



Análisis de infraestructura costera estratégica en riesgo en el Caribe Colombiano

Valeria Oñate López

Universidad del Norte

Área de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Geo-Ciencias Barranquilla, Colombia

2022

Análisis de infraestructura costera estratégica en riesgo en el Caribe Colombiano

Valeria Oñate López

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Geólogo

Director:

PhD. Juan Camilo Restrepo López

Línea de Investigación:

Geología ambiental

Universidad del Norte

Área de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Geo-Ciencias

Barranquilla, Colombia

2022

A mis padres

Agradecimientos

A Dios por permitirme llegar hasta este punto y nunca rendirme.

A mi director Juan Camilo Restrepo por poner su voto de confianza en mí y acompañarme durante todo el proceso de esta investigación. Sin su guianza, apoyo y paciencia esto no hubiese sido posible.

A Cristian C., Andrés O. y todas las personas que estuvieron dispuestos a ayudarme y a resolver amablemente mis dudas. Gracias por compartir sus conocimientos.

A todos los profesores y coordinadores que hacen parte del Departamento de Física y Geociencias de la Universidad del Norte, de cada uno me llevo un valioso aprendizaje y les agradezco por contribuir a mi desarrollo profesional a lo largo de toda la carrera.

A mi familia, que ha sido el motor que impulsa mis sueños. Su amor y apoyo incondicional en cualquier circunstancia, me hace sentir afortunada de tenerlos.

A Salomé, por sus consejos y palabras de motivación.

A mis amigos y compañeros de viaje Ubaldo, Andrea, Cristian, María Alejandra y Paula que han vivido también este proceso, gracias por su compañía y apoyo emocional.

Resumen

El análisis de infraestructura costera estratégica en riesgo es abarcado desde la identificación de las principales amenazas costeras en el Caribe Colombiano y desde la exposición, como uno de los componentes más importantes de la vulnerabilidad. Este análisis se realiza con el propósito de contribuir a la gestión del riesgo de desastre de elementos esenciales para la sociedad. Por lo tanto, se identificaron 88 infraestructuras estratégicas costeras en esta investigación, las cuales fueron determinadas a partir de criterios que incluyen: ser infraestructura estratégica física, pertenecer al sector energético, hospitalario, educativo o de transporte, y ubicarse a menos de 250 m desde la línea de costa. A través de un análisis multicriterio y utilizando sistemas de información geográficos (SIG), se determinaron las zonas en el litoral Caribe con mayor nivel de amenaza respecto a fenómenos como la erosión costera, el aumento del nivel medio del mar y el cambio en el flujo de energía del oleaje. Esta evaluación de amenazas junto con la vulnerabilidad por exposición, determina que el 34.1% del total de infraestructuras estratégicas se encuentran en un nivel de riesgo medio a alto y un 20.5%, se catalogan como infraestructuras estratégicas de alto riesgo. Por esta razón, se requiere la implementación inmediata de medidas de protección costera que garanticen el cumplimiento de la etapa previa de la gestión del riesgo de desastres. Además, se sugiere que el alto riesgo relativo en las infraestructuras estratégicas costeras del Caribe se relaciona a una mala intervención antropogénica en el litoral costero.

Palabras clave: Infraestructura estratégica, riesgo relativo, amenazas, vulnerabilidad, SIG.

Abstract

The analysis of coastal critical infrastructure at risk is covered from the identification of the main coastal hazards in the Colombian Caribbean and from exposure, as one of the most important components of vulnerability. This analysis is carried out with the purpose of contributing to the disaster risk management of essential elements for society. Therefore, 88 coastal critical infrastructures were identified in this research, which were determined based on criteria that include: being physical infrastructure, belonging to the energy, hospital, educational or transportation sector, and being located less than 250 m from the coastline. Through a multi-criteria analysis and using geographic information systems (GIS), the areas on the Caribbean coast with the highest level of hazard were determined with regard to natural phenomena such as coastal erosion, mean sea level rise and the change in wave energy flux. This hazard assessment, together with vulnerability due to exposure, determines that 34.1% of all critical infrastructures are at a medium to high risk level and 20.5% are classified as high-risk critical infrastructures. For this reason, the immediate implementation of coastal protection measures is required to guarantee compliance with the previous stage of disaster risk management. In addition, it is suggested that the high relative risk in the coastal critical infrastructures of the Caribbean is related to a bad anthropogenic intervention in the coastline.

