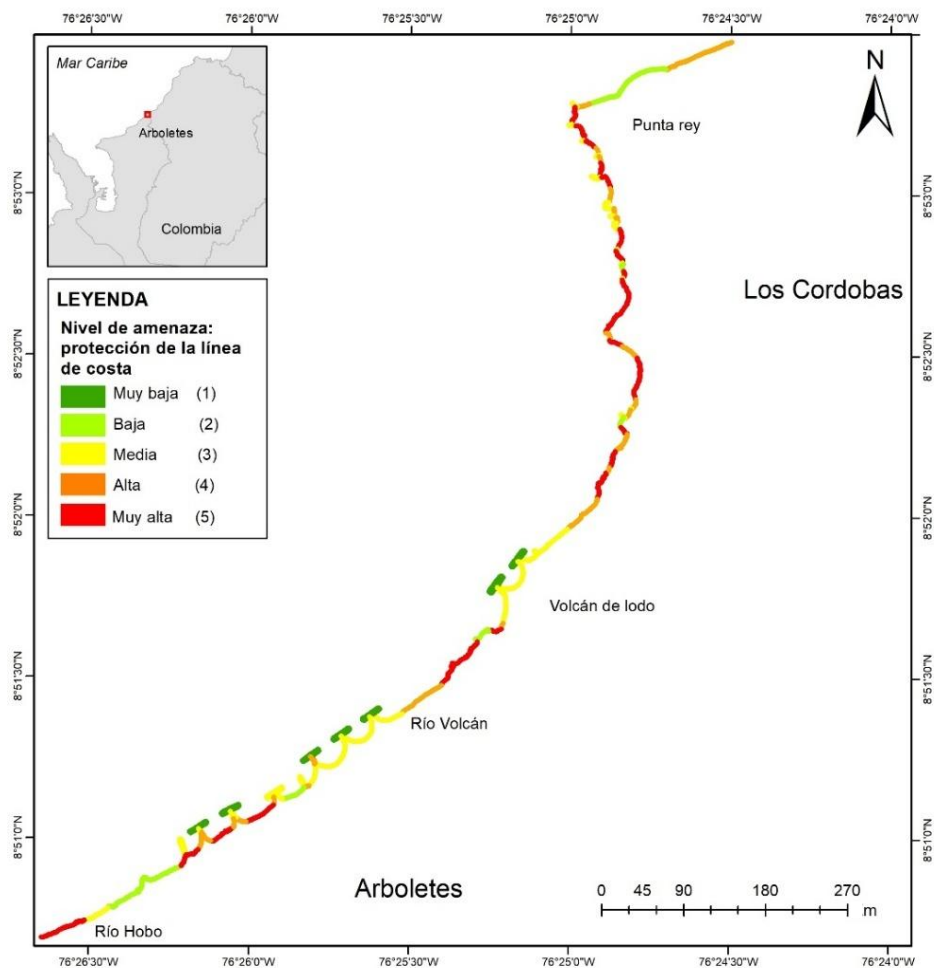


Figura 24. Amenaza por el criterio de protección de la línea de costa.

5.1.2. Cuantificación de la amenaza por erosión costera

Los resultados de la amenaza por erosión costera para los escenarios RM ANM local y PR100 SSP5-8.5 2100 se observan en la Figura 25. Los demás escenarios se pueden consultar en el Anexo E. Para el escenario del régimen medio (RM ANM local) se observa que el 30 % (3.7 km) de la línea de costa presenta una amenaza alta por erosión costera y 52 % (6.2 km) con amenaza media. En el escenario más extremo (PR100 SSP5-8.5 2100) las zonas con amenaza muy alta corresponden a Punta Rey y río Hobo con un porcentaje del 8 % (1 km) de la línea de costa, así mismo, el 44 % de la línea de costa (5.3 km) presenta amenaza alta y el 43 % (5.2 km) amenaza media.

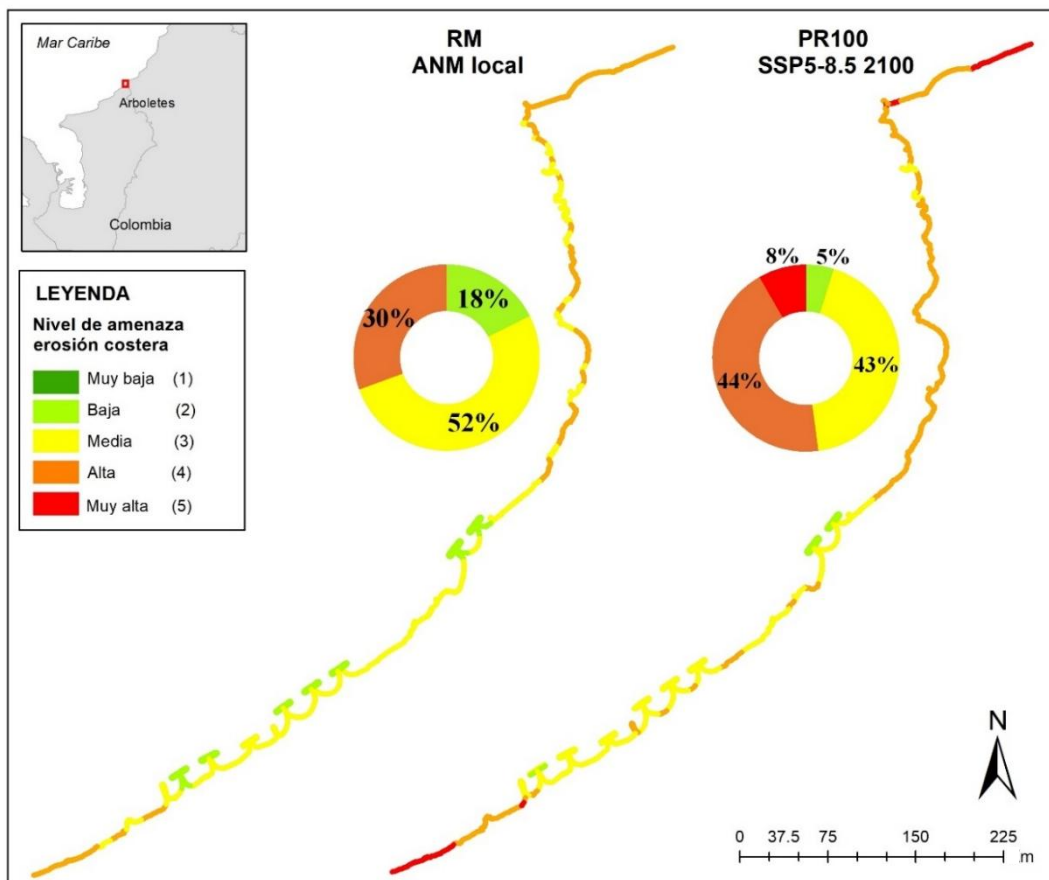


Figura 25. Amenaza por erosión costera en el sector Punta Rey - río Hobo para los escenarios RM ANM local y PR100 SSP5-8.5 2100.

5.1.3. Cuantificación de la amenaza por inundación costera

Los resultados obtenidos con el modelo SWASH permitieron clasificar las zonas inundadas y no inundadas en función del nivel de amenaza (Figura 26). Los resultados de los escenarios RM ANM local y PR100 SSP5-8.5 2100, sugieren que en el escenario más probable el 0.5 % (0.04 km²) del área presenta una amenaza alta por inundación costera, correspondiente principalmente a las zonas de las desembocaduras de los ríos, la zona de playas en el casco urbano de Arboletes y Punta Rey. Por otro lado, el 99.5 % (8.1 km²) tiene un nivel de amenaza bajo, esto se asocia a la altura de la terraza marina (promedio 6 m).

Adicionalmente, en la Figura 26 se muestra el nivel de amenaza para el escenario más extremo. Los resultados sugieren un nivel de amenaza alta por inundación costera en el 5 % (0.4 km²) del área analizada, y una amenaza baja en el 95 % (7.8 km²). Los resultados de los demás escenarios pueden ser consultados en el Anexo F.



Figura 26. Amenaza por inundación costera para los escenarios RM ANM local y PR100 SSP5-8.5 2100.

La proyección publicada por el INVEMAR en su sitio web sugiere que al año 2100, el ANM habrá afectado el 0.2% del área del municipio de Arboletes y el 0.06% del municipio de Los Córdoba (INVEMAR, 2025). Aunque el área de estudio del INVEMAR comprende todo el municipio, se evidencia que la proporción de afectación es relativamente pequeña. En contraste, Niño y Hurtado (2019) estiman que bajo un escenario de aumento de la temperatura del agua a 1.5°C, la zona urbana de Arboletes tendría una afectación del 27% por ANM.

5.2. Análisis de la vulnerabilidad

5.2.1. Recopilación, procesamiento y análisis de las variables/criterios que influyen en la vulnerabilidad

La vulnerabilidad debido a la pendiente del terreno se observa en la Figura 27. Allí se observa cómo el 3 % (0.5 km²) del área representa las zonas con vulnerabilidad muy alta, 12 % (2.1 km²) del territorio con vulnerabilidad alta y 34 % (5.7 km²) con vulnerabilidad media.

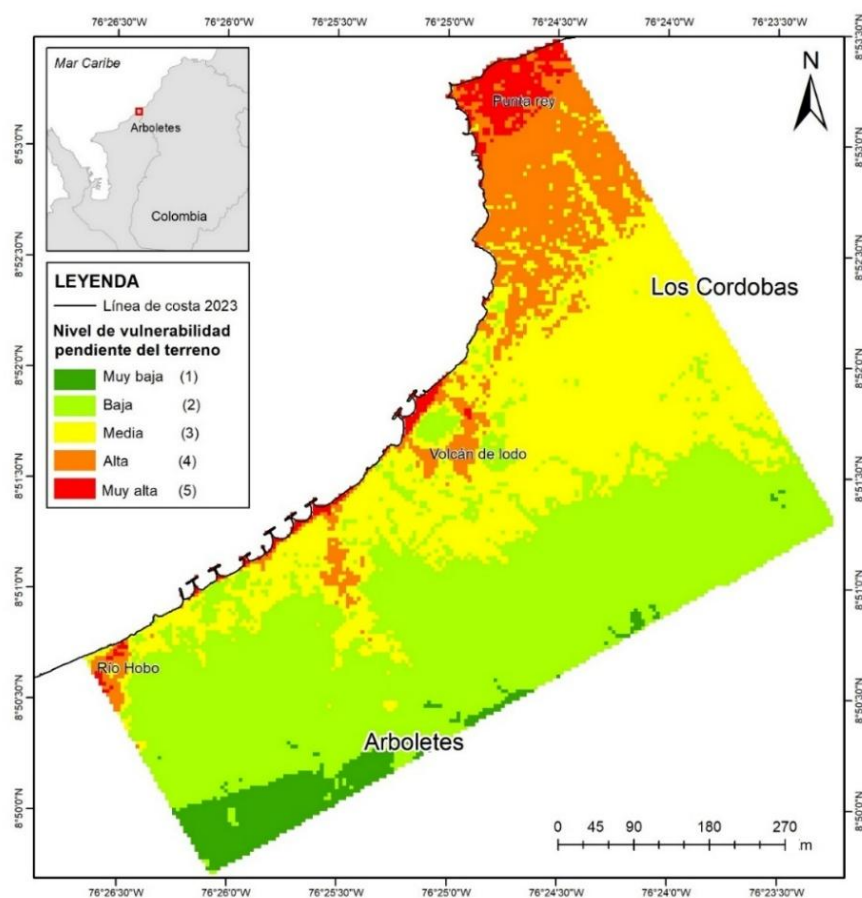


Figura 27. Vulnerabilidad por el criterio de la pendiente del terreno.

En cuanto a la vulnerabilidad por geomorfología, los resultados se presentan en la Figura 28. Estos sugieren que el 6 % (~1 km²) del área presenta un nivel de vulnerabilidad muy alta, el 2% (0.4 km²) una vulnerabilidad alta y el 30% (5.1 km²) se clasificó como vulnerabilidad media.