Keywords: Critical infrastructure, relative risk, hazards, vulnerability, GIS

Tabla de contenido

Resumen	V
Lista de figuras	VIII
Lista de tablas	IX
Lista de símbolos y abreviaturas	X
1. Introducción.....	11
2. Planteamiento del problema	14
3. Objetivos.....	16
3.1. Objetivo General	16
3.2. Objetivos Específicos.....	16
4. Metodología.....	16
4.1. Área de estudio.....	16
4.2. Elaboración de inventario/catálogo de infraestructura estratégica en riesgo	18
4.3. Datos.....	19
4.3.1. Erosión costera.....	20
4.3.2. Aumento del nivel medio del mar.....	21
4.3.3. Cambio en el flujo de energía del oleaje	23
4.3.4. Vulnerabilidad.....	23
4.4. Elaboración de mapa de amenazas costeras	24
4.5. Elaboración de mapa sinóptico de amenazas múltiples	27
4.6. Elaboración de mapa de vulnerabilidad	27
4.7. Elaboración de mapa de riesgo relativo	29
5. Resultados.....	29
5.1. Inventario	29
5.2. Mapas de amenazas costeras	31
5.2.1. Mapa de amenaza por erosión costera	31
5.2.2. Mapa de amenaza por aumento del nivel medio del mar.....	33
5.2.3. Mapa de amenaza por cambio en el flujo de energía del oleaje	36
5.3. Mapa sinóptico de amenazas múltiples	38
5.4. Mapa de vulnerabilidad.....	39
5.5. Mapa de riesgo relativo	41
6. Discusiones.....	43
7. Conclusiones y consideraciones	47
8. Bibliografía.....	48
9. Anexos	52

Lista de figuras

Figura 4-1. Localización del área de estudio.....	18
Figura 5-1. Localización de infraestructura estratégica costera en riesgo.....	30
Figura 5-2. Resumen del inventario de infraestructura estratégica costera en riesgo en el Caribe Colombiano.....	31
Figura 5-3. Mapa de amenaza por erosión costera-zona norte del Caribe.	32
Figura 5-4. Mapa de amenaza por erosión costera-zona centro y sur del Caribe.....	33
Figura 5-5. Mapa de amenaza por aumento del nivel medio del mar-zona norte del Caribe	35
Figura 5-6. Mapa de amenaza por aumento del nivel medio del mar-zona centro y sur del Caribe.....	35
Figura 5-7. Mapa de amenaza por cambio en el flujo de energía del oleaje-zona norte del Caribe.....	36
Figura 5-8. Mapa de amenaza por cambio en el flujo de energía del oleaje-zona centro y sur del Caribe.....	37
Figura 5-9. Mapa sinóptico de amenazas múltiples-zona norte Caribe.....	38
Figura 5-10. Mapa sinóptico de amenazas múltiples-zona centro y sur del Caribe.	39
Figura 5-11. Mapa de vulnerabilidad por exposición.....	40
Figura 5-12. Mapa de riesgo relativo de infraestructura estratégica costera.	42
Figura 6-1. Infraestructuras estratégicas en riesgo. a) Carretera troncal del caribe km 19 vía Barranquilla-Ciénaga (El Tiempo, 2021). b). Aeropuerto Golfo de Morrosquillo (Tolú-Sucre). c) Aeropuerto Internacional Rafael Núñez (Cartagena-Bolívar).	45

Lista de tablas

Tabla 4-1. Indicadores de medición y fuente de información.	20
Tabla 4-2 Escala de colores para mapas de amenazas.....	24
Tabla 4-3. Clasificación de indicadores que integran las amenazas costeras estudiadas.	25
Tabla 4-4. Escala de colores para la evaluación sinóptica de amenazas múltiples.	27
Tabla 4-5. Escala de colores para mapas de vulnerabilidad.	28
Tabla 4-6. Clasificación de indicadores de la vulnerabilidad por exposición de infraestructura estratégica costera.....	28
Tabla 5-1. Resumen de análisis MKT y Pendiente Sen's (tendencia de largo plazo)- Caribe Colombiano.	34
Tabla 6-1 Infraestructura estratégica costera en alto riesgo	44