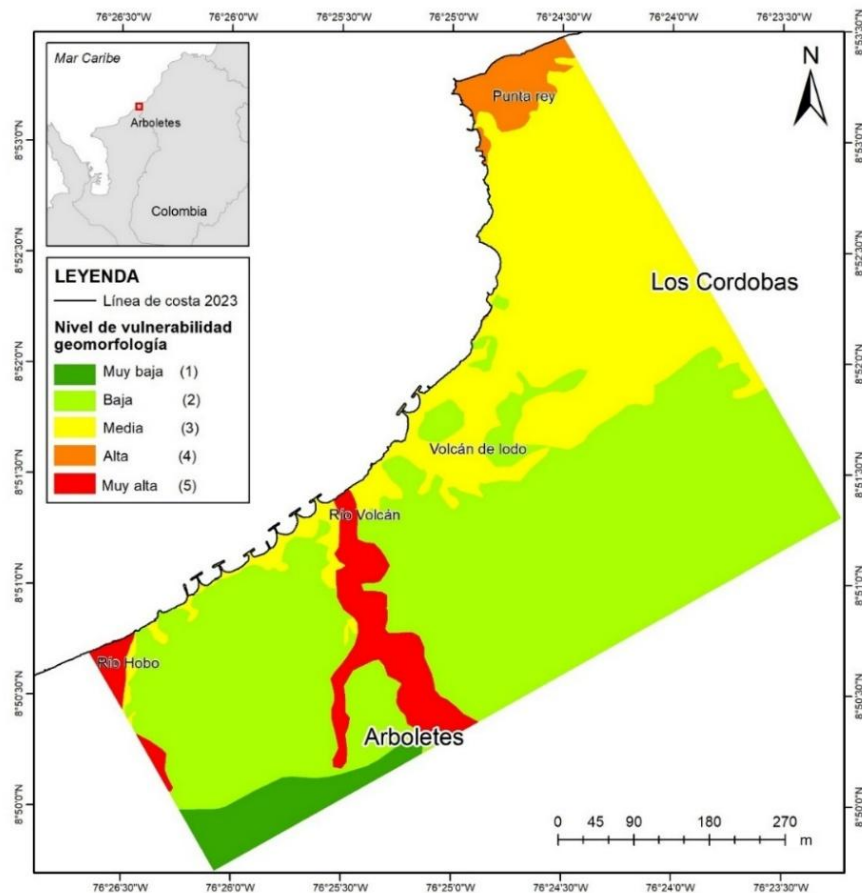


Figura 28. Vulnerabilidad por el criterio de la geomorfología.

En la Figura 29 se muestran los resultados de vulnerabilidad por distancia o proximidad a la costa. Se observa cómo el 9 % (1.6 km²) del área total analizada presenta una vulnerabilidad muy alta, el 13% (2.2 km²) muestra una vulnerabilidad alta y el 13 % una vulnerabilidad media.

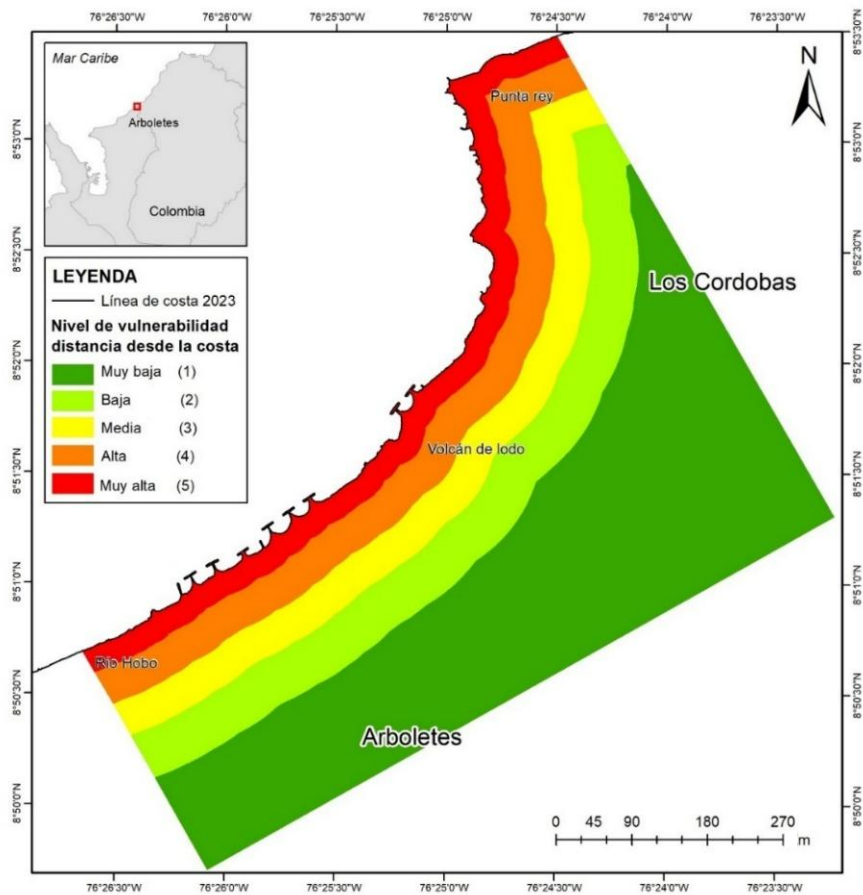


Figura 29. Vulnerabilidad por el criterio de la distancia desde la costa.

En cuanto a los criterios de vulnerabilidad socioeconómica, la densidad poblacional (Figura 30) muestra que el 4 % (0.7 km²) del área analizada se encuentra en vulnerabilidad muy alta y el 0.5% (0.08 km²) en vulnerabilidad alta. Es de notar que el territorio con la mayor vulnerabilidad por este criterio se encuentra en las zonas urbanas. Por lo tanto, como el área de estudio se encuentra mayormente la zona rural la vulnerabilidad es principalmente muy baja (94 %).

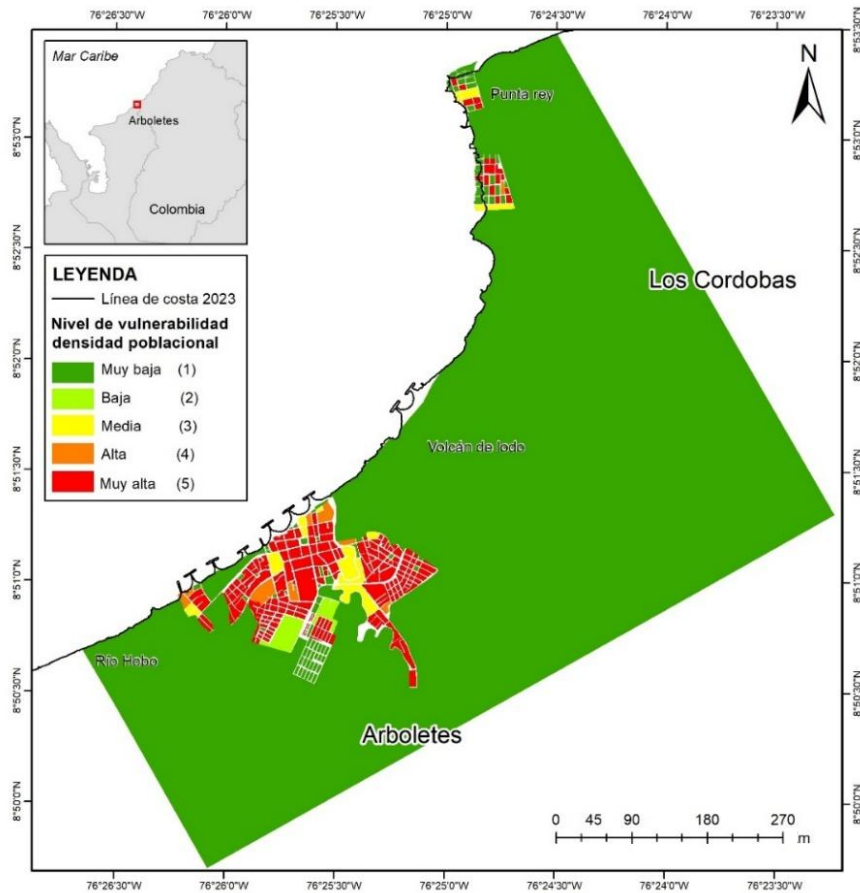


Figura 30. Vulnerabilidad del criterio de densidad poblacional.

Continuando con la vulnerabilidad socioeconómica, se hizo el cálculo con base las edades poblacionales. Se encontró que principalmente media (99.2 %), con un porcentaje de 0.2 % de área con vulnerabilidad muy alta (Figura 31).

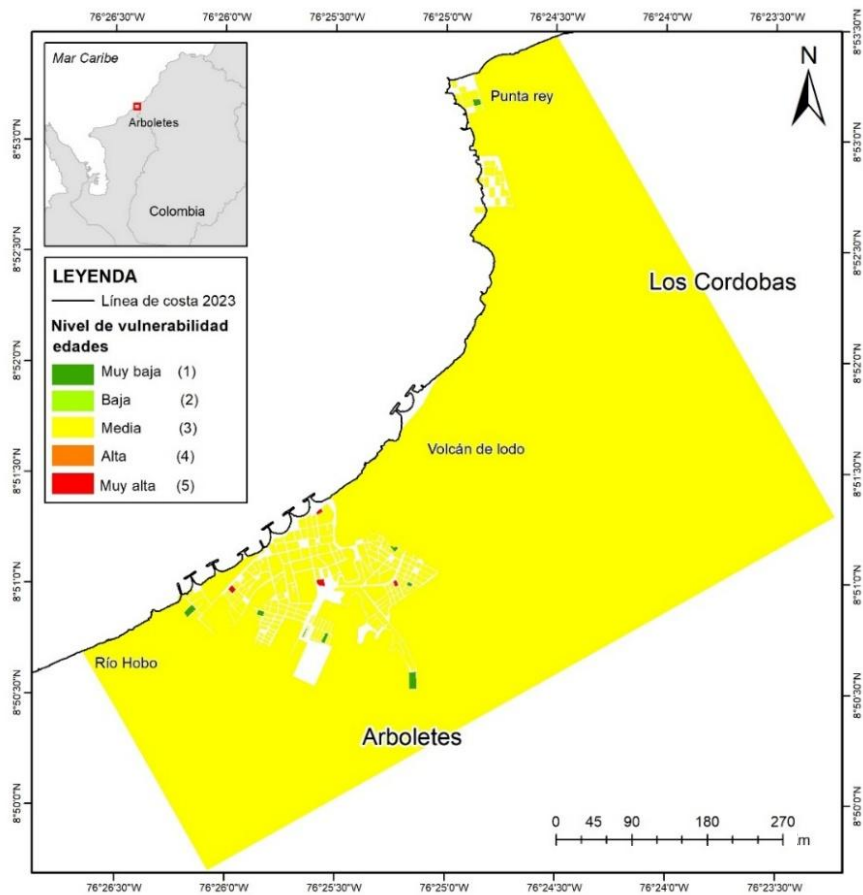


Figura 31. Vulnerabilidad del criterio de edades.

Por otro lado, el análisis de la vulnerabilidad relacionada con los estratos socioeconómicos revela que el 4.1 % del área estudiada (0.7 km²) presenta una vulnerabilidad muy alta, mientras que el 8.2 % (1.4 km²) muestra una vulnerabilidad alta. En contraste, la mayor parte del territorio, equivalente al 87.4 % (15.3 km²), se caracteriza por una vulnerabilidad baja según este criterio (Figura 32).

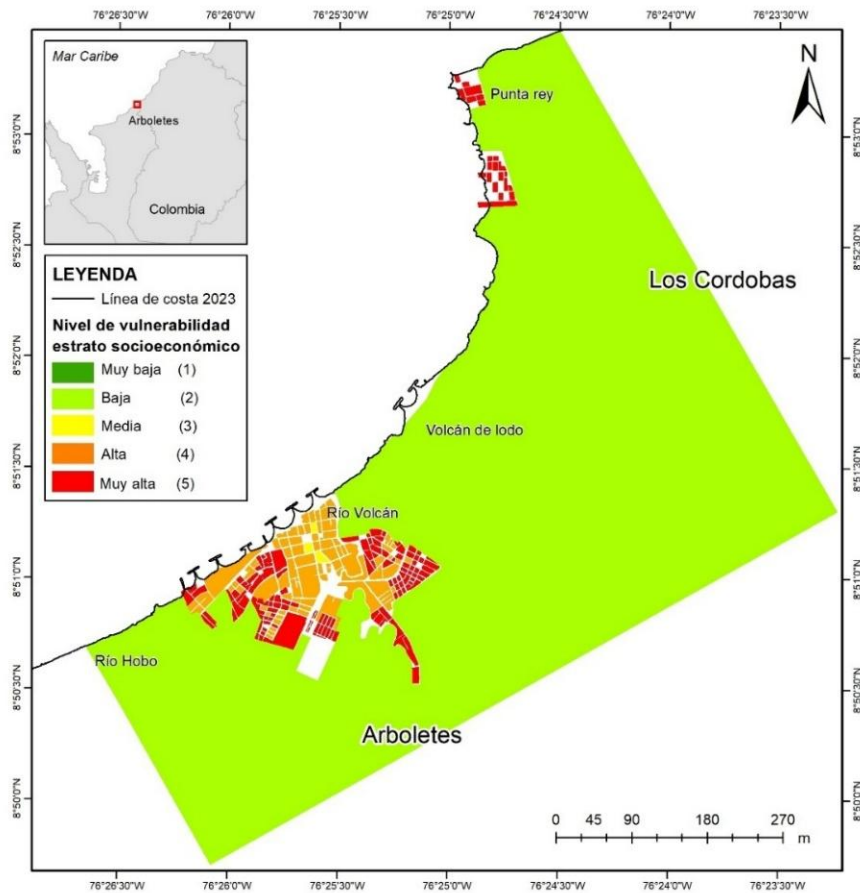


Figura 32. Vulnerabilidad del criterio de estratos socioeconómicos.

En cuanto al análisis de la vulnerabilidad por zonas con usos no residenciales, este se observa en la (Figura 33). Allí se puede evidenciar un porcentaje del 0.2 % de zonas con vulnerabilidad muy alta, 2 % de áreas con vulnerabilidad alta y 45 % (8 km²) de zonas con vulnerabilidad media.

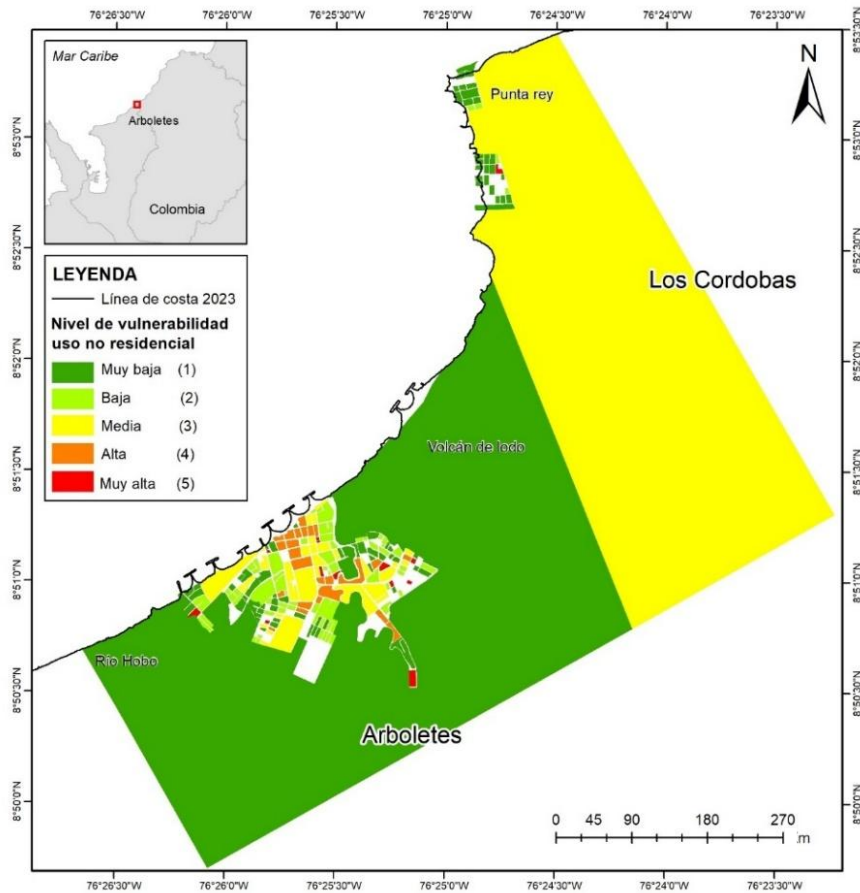


Figura 33. Vulnerabilidad por el criterio de zonas con usos no residenciales.

Finalmente, la vulnerabilidad por número de viviendas se presenta en la Figura 34. Los resultados sugieren que el 0.3 % del área de interés tiene vulnerabilidad muy alta por el número de viviendas, el 1 % presenta vulnerabilidad alta, el 2 % vulnerabilidad media y el 95 % vulnerabilidad baja.

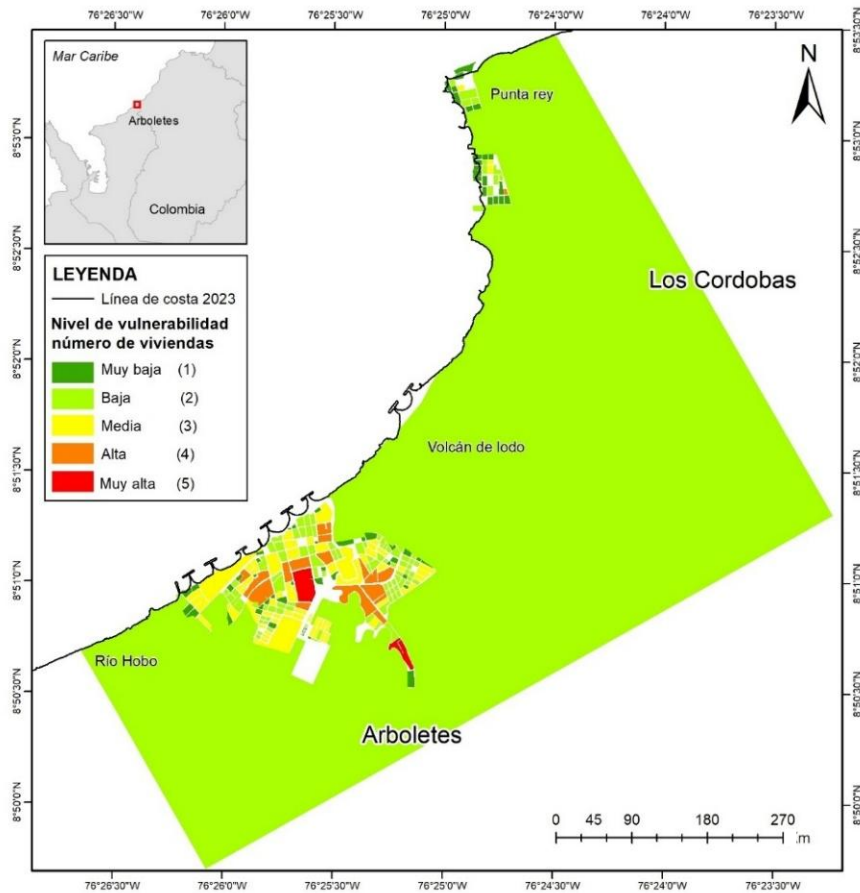


Figura 34. Vulnerabilidad por el criterio de número de viviendas.

5.2.2. Cuantificación de la vulnerabilidad física y socioeconómica

Considerando solo los criterios físicos del sector Punta Rey – río Hobo, los resultados se presentan en la Figura 35. Allí se observan valores de vulnerabilidad muy alta y alta correspondiente al 12% (2 km²) y 2% (0.3 km²) del área total, respectivamente. Mientras que los niveles de vulnerabilidad media, baja y muy baja corresponden al 28% (4.7 km²), 54% (9.1 km²) y 5% (0.9 km²) del área total, respectivamente.

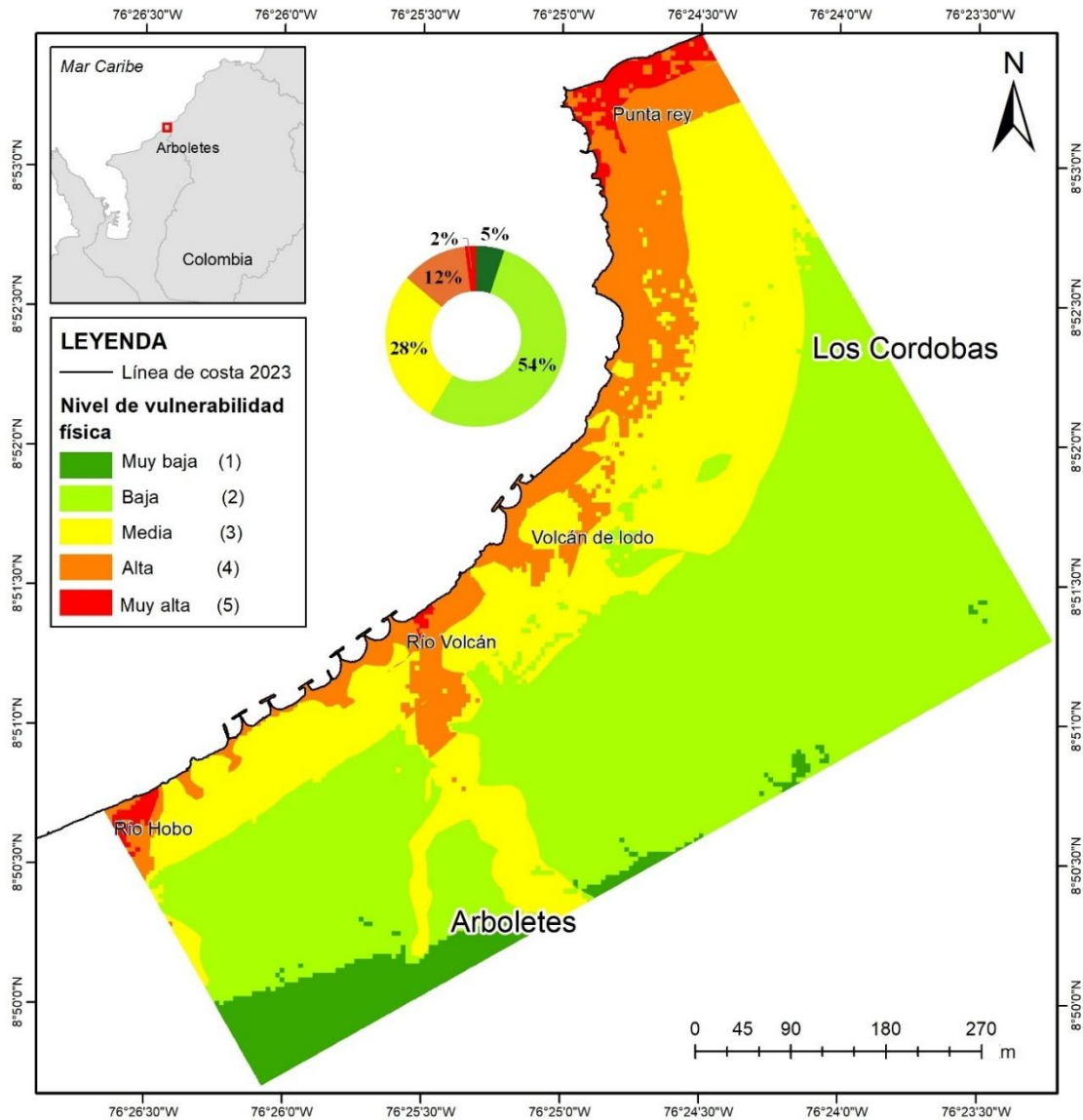


Figura 35. Vulnerabilidad física.

En la Figura 36 se presentan los resultados de la vulnerabilidad considerando los criterios socioeconómicos. Se observa cómo el 2 % (0.3 km²) del área total tiene una vulnerabilidad alta, el 4 % (0.7 km²) tiene una vulnerabilidad media, el 93% (15.4 km²) presenta una vulnerabilidad baja y el 1% (0.1 km²) tiene una vulnerabilidad muy baja.

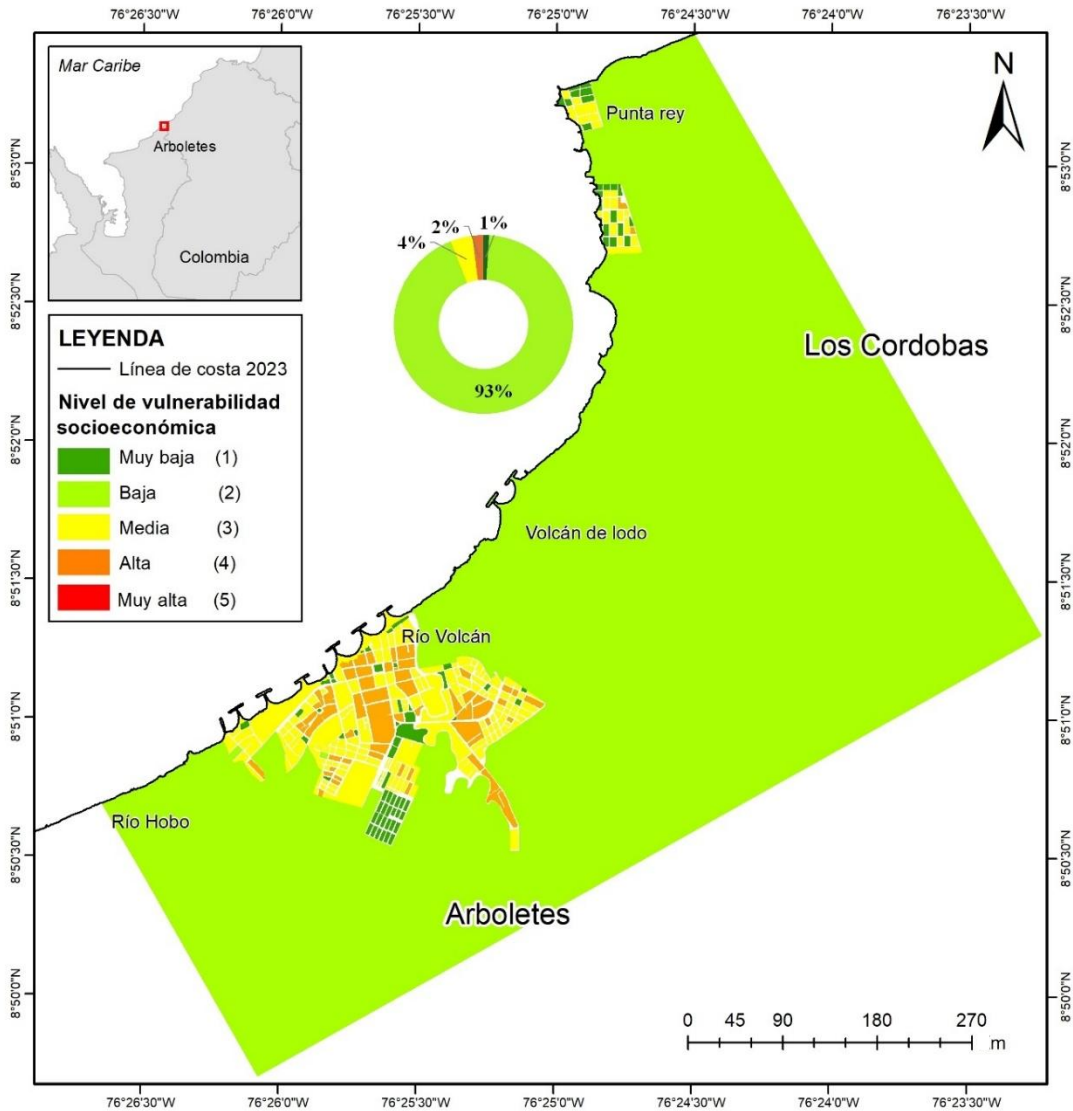


Figura 36. Vulnerabilidad socioeconómica.