Lista de símbolos y abreviaturas

ADT	Absolute Dynamic Topography
ALOS	Advanced Land Observing Satellite-1
ASF	Alaska Satellite Facility
CISA	Agencia de Seguridad de la Infraestructura y Ciberseguridad de Estados Unidos
DAMCRA	Dirección de Asuntos Marinos, Costeros y Recursos Acuáticos
DEM	Modelo de Elevación Digital
DSAS	Digital Shoreline Analysis System
EPCIP	Programa Europeo para la Protección de Infraestructuras Críticas
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
INVEMAR	Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés”
IOC	Intergovernmental Oceanographic Commission
JAXA	Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón
LRR	Rango de Regresión Lineal
MDT	Mean Dynamic Topography
MNDWI	Modified Normalized Difference Water Index
NIPP	Plan Nacional de Protección de Infraestructura
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PNIEC	Programa Nacional de Investigación para la Prevención, Mitigación y control de la Erosión Costera
SLA	Sea Level Anomalies
UNESCO	The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical

1. Introducción

Las zonas costeras, hoy en día, representan una de las áreas con mayor interés científico. No solo por abarcar sistemas naturales dinámicos entre la hidrósfera, atmósfera y la litosfera, sino también por constituir el escenario de distintas actividades socioeconómicas (Talavera-Déniz, 2011). La importancia antrópica de estas regiones se ve reflejada en el crecimiento constante de la población que habita las áreas costeras en los últimos años (Cendrero et al., 2005; Ramirez-Chavéz, 2010; Neuman et al., 2015).

Actualmente, la División de Estadísticas de las Naciones Unidas reporta que un 40% de la población mundial vive a menos de 100 km de distancia del mar (IOC-UNESCO et al., 2011). Esta alta concentración demográfica está dada por los diferentes servicios ecosistémicos marinos y costeros ofrecidos. Entre ellos está incluida la provisión de recursos tangibles como arena, minerales de fondo marino, madera, productos forestales no maderables (taninos, resinas, fibras, etc.), hidrocarburos y organismos marinos; al igual que la prestación de servicios ambientales como la protección de la línea de costa, la filtración del agua, el sustento de pesquerías, la conservación de la biodiversidad y la captura de carbono (Avendaño et al., 2019). De la misma manera, la gran densidad demográfica en zonas costeras se fundamenta en la productividad económica provista por el transporte y comercio marino, el desarrollo de industrias, la pesca, la creciente urbanización y por actividades de recreación y turismo (Fabbri, 1998; Masria et al., 2014).

No obstante, este rápido crecimiento poblacional en áreas costeras ejerce presiones sobre el litoral, llevando al detrimento de los sistemas y recursos costeros finitos a través de su mayor consumo y contaminación (Neuman et al., 2015; De Andrés y Barragán, 2016). A lo anterior se le suma, desde un entorno socioeconómico, el riesgo asociado a la construcción de infraestructura estratégica en zonas expuestas a amenazas costeras, el cual es impulsado por el cambio climático y alteraciones en patrones naturales ocasionadas por actividades humanas (Neuman et al., 2015; Benassai et al., 2014; Klein & Nicholls, 1999). Dentro de estas amenazas se incluye el aumento del nivel medio del mar, la erosión costera, la intrusión de agua salada, las inundaciones costeras causadas por marejadas, tormentas y oleajes

extremos; y otros peligros de alto impacto destructivo como los tsunamis (Masria et al., 2014; Neuman et al., 2015).