5.2.3. Cuantificación de la vulnerabilidad total

Luego de integrar los criterios socioeconómicos y físicos, los resultados indican que las zonas más vulnerables se encuentran en el sector de Punta Rey, el barrio Minuto de Dios, la zona urbana de Arboletes y el área aledaña al río Hobo (Figura 37). Se evidencia como el 3 % (0.5 km²) del área tiene una vulnerabilidad alta y el 38 % (6.3 km²) corresponde a la zona con vulnerabilidad media. Es de notar, como García-Echeverría (2021) sugieren que la zona del volcán de lodo y río Hobo tienen una vulnerabilidad alta y muy alta, respectivamente, lo cual no coincide con los resultados obtenidos por las diferencias en los criterios analizados.

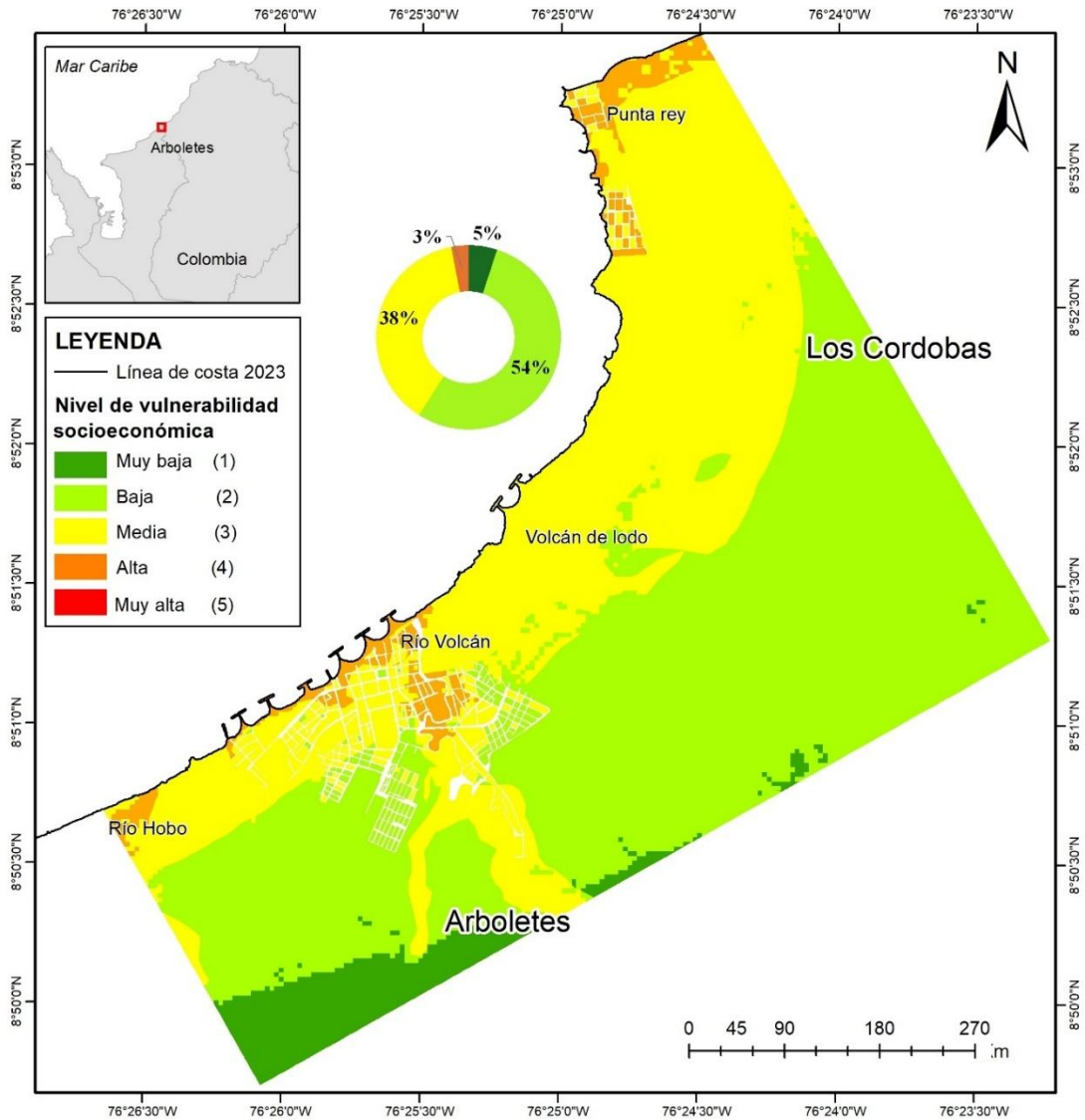


Figura 37. Vulnerabilidad total.

5.3. Cuantificación del riesgo por erosión e inundación costera

Finalmente se realizó el cálculo de riesgo. En primer lugar, se presentan los resultados del riesgo por erosión costera para los escenarios RM ANM local y PR100 SSP5-8.5 2100 (Figura 38), y los demás resultados se presentan en el Anexo G. Estos resultados sugieren que:

- ✓ El 3 % de la línea de costa (0.4 km) presenta un riesgo muy alto por erosión en el escenario más extremo (PR100 SSP5-8.5 2100).

- ✓ El 18 % de la línea de costa (2.2 km) evidencia un riesgo alto por erosión en el escenario más extremo.
- ✓ El 8 % de la línea de costa (1 km) presenta riesgo alto por erosión en el escenario más probable y el 74% riesgo medio.
- ✓ Las zonas con mayor riesgo de erosión se encuentran en los sectores de río Hobo, Punta Rey, Minuto de Dios y las playas de la zona urbana de Arboletes.

Stronkhorst *et al.* (2018) clasificaron el riesgo de erosión costera en el Caribe y el Pacífico colombiano en cuatro categorías (muy alto, alto, moderado y bajo), y determinaron que la franja costera de interés presenta un nivel de riesgo alto.

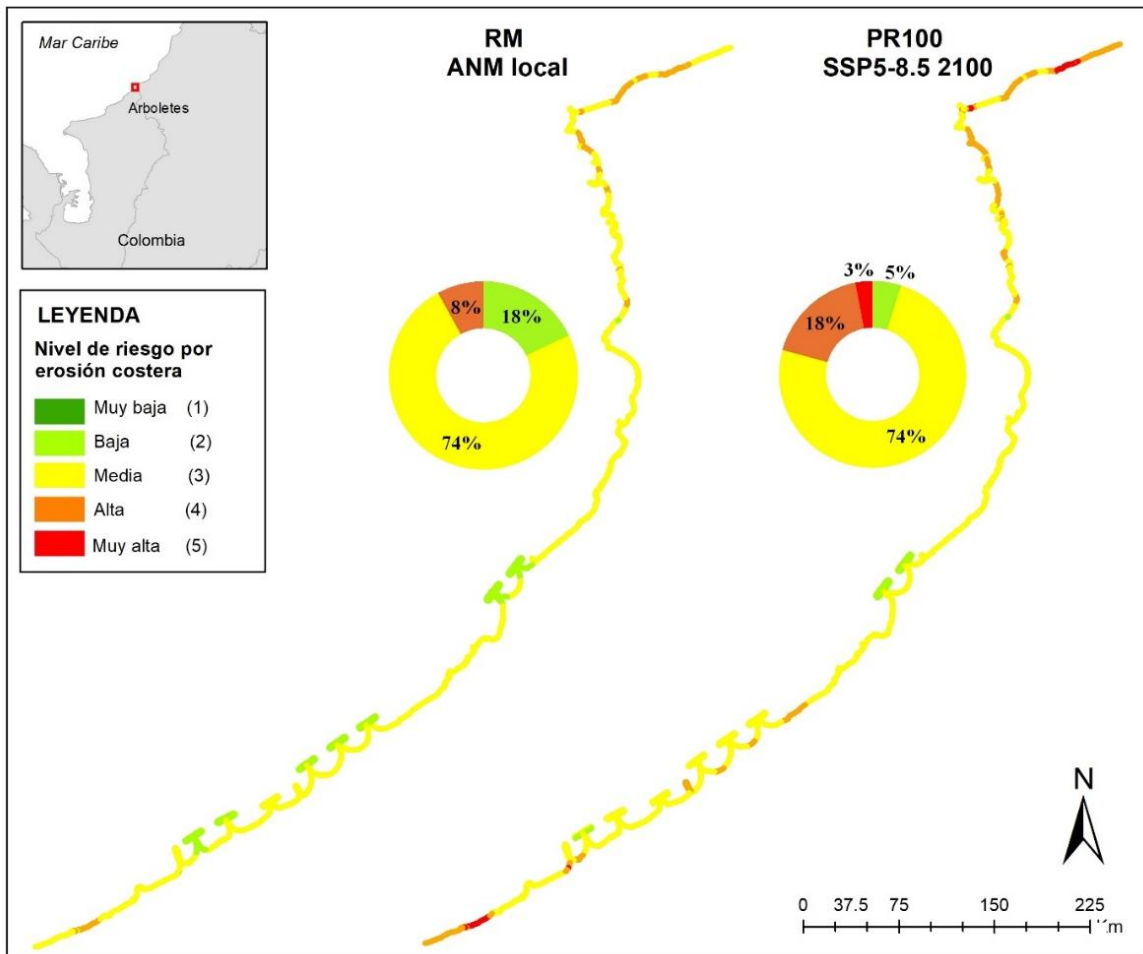


Figura 38. Riesgo por erosión costera para los escenarios RM ANM local y PR100 SSP5-8.5 2100.

Por otro lado, los resultados del riesgo por inundación costera para los escenarios RM ANM local y PR100 SSP5-8.5 2100 (Figura 39), los demás resultados se presentan en el Anexo H. Estos resultados sugieren que:

- ✓ El 1.8 % del área de estudio (0.14 km²) presenta un riesgo alto por inundación costera en el escenario más extremo (PR100 SSP5-8.5 2100).
- ✓ El 3.1 % del área de estudio (0.23 km²) evidencia un riesgo medio por inundación costera en el escenario más extremo.
- ✓ El 0.3 % del área de estudio (0.02 km²) presenta riesgo alto por inundación costera en el escenario más probable y el 0.3% riesgo medio.
- ✓ Las zonas con mayor riesgo de inundación están situadas en los sectores de río Hobo, Punta Rey, Minuto de Dios y las playas de la zona urbana de Arboletes y alrededor del volcán de lodo.

Las zonas aledañas a los cauces de los ríos Volcán y Hobo y las terrazas costeras de menor altura, son las zonas con el mayor riesgo por inundación. Lo anterior, es comparable con la zonificación del riesgo por inundación en suelo urbano y de expansión que muestra Alcaldía de Arboletes (2022), la cual fue adaptada del estudio del CONSORCIO ICARO-URABÁ y CORPOURABÁ: “Zonificación de amenazas y riesgos por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el área urbana del municipio de Arboletes” y realizada mediante un modelo estático.