La definición de infraestructura estratégica parte de otorgar un valor de indispensabilidad al concepto conocido de infraestructura. Por lo tanto, alude a aquellas estructuras y sistemas que resultan imprescindibles para el funcionamiento regular de la economía y de la sociedad en general (LISA Institute, 2019). Por su parte, la Agencia de Seguridad de la Infraestructura y Ciberseguridad de Estados Unidos, CISA, por sus siglas en inglés (s.f.), define la infraestructura estratégica o crítica como los “activos, sistemas y redes, ya sean físicos o virtuales, considerados tan esenciales [...] que su destrucción o incapacitación tendría un efecto debilitante en la seguridad, la economía nacional, la salud o seguridad pública nacional, o cualquier combinación de los mismos”. En consecuencia, la noción de infraestructura estratégica cubre varios sectores económicos, entre los que se encuentran el sector energético, alimenticio y hospitalario, la industria química y nuclear, el sector financiero, las telecomunicaciones, los sistemas de transporte, entre otros (CISA, s.f.; Alcaraz & Zeadally, 2015). Los servicios de emergencia, sistemas bancarios y redes de comunicación constituyen algunos ejemplos de infraestructura estratégica intangible, la cual abarca los sistemas y redes de información que permiten la conectividad y la operabilidad nacional e internacional; mientras que estructuras y construcciones como oleoductos, hospitales, carreteras, vías férreas y puertos marítimos hacen parte del grupo de infraestructura estratégica física. (Alcaraz & Zeadally, 2015).

El daño o interrupción de la infraestructura estratégica puede estar asociado a causas naturales como las amenazas derivadas de las condiciones naturales del propio medio ambiente. También puede estar relacionado a causas antrópicas como el terrorismo, la actividad delictiva y el comportamiento malicioso. Este daño o interrupción representa un impacto negativo significativo para el bienestar de los ciudadanos, ya que atenta con el buen funcionamiento de servicios básicos de los que disponen (Comisión Europea, s.f.).

A nivel mundial se ha gestionado la ejecución de medidas de seguridad que garanticen la protección de infraestructura estratégica a través de líneas de acciones estatales (Avila-Bernal, 2021). En ese sentido, la Comisión Europea dio lugar, en 2005, al Programa Europeo

para la Protección de Infraestructuras Críticas (EPCIP), cuyo objetivo es aumentar la protección y resiliencia de estas infraestructuras a partir de la identificación de las vulnerabilidades que tienen frente a las amenazas (Giannopoulos et al., 2013). Por su parte, Estados Unidos cuenta con el Plan Nacional de Protección de Infraestructura 2013 (NIPP), el cual se enfoca en evaluar amenazas y mitigar los riesgos asociados a la infraestructura crítica, tanto física como cibernética, del país (CISA, s.f.).

Varios estudios han estimado los riesgos asociados a la vulnerabilidad de ciertas infraestructuras estratégicas ante amenazas costeras. Griggs (2020) hace una recopilación de información que le permite determinar los aeropuertos costeros que “ya están expuestos a inundaciones extremas (huracanes, tifones, grandes tormentas y mareas altas) y en el futuro enfrentarán riesgos crecientes con el aumento global del nivel del mar” (p.1079). Los aeropuertos de San Francisco, Newark y LaGuardia son los más vulnerables en Estados Unidos, con las principales áreas de pista inundadas a solo 2 pies (0,6 m) por encima de la pleamar media más alta. Dawson et al. (2016) evaluaron los efectos esperados del cambio climático en la infraestructura de transporte costero a través del caso correspondiente al tramo de Dawlish a Teignmouth, en la línea ferroviaria de Londres a Penzance (United Kingdom). Se estima que, ante un escenario de aumento del nivel del mar, se vería afectado el funcionamiento y la integridad estructural de la vía férrea, trayendo consigo altos costos asociados al mantenimiento o al desvío del ferrocarril.

En relación con la vulnerabilidad de la infraestructura médica, Taylor (2021) analizó las instalaciones médicas ubicadas en 14 países insulares del Pacífico y el impacto que tienen frente al aumento del nivel del mar. Los resultados de este análisis muestran que el 61,5% de todas las instalaciones médicas evaluadas en los países se encuentran dentro de los 500 m de la costa, lo que hace necesario la implementación de planificación adaptativa ante amenazas costeras. De manera similar, Allen et al. (2018) establecen que el aumento del nivel del mar representa un riesgo creciente para la infraestructura crítica de suministro de agua y salud en las zonas costeras. Por ello, sugieren que los sistemas de salud sean más partícipes de la gestión de emergencias, planeación urbana y del avance en la integración de los peligros costeros.

La importancia de realizar estudios que contribuyan a la gestión de riesgos consiste en abarcar la etapa previa al desastre con acciones de mitigación y preparación, a la vez que se plantean acciones de respuesta y recuperación, durante y después de la ocurrencia de un desastre (Ávila-Toscano et al., 2016). Es por ello que, en zonas como el Caribe Colombiano, catalogadas como áreas geográfica y geológicamente expuestas a diferentes amenazas, se hace necesario seguir implementando esfuerzos orientados a la prevención, mitigación y preparación ante desastres, con el propósito de evitar, en lo posible, futuras afectaciones, daños a infraestructuras y pérdidas humanas (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 1998).

Con la presente investigación se pretende evaluar, a escala regional, el riesgo relativo de infraestructura estratégica expuesta a amenazas costeras en el Caribe Colombiano y de esta manera aportar a los conocimientos integrados de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en Colombia. Además de contribuir al desarrollo de la etapa previa al desastre mediante la identificación de las zonas que requieren una intervención más urgente en la formulación e implementación de estrategias que permitan un adecuado manejo de riesgos costeros.

2. Planteamiento del problema

Colombia es un país que posee una extensa área litoral, donde habita una parte importante de población que no está exenta de ser seriamente afectada por el ascenso del nivel del mar y otras amenazas costeras (IDEAM, 2001). Por ejemplo, se estima que el nivel medio del mar para el período 1908–2009 en el mar Caribe mostró una tasa de aumento de 5,3 mm/año (Torres & Tsimplis, 2012, como se citó en Orejarena-Rondón et al., 2019). También, se registraron tasas de erosión costera que van desde 1.7 m/año hasta más de 19 m/año en puntos críticos del Caribe (Rangel-Buitrago et al., 2015) y oleajes energéticos con alturas significativas superiores a 2 m (Restrepo et al., 2012). Estos valores reflejan amenazas que contribuyen a problemas de inundación y con ello la afectación de infraestructura estratégica costera expuesta. Con el término “exposición” se refiere al número de personas, propiedades y otros elementos en riesgos que se ubican en zonas de peligro, por lo tanto, sujeto a pérdidas potenciales. Este concepto está estrechamente relacionado a la ubicación de los elementos en

riesgo. Porque si los elementos no estuvieran expuestos, la situación de riesgo de desastre no existiría (UNISDR, 2009; Cardona et al., 2012).

Lo que informan los medios de comunicación no es alentador respecto a los efectos de las amenazas costeras. Sobresalen noticias sobre las intervenciones de emergencia en enrocados en el km 19 para evitar el colapso de la vía Ciénaga-Barranquilla por erosión costera (Iguarán, 11 de Marzo de 2021), el reporte de marea alta y fuertes oleajes contra la ciudad de Cartagena (Taborda-Herrera, 11 de enero 2020). Otras noticias presentan proyecciones de estudios oceanográficos en los que se establece un incremento del nivel del mar en Cartagena de entre 2,5 y 5 mm por año (Semana, 2010). Toda esta información refleja la preocupación que existe en la sociedad por la interrupción o daño a infraestructura esencial en la Costa Caribe.

Los esfuerzos desarrollados para la Gestión de Riesgos Costeros en Colombia consisten en su mayoría en estudios orientados a identificar las amenazas costeras y sus impactos en el Caribe Colombiano, y en implementar estrategias de mitigación que no han sido lo suficientemente efectivas. En este sentido, por ejemplo, el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés (INVEMAR), llevó a cabo un diagnóstico de la erosión en la costa Caribe, el cual constituye la base para la posterior creación del Programa Nacional de Investigación para la Prevención, Mitigación y control de la Erosión Costera en Colombia (PNIEC) como un plan de acción correspondiente al periodo 2009-2019 (Posada y Henao, 2008). Por otra parte, y en relación a la infraestructura estratégica, se ha desarrollado el Plan Sectorial de Protección y Defensa para la Infraestructura Crítica Cibernética de Colombia en el año 2018. Sin embargo, en Colombia todavía hace falta una política de Estado respecto a la protección de infraestructuras críticas físicas y una definición formal de los sectores de las infraestructuras críticas colombianas (González, 2019). Ante ello, este trabajo pretende generar conocimiento que contribuya a la articulación de planes y proyectos encaminados a la protección de infraestructura estratégica física a través de determinar: ¿Cuál es el nivel de riesgo relativo de la infraestructura costera estratégica que se encuentra vulnerable, en términos de exposición, a las principales amenazas o eventos climáticos en el Caribe Colombiano?