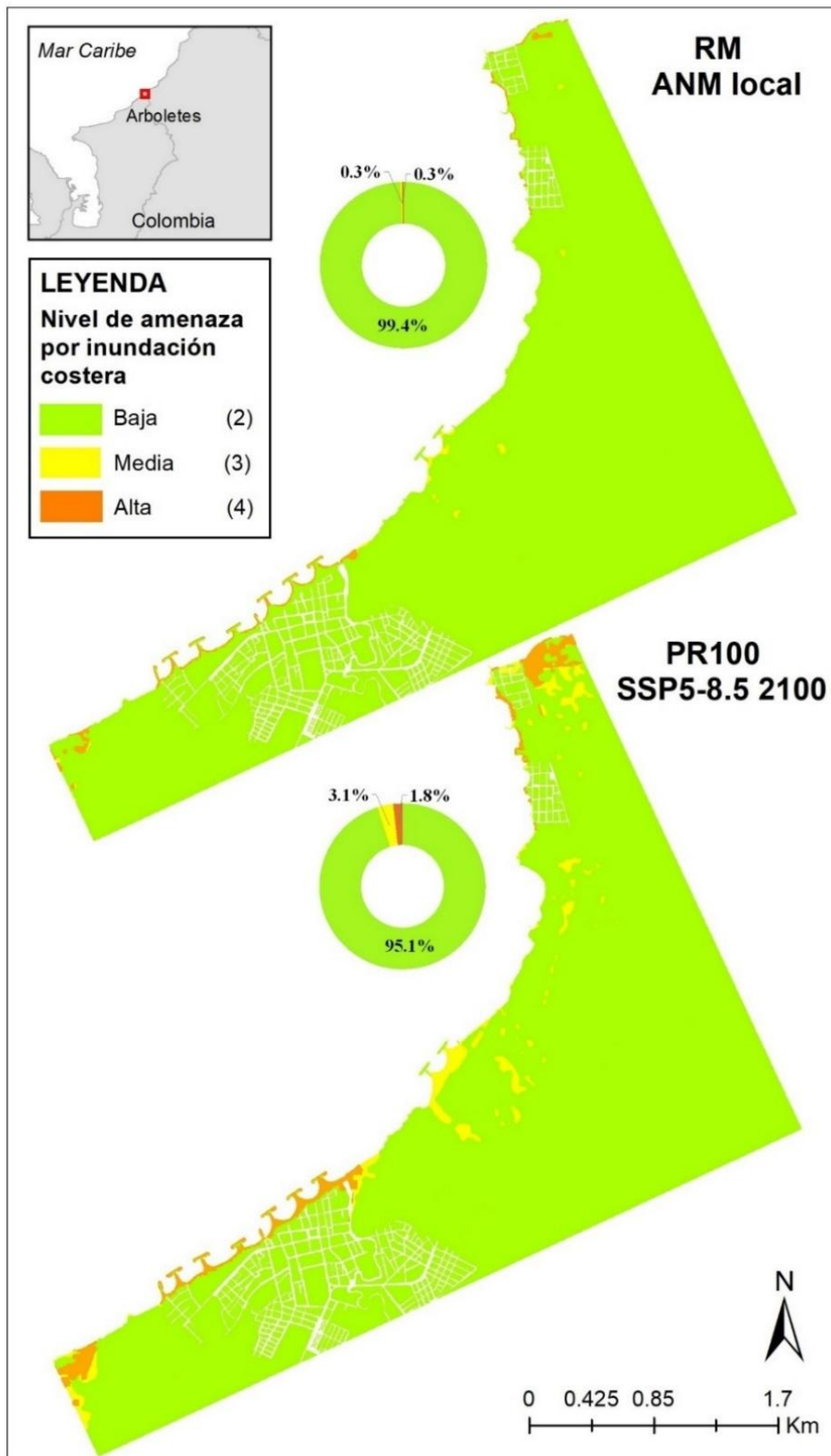


Figura 39. Riesgo por inundación costera para los escenarios RM ANM local y PR100 SSP5-8.5 2100.

6. Conclusiones

Los resultados de este trabajo indican que la evaluación de variables hidrodinámicas como, oleaje, nivel del mar, run-up horizontal máximo, viento, geomorfología y evolución temporal de la línea de costa, es una herramienta útil para la determinación del riesgo por erosión e inundación costera en el marco del cambio climático.

Considerando los escenarios analizados, la mayor parte de la línea de costa analizada presenta un riesgo medio por erosión (~ 75%, 9.1 km). Sin embargo, los sectores de río Hobo, Punta Rey, Minuto de Dios y las playas urbanas de Arboletes destacan por registrar un riesgo alto. De manera similar, la mayor parte del área evidencia un riesgo bajo por inundación costera (~ 97%, 7.6 km²). Es de notar, que se identificaron afectaciones relevantes en los mismos sectores mencionados anteriormente, incluyendo además la zona cercana al volcán de lodo.

Para el escenario más extremo de cambio climático (PR100 SSP5-8.5, año 2100), los resultados indican que aproximadamente el 3 % y el 18 % de la línea de costa presentarían un nivel de riesgo muy alto y alto por erosión costera, respectivamente. En cuanto a la inundación costera, este mismo escenario proyecta solo un riesgo alto en el 1.8 % del área de estudio y un riesgo medio en el 3.1%; las zonas con mayor riesgo de inundación están asociadas al cauce de ríos o terrazas marinas menores a 3 metros.

En cuanto a la amenaza, se determinó que el 44 % de la línea de costa se encuentra bajo amenaza alta por erosión, mientras que un 8 % presenta amenaza muy alta; y el 5 % del área analizada evidencia amenaza alta por inundación costera. En términos de vulnerabilidad integrando variables físicas y socioeconómicas, los resultados muestran que el 3 % del área tiene una vulnerabilidad alta, y el 38 %, media. Las zonas con mayor nivel de vulnerabilidad son Punta Rey, algunas manzanas de Minuto de Dios y de la zona urbana de Arboles, así como el territorio que se ubicado en las llanuras de inundación de los ríos Volcán y Hobo.

Los hallazgos de esta investigación constituyen un insumo valioso para los procesos de toma de decisiones por parte de entidades gubernamentales y autoridades locales. Además, pueden

ser incorporados en estrategias de gestión del riesgo costero, ordenamiento territorial y prevención de desastres. Se espera también que la metodología aplicada sirva como base para el desarrollo de futuras investigaciones en contextos similares.

7. Recomendaciones

Se recomienda para trabajos futuros:

- Considerar las características del sustrato dentro de la clasificación de la geomorfología.
- Incluir dentro de los criterios de erosión información de la precipitación, la dirección del oleaje y las corrientes litorales, ya que son variables que influyen en gran medida en la erosión del área de estudio.

Referencias bibliográficas

- Alcaldía de Arboletes. (2000). Plan Básico de Ordenamiento Territorial 1990 [Datos de cartografía]. Recuperado de: <https://www.colombiaot.gov.co/pot/buscador.html?&u=05051&etapa=Diagn%C3%B3stico&representacion=Cartograf%C3%ADa&tipo=Dato&tags=Geogr%C3%A1fica&dimension=&componente=&year=&pot=>
- Alcaldía de Arboletes. (2022). Mapas de la cartografía del Plan Básico de Ordenamiento Territorial [Conjunto de datos]. <https://www.arboletes-antioquia.gov.co/pbot/acuerdo-003-de-2022>
- Antolínez, J.A. A., A. B. Murray, F.J. Méndez, L. J. Moore, G. Farley, and J. Wood (2018). Downscaling changing coastlines in a changing climate: The hybrid approach, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(2), 229-251.
- Boruff, B. J., Emrich, C., & Cutter, S. L. (2005). Erosion hazard vulnerability of US coastal counties. *Journal of Coastal research*, 21(5), 932-942.
- Carreño-Duarte, J. D. (2022). Estudio del comportamiento del oleaje generado por eventos extremos en su paso en cercanías a la Barra de Salamanca. [Tesis de pregrado].
- Clarindo, G. (2014). Evaluación de riesgo costero por inundación aplicado a la playa de Boca Barranco, isla de Gran Canaria, España (tesis de maestría). Universidad de las Palmas de Gran Canaria, España.
- Coca-Domínguez, O., y Ricaurte-Villota, C. (2019). Validación del análisis de peligrosidad y vulnerabilidad de la erosión costera en la costa caribe y pacífica de Colombia. *Revista de Ciencias e Ingeniería Marinas*, 7 (8), 260.

Congreso de la República de Colombia (Abril 24, 2012). Ley 1523. “Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres y se dictan otras disposiciones.

Correa, I. D. y Paniagua-Arroyave, J. (2016). Litoral Arboletes-Punta Rey, Costa Caribe Sur. En: Hermelin, M. (eds) Paisajes y accidentes geográficos de Colombia. Paisajes geomorfológicos mundiales. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11800-0_4

Correa, I. D., y Vernet, G. (2004). INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE LA EROSIÓN LITORAL EN URABÁ (SECTOR ARBOLETES-TURBO) COSTA CARIBE COLOMBIANA. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR, 33(1), 07-28.

Correa, I. D., Ríos, A., González, D., Toro, M., Ojeda, G., y Restrepo, I. (2007). Erosión litoral entre Arboletes y Punta San Bernardo, costa caribe colombiana. Boletín de Geología, 29(2), 115-129.

Daniel, E., y Abkowitz, M. (2005). Predicción de la erosión de las playas inducida por tormentas en las islas pequeñas del Caribe. Gestión costera, 33 (1), 53-69.

da Silva, P.G., Coco, G., Garnier, R. y Klein, A.H. (2020). Sobre la predicción de la formación de olas, la formación de olas y la resaca en playas. Earth-Science Reviews, 204, 103148.

Dirección General Marítima [DIMAR]. (2023). Serie de datos de nivel del mar obtenidos mediante estación mareográfica automática ubicada en Sapzurro, Colombia. [Indique el subconjunto utilizado]. Centro Colombiano de Datos Oceanográficos https://doi.org/10.26640/cecoldo.dataset_00124

- Escorcía Pinto, L. D. (2023). Estimación de la susceptibilidad costera ante el ascenso del nivel del mar en el departamento del Atlántico, empleando el índice de vulnerabilidad costera (CVI). [Tesis de Pregrado]
- Escoto-Castillo, A., Sánchez-Peña, L., y Gachuz-Delgado, S. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios demográficos y urbanos*, 32(3), 669-693.
- García-Echavarría, L. M. (2021). Vulnerabilidad costera en cuatro sitios del suroeste del Caribe colombiano ante el ascenso del nivel del mar [Tesis Maestría].
- García-Echavarría, L. M., Alcántara-Carrió, J., y Vélez, A. J. (2022). Vulnerabilidad costera ante el ascenso del nivel del mar en el suroccidente del Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 51(2), 9-28.
- Gobernación de Antioquia, Universidad de Antioquia, Universidad Nacional y Universidad del Norte (2021). *Erosión Costera en el Litoral Antioqueño. Compilación de resultados. (Formatos impreso y digital). © Medellín / Antioquia / Colombia. Litografía Grafiservicios S.A.S*
- González-Velandia, J. C. (2014). La gestión del riesgo de desastres en las inundaciones de Colombia: una mirada crítica. Trabajo de grado especialización. Universidad Católica de Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/2128>
- Grisales Loaiza, S. (2021). Propuesta de instrumento para recolección de datos en campo para el monitoreo de obras de protección costera estructurales en el sector Turbo–Arboletes, Antioquia (Caribe colombiano).
- Hammar-Klose, E. S., y Thieler, E. R. (2001). Coastal vulnerability to sea-level rise: A preliminary database for the US Atlantic, Pacific, and Gulf of Mexico coasts. US Geological Survey.

Himmelstoss, E.A., Farris, A.S., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., Ergul, Ayhan, Zhang, Ouya, Zichichi, J.L., y Thiel, E. R. (2018), Digital Shoreline Analysis System (version 5.0): U.S. Geological Survey software release, <https://code.usgs.gov/cch/dsas>.

Hinestroza Mena, K. M. (2020). Evaluación de riesgos litorales por medio de métodos multicriterio: caso específico Playas Urbanas y Playa la Martina, Distrito de Turbo, golfo de Urabá, Caribe colombiano. [Tesis Maestría].

Hurtado, J. H. (2019). Ciudades costeras resilientes: pautas para el diagnóstico de resiliencia al incremento en el nivel del mar en ciudades de la Costa Caribe Colombiana.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2014). Base de datos vectorial básica Colombia Escala 1:500.000 [Conjunto de datos vectorial]. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-82.43784778320864,-0.17644239911865092,-71.23179309571162,9.90326984502256,4686&b=igac&u=0&t=23&servicio=206>

INVEMAR. (2003). Programa holandés de asistencia para estudios en 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 (caribe, insular y pacífico). resumen ejecutivo. Technical report, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives De Andrés. Vinculado al Ministerio del Medio Ambiente, Santa Marta-Colombia.