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Evaluar y analizar el riesgo relativo de infraestructura costera estratégica vulnerable, respecto a su nivel de exposición, ante las principales amenazas o eventos oceanográficos en el Caribe Colombiano.

3.2. Objetivos Específicos

- Identificar las principales amenazas costeras del Caribe Colombiano y elaborar un inventario/catálogo de la infraestructura costera estratégica en riesgo.
- Determinar el nivel de amenaza que representan los fenómenos naturales estudiados en las zonas costeras del Caribe Colombiano.
- Determinar la infraestructura estratégica con mayor probabilidad a sufrir daños ante su exposición a amenazas costeras en la región Caribe Colombiana.

4. Metodología

En el desarrollo de esta investigación, se implementan metodologías basadas en Sistemas de Información Geográficos (SIG) que facilitan la realización de análisis espaciales e históricos de la zona de estudio. Además, se realizó una revisión bibliográfica de distintos antecedentes asociados a estudios de amenazas costeras, con el propósito de obtener información científica de utilidad para esta investigación.

4.1. Área de estudio

La región Caribe Colombiana se ubica en el extremo noroeste de América del Sur y está conformada por los departamentos de La Guajira, Magdalena, Atlántico, Bolívar, Sucre, Córdoba y Cesar. El litoral Caribe, por su parte, posee una línea de costa de 1.818 km de extensión (IDEAM, 2001) que abarca municipios costeros de La Guajira, Magdalena, Atlántico, Bolívar, Sucre, Córdoba, Antioquia y Chocó, estos dos últimos departamentos alcanzan a tener municipios en contacto con el mar Caribe en el Golfo de Urabá (INVEMAR, 2017) (Figura 4-1). Este litoral, en comparación con el litoral Pacífico, tiene características subtropicales de tendencia seca y posee condiciones climáticas de menor humedad (IDEAM,

2010). Alonso et al. (2001) establecen que el nivel del mar en las costas colombianas está principalmente modulado por la oscilación de la marea semidiurna (dos pleamares y dos bajamares en un día), pero en el Caribe su dominio es micromareal con una marea mixta que alcanza amplitudes en el orden de 40-60 centímetros (Restrepo & López, 2008).

Respecto al aumento relativo del nivel del mar, Torres & Tsimplis (2013) reportan una tasa promedio de $1,7 \pm 1,3$ mm/año, obtenida durante el período 1993-2010. Sin embargo, los datos, luego de ser sometido a la corrección isostática glacial, muestran una tendencia promedio en la cuenca Caribe de $2,5 \pm 1,3$ mm/año. Por otro lado, en el Caribe se observa claramente una relación directa de la altura de ola significativa (H_s) con el ciclo anual de los vientos, presentando alturas promedio de ola significativa de 1.5 m con dirección predominante ENE y NE, y períodos visuales que se ajustan entre 4 a 18 s (Agudelo et al., 2006). En términos generales, el oleaje tiene un período más intenso entre Diciembre y Febrero y un período más débil entre Junio y Agosto, cuando los vientos alisios del este se debilitan. En un régimen extremo de oleaje se han registrado H_s de 6.85 m con un periodo de retorno de 50 años (Agudelo et al., 2006; Osorio et al., 2009). Adicionalmente, la variabilidad atmosférica de esta zona presenta un régimen bimodal con dos períodos secos y dos lluviosos, controlados por la Zona de Convergencia Intertropical, ZCIT (Poveda et al., 2006); además de la influencia de frentes fríos, provenientes de altas latitudes, que empiezan a transitar desde Diciembre a Marzo, provocando a su paso aumentos en el gradiente de presión, incremento en la intensidad de los vientos y en la altura del oleaje o mar de leva (CIOH, s.f.).