INVEMAR. (2017). TM-COLOMBIA-Geomorfología-2009-100.000 [Conjunto de datos vectorial]. Caribbean Marine Atlas. https://www.caribbeanmarineatlas.net/layers/cma_geonode_data:geonode:geomorfologia

- INVEMAR e IDEAM. (2017). Elaboración del Análisis de Vulnerabilidad Marino Costera e Insular ante el Cambio Climático para el País. Informe Técnico Final– 001. Contrato PNUD No. 0000040357. Santa Marta. 256 p.
- INVEMAR. (2022). Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia, 2021. Serie de Publicaciones Periódicas No. 3. Santa Marta. 254 p
- INVEMAR. (2025). INVEMAR - Sitio web del cambio climático para mares y costas de Colombia. <https://climares.invemar.org.co/ascenso-del-nivel-del-mar>
- IPCC. (2021a). Comunicado de prensa del IPCC. IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release-Final_es.pdf
- IPCC. (2021b). Resumen para responsables de políticas. En: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (editores)]. Cambridge University Press.
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Khodkar, G. (2019). Evaluación de la capacidad de carga de la playa: estudio de caso para el uso sostenible de las playas de Kusadasi (tesis de maestría, Universidad Técnica de Medio Oriente).

- Llorente Ibáñez, A. J. (2020). Análisis de la evolución de la línea de costa en la región de Urabá (Antioquia), Los Córdoba y Puerto Escondido (Córdoba) entre 1990 y 2019.
- Londoño, G.S. y Murillo, E.M. (2018). Variabilidad espacio-temporal del nivel del mar en la costa del caribe colombiana [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional de la Universidad de Antioquia. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/>
- López Camargo, E., y Dussan Tapias, K. T. (2023). Detección de cambios en la línea de costa en el municipio de Arboletes para los años 2001, 2010 y 2022 utilizando imágenes Landsat 7 y 8.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2016). Resumen Plan Maestro de Erosión Costera de Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resumen-PMEC.pdf>
- Nantes, E. A. (2019). Método analytic hierarchy process para la toma de decisiones: repaso de la metodología y aplicaciones.
- Navarro, A. (2018). Estudio numérico de la cota de inundación costera debido a agentes marinos. (Tesis de Pregrado). Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla, España.
- Niño Soto, A. S., y Hurtado Morales, J. H. (2019). Elementos para el diagnóstico de la resiliencia por incremento en el nivel del mar en ciudades costeras del caribe colombiano. In XIII CTV 2019 Proceedings: XIII International Conference on Virtual City and Territory: “Challenges and paradigms of the contemporary city”: UPC, Barcelona, October 2-4, 2019. Centre de Política de Sol i Valoracions, CPSV/Universitat Politècnica de Catalunya, UPC.

- Orejarena, A. (2013). Metodología para la determinación de la cota de inundación debido a eventos extremos en playas naturales. Facultad de Oceanografía Física, Escuela Naval Almirante Padilla. p. 25 - 45.
- Orejuela, F. (2020). Modulación de oleaje causado por la construcción de una obra de protección costera utilizando un modelo numérico con mallas no estructuradas. Caso de estudio Puerto Rey-Minuto de Dios.
- Otalvaro Escobar, V. A. (2023). Análisis de la influencia de la erosión costera sobre la estabilidad de un talud de suelo en el municipio de Arboletes, Antioquia. [Tesis de pregrado]
- Paniagua Arroyave, J. F. (2013). Migración histórica actualizada y predicción de la posición de la línea de costa en sectores acantilados críticos del litoral antioqueño, considerando escenarios de ascenso del nivel del mar (Tesis Maestría, Universidad EAFIT).
- Pérez, L. G., Ferrer, J. J., Bermejo, Á. I., Mejía, Y. K., Romero, G. F., y Álvarez-Silva, O. (2022). Advances in the study of coastal processes in the continental Colombian Caribbean coast. *Regional Studies in Marine Science*, 102209.
- Posada Posada, B. O., y Henao Pineda, W. (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano.
- Quintana, R., Higueta, M., Gutiérrez, L., y Toro, V. (2021). Evaluación de las principales características de la onda de marea al interior del golfo de Urabá. *Bol. Cient. CIOH*; 40(2): 35-46. ISSN impreso 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.2021.574

- Rangel-Buitrago, N., Anfuso, G., y Williams, A. T. (2015). Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean & Coastal Management*, 114, 129-144.
- Rangel-Buitrago, N., y Posada, B. (2013). Determinación de la vulnerabilidad y el riesgo costero mediante la aplicación de herramientas SIG y métodos multicriterio. *Intropica* 8 (1), 29–42.
- Rangel-Buitrago, N., Williams, A. T., y Anfuso, G. (2018). Hard protection structures as a principal coastal erosion management strategy along the Caribbean coast of Colombia. A chronicle of pitfalls. *Ocean & Coastal Management*, 156, 58-75.
- Reyes, D. L., Vilela, K. Z., y Saltos, I. (2021). Estudio del oleaje de aguas profundas a someras integrando los modelos computacionales SWAN y SWASH mediante la comparación de datos insitu e imágenes satelitales (Doctoral dissertation, ESPOL. FIMCM: Oceanografía).
- Rhenals-Arteaga, K. V. (2023). Análisis del riesgo por inundación en el marco del ordenamiento territorial del distrito de Cartagena de Indias. aportes desde un estudio de caso en los Barrios Fredonia y Nuevo Paraíso [Tesis de Maestría].
- Rojas-Vargas, J. A. (2021). Monitoreo de Línea de Costa Mediante el Empleo de UAVs en el Sector Punta Rojas - Turbo Durante el Segundo Semestre del Año 2019 [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia
- Salas, L. (2021). Evaluación del riesgo por erosión costera e inundación por aumento del nivel medio del mar y el oleaje en el norte de Cartagena de Indias, [Tesis de pregrado]. Universidad del Norte. Barranquilla, Colombia.

Sánchez-Artús X., Gracia V., Espino M., Sierra J.P., Pinyol J., y Sanchez-Arcilla A. (2023) Present and future flooding and erosion along the NW Spanish Mediterranean Coast. *Front. Mar. Sci.* 10:1125138. doi: 10.3389/fmars.2023.1125138

Saaty, T.L. (1990). Cómo tomar una decisión: el proceso de jerarquía analítica. *Revista Europea de Investigación Operativa.* 48 (1), 9-26.

Servicio Geológico Colombiano. (2016). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. ISBN: 978-958-99528-5-6. https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/1642_Guia-Metodologica-27-07-2016-SinGuias.pdf

Sunamura, T. (1992). *Geomorphology of rocky coasts* (Vol. 3). Wiley.

Stronkhorst, J., Levering, A., Hendriksen, G., Rangel-Buitrago, N. y Appelquist, LR (2018). Evaluación regional de la erosión costera basada en datos globales de acceso abierto: un estudio de caso para Colombia. *Revista de Conservación Costera*, 22, 787-798.

SWAN team. (2021). User manual SWAN Cycle III version 41.31 AB. Obtenido de https://swanmodel.sourceforge.io/online_doc/swanuse/swanuse.html

SWASH team. (2020). SWASH user manual SWASH version 7.01. Obtenido de https://swash.sourceforge.io/online_doc/swashuse/swashuse.html

Thieler, ER, Himmelstoss, EA, Zichichi, JL y Ergul, A. (2009). El sistema de análisis de costas digitales (DSAS), versión 4.0, una extensión de ArcGIS para calcular el cambio de costas (No. 2008-1278). Servicio Geológico de EE. UU.

Unión Europea. (2014). Guía Metodológica 1 - Cambio climático y gestión del riesgo: vulnerabilidad de la infraestructura marino-costera en América Latina. Programa

EUROCLIMA, Dirección General de Desarrollo y Cooperación – EuropeAid, Comisión Europea. Bruselas, Bélgica. 104 p. DOI 10.2841/37650

Vásquez, L., Iriarte, J. y Sánchez. R. (2018a). Determinación de la cota máxima de inundación en la frontera colombo-ecuatoriana aplicando modelación numérica. Bol. Cient.CIOH (37):3-16. ISSN 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.446

Vásquez, L., Iriarte, J. y Sánchez. R. (2018b). Determinación de las cotas máximas de inundación, mediante modelación numérica, en Bahía Solano Chocó Cotas de inundación Bahía Solano-Chocó. Bol. Cient.CIOH (37):17-34. ISSN 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.447

Vélez-Castaño, JD, Betancurth-Montes, GL, y Cañón-Barriga, JE (2021). Erosión y progradación en el delta del río Atrato: un análisis espaciotemporal con Google Earth Engine. Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia, (99), 83–98. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20200688>

Verdeza, A., Posada, A., Vélez, P., Rojas, M. L., Molina, J. R., Vargas, A., Martínez, C., Franco, E., Zapata, P., Monsalve, J., Posada, A., Correa, J., Pérez, G. y Agudelo, J. (1999). DOCUMENTO TÉCNICO DE SOPORTE PARA EL PLAN BÁSICO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL MUNICIPAL ARBOLETES – ANTIOQUIA.

Villegas, P. A. (2020). “Gestión del riesgo por inundaciones. Un metamodelo para el desarrollo de artefactos participativos” modelos integrados de sistemas socio-ecológicos: caso de estudio en la ecorregión de La Mojana (Colombia) [Tesis doctoral]. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/55023>

Walkden, M. J. A., y Hall, J. W. (2005). A predictive mesoscale model of the erosion and profile development of soft rock shores. Coastal Engineering, 52(6), 535-563.

Zamora-Bornachera, A, Sierra-Correa, P y Hernández-Ortiz, M. (2019). Gestión del cambio climático y su articulación con el manejo integrado de la zona costera en Colombia. Corporación universidad de la costa.

Zijlema, M., Stelling, G., y Smit, P. (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*, 58(10), 992-1012.

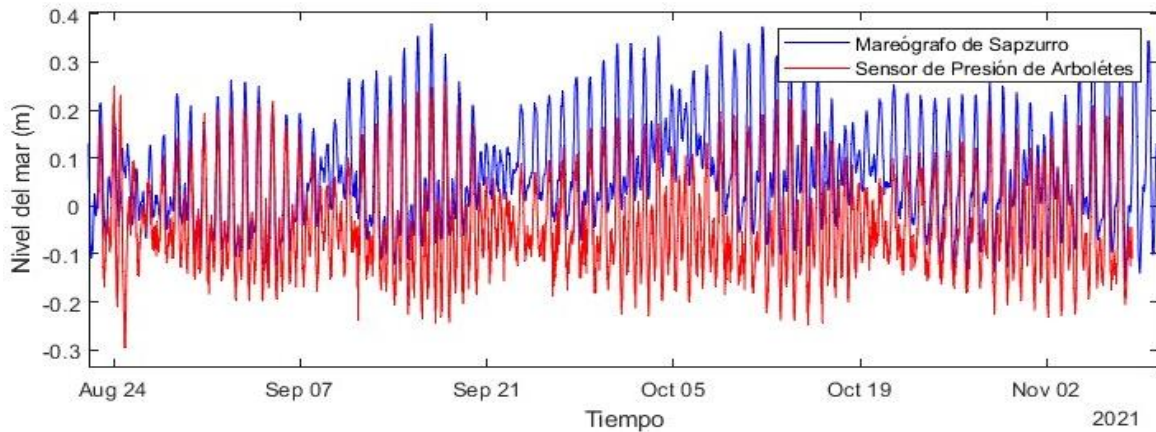
Anexo A

Subcriterios y pesos utilizados para el cálculo de promedios ponderados.

Criterio	<i>Subcriterio_i</i>	<i>P_{Subcriterio}</i>
Zonas con usos no residenciales	Protección/conservación	5
	Servicios	5
	Agropecuario, agroindustrial y forestal	4
	Institucional	4
	Industria	3
	Comercio	3
	Minero-Energético	3
	Parque/zonas verdes	2
	En construcción	2
	Lotes	1
Edades	0 – 9 años	5
	10 – 19 años	1
	20 – 29 años	1
	30 – 39 años	3
	40 – 49 años	3
	50 – 59 años	3
	60 – 69 años	5
	70 – 79 años	5
	≥ 80 años	5
Estratos socioeconómicos	Estrato 1	5
	Estrato 2	4
	Estrato 3	3
	Estrato 4	2
	Estrato 5	1
	Estrato 6	1

Anexo B

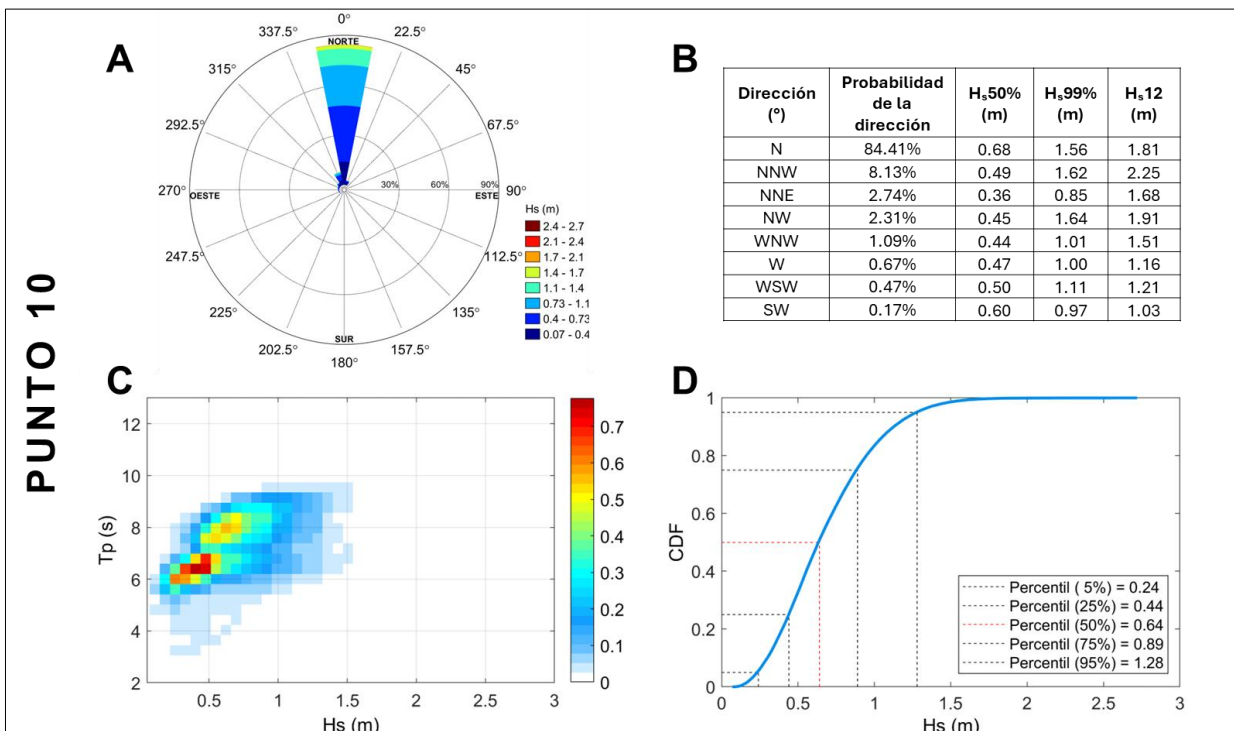
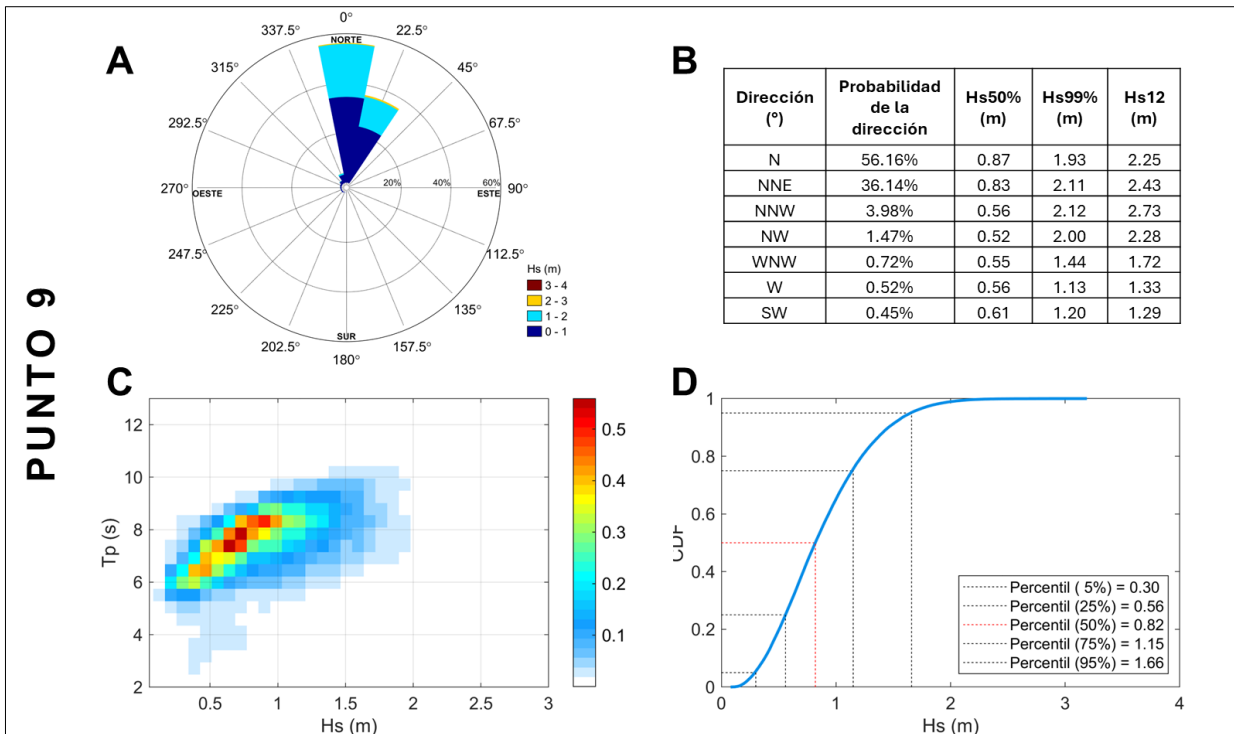
Serie de tiempo de nivel del mar y constituyentes principales de la marea para datos medidos en Arboletes y Sapzurro.



Constituyentes	Frecuencia	Amplitud (m)		Fase (°)	
		Arboletes	Sapzurro	Arboletes	Sapzurro
'M2'	0.081	0.087	0.072	357.207	5.678
'K1'	0.042	0.068	0.103	167.873	166.440
'O1'	0.039	0.049	0.064	174.855	173.175
'S2'	0.083	0.036	0.016	258.704	235.841
'N2'	0.079	0.028	0.026	349.554	335.948

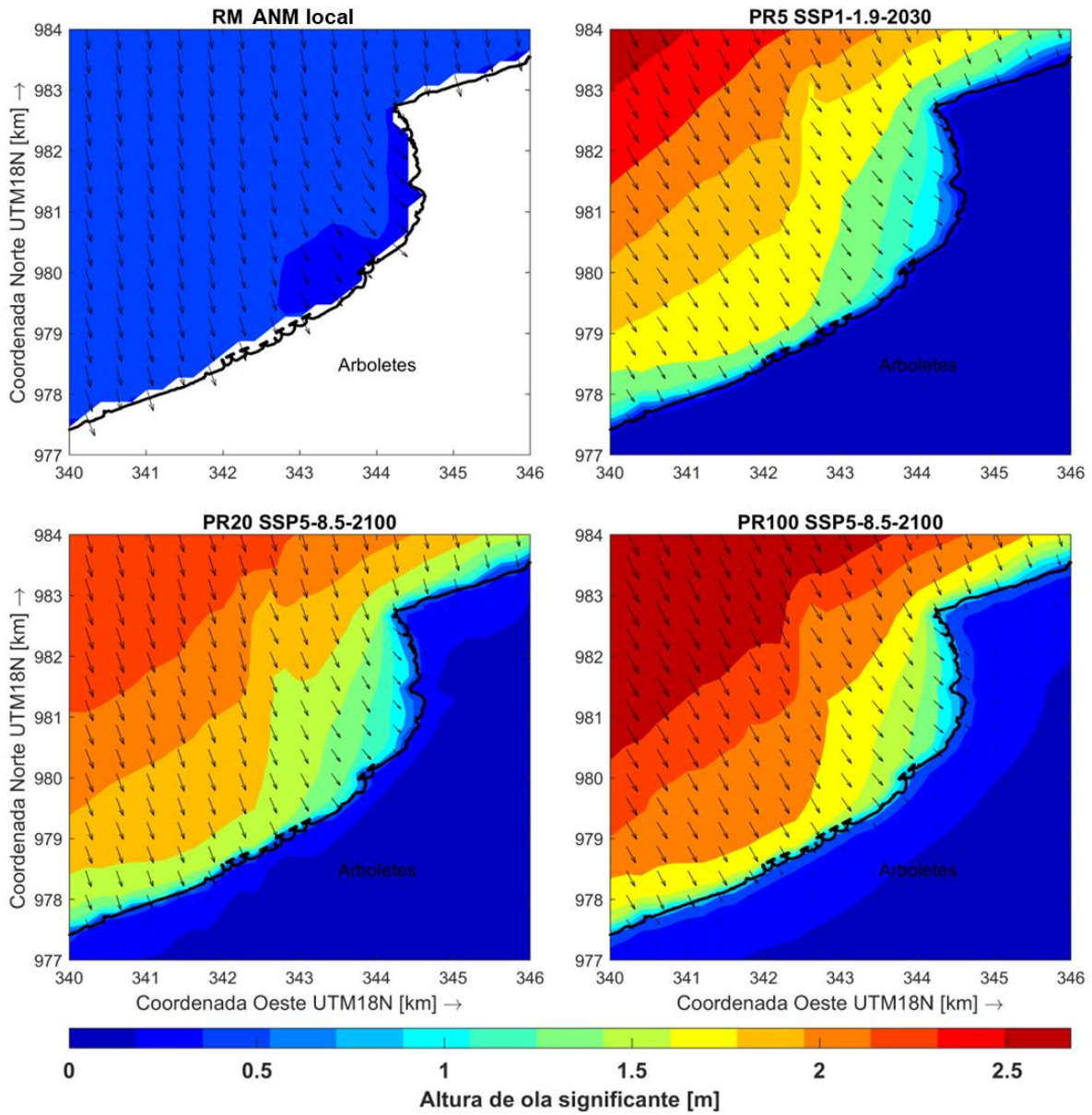
Anexo C

Régimen medio del oleaje a partir de la climatología de los puntos 9 y 10.



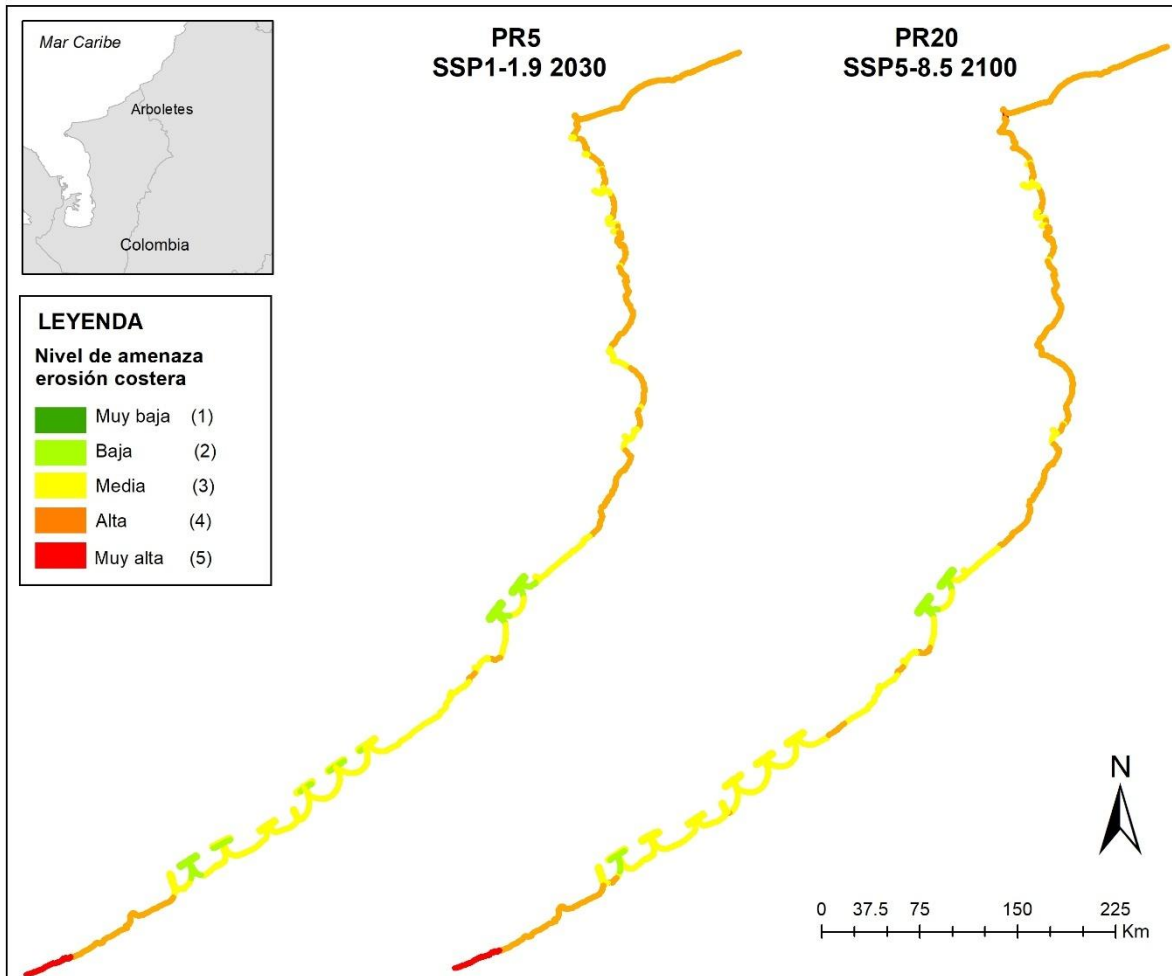
Anexo D

Campos de oleaje para los casos de modelación con SWAN.



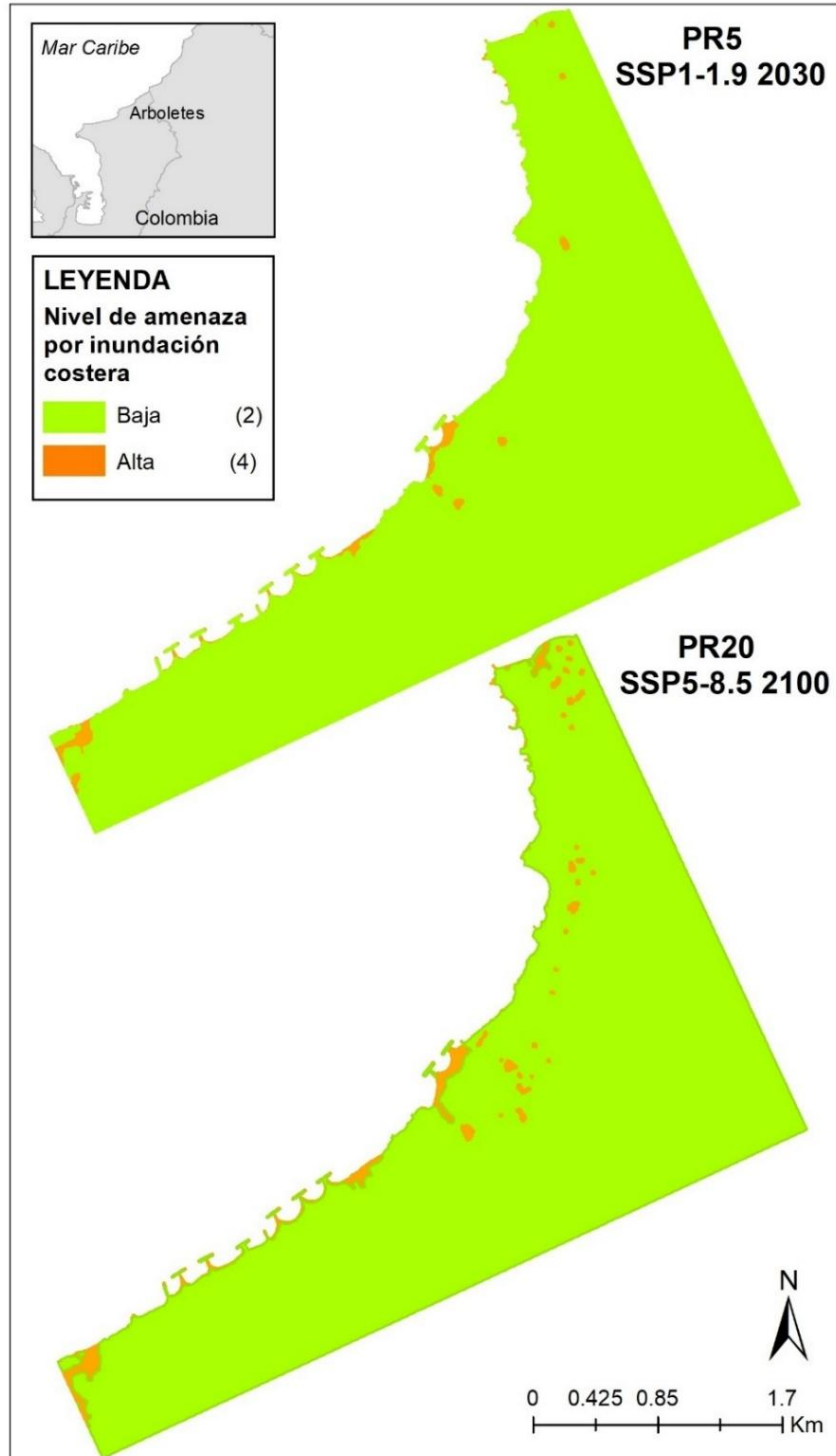
Anexo E

Amenaza por erosión costera de los escenarios PR5 SSP1-1.9 2030 y PR20 SSP5-8.5 2100.



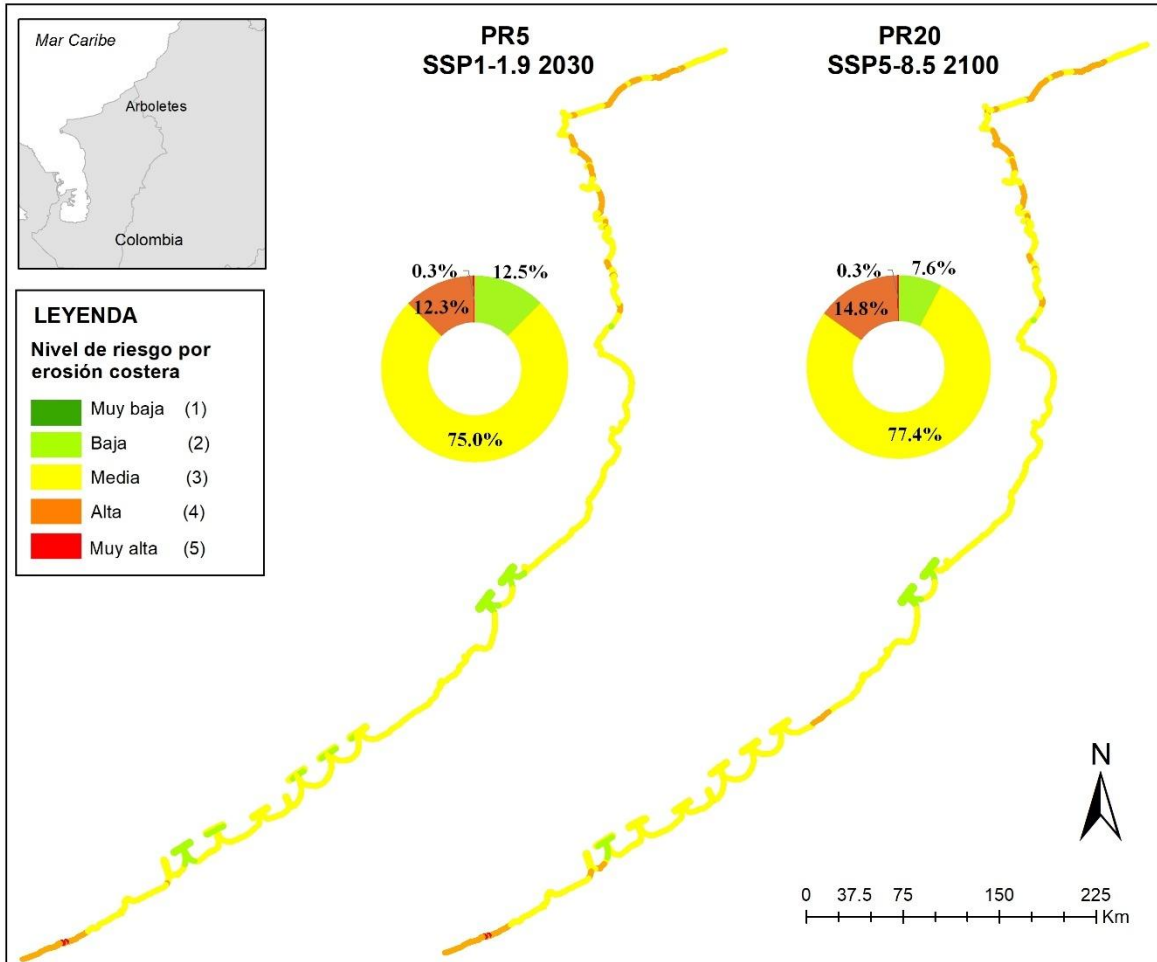
Anexo F

Amenaza por inundación costera de los escenarios PR5 SSP1-1.9 2030 y PR20 SSP5-8.5 2100.



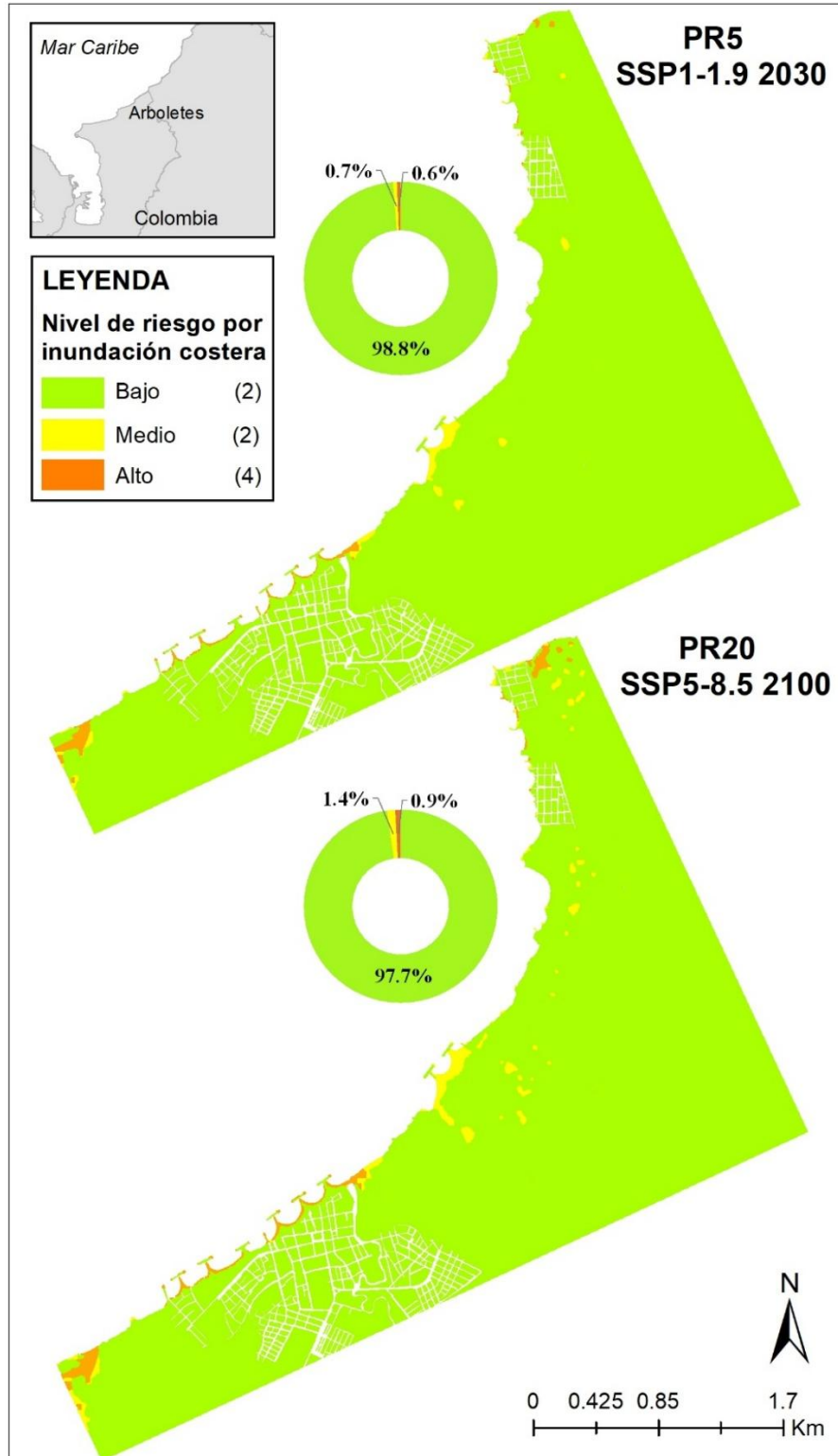
Anexo G

Riesgo por erosión costera de los escenarios PR5 SSP1-1.9 2030 y PR20 SSP5-8.5 2100.



Anexo H

Riesgo por inundación costera de los escenarios PR5 SSP1-1.9 2030 y PR20 SSP5-8.5 2100.



Anexo I

Esquema geométrico generalizado del cálculo de las tasas de avance y retroceso mediante DSAS, tomado de Himmelstoss *et al.* (2018), página 10.