El Caribe Colombiano, a diferencia del Pacífico, no presenta mucha actividad sísmica y volcánica. Sin embargo, Guerrero et al. (2017) mencionan que autores como O’Loughlin y Lander (2003) han reportado cerca de 124 eventos de tsunamis en el mar Caribe hasta 1998 y que la última alerta de posible tsunami en el Caribe se realizó el 23 de julio de 2015; no obstante, este no representó algún peligro para las costas colombianas.

Por su parte, la erosión costera sí es un problema latente en la Región Caribe Colombiana, con altas tasas de erosión en diferentes puntos críticos como el sector de Punta de Broqueles en el departamento de Córdoba, el cual ha alcanzado tasas de erosión de 56.5 m/año y las

playas de Puerto Colombia, Atlántico, donde se reportan valores de erosión de 29,5 m/año en los últimos 20 años (Rangel-Buitrago et al. 2015).

Este estudio está delimitado por una franja de aproximadamente 2-3 km tierra adentro desde la línea de costa. Esta franja abarca parte del territorio de los municipios costeros y se extiende a lo largo de toda la línea costera de la región Caribe Colombiana.

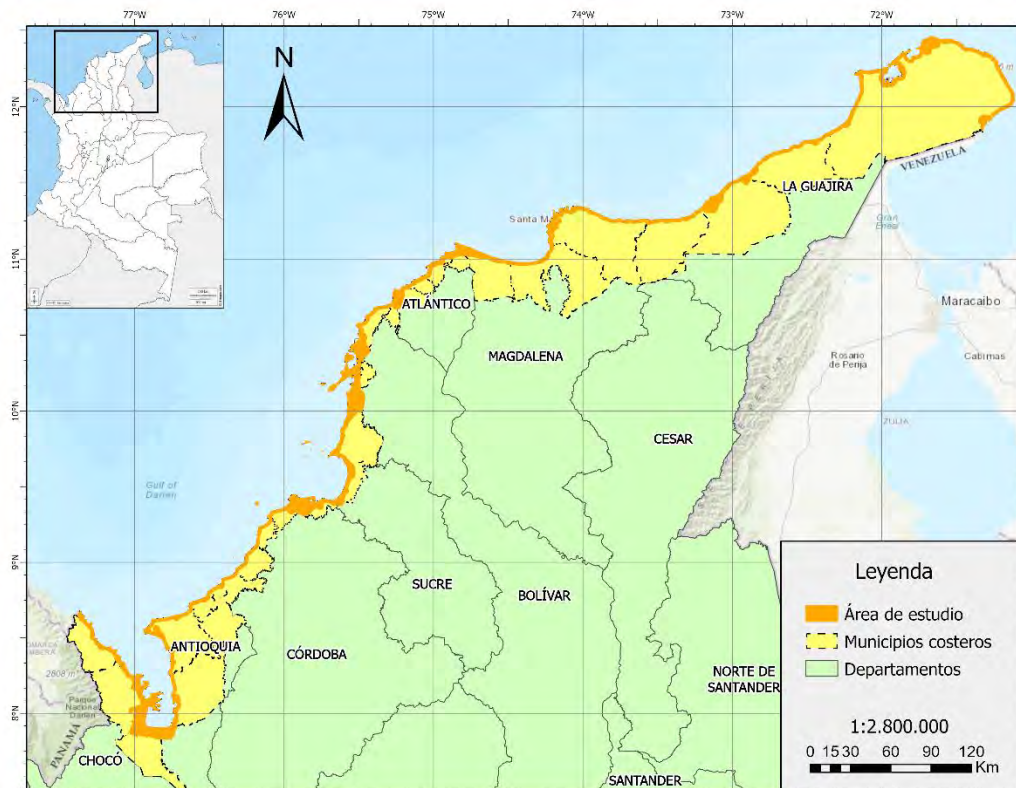


Figura 4-1. Localización del área de estudio.

4.2. Elaboración de inventario/catálogo de infraestructura estratégica en riesgo

La elaboración de un inventario o catálogo de la infraestructura estratégica en riesgo representa una herramienta que permite tener una aproximación a identificar cuáles son las infraestructuras críticas que, debido a su ubicación en zonas de impacto de amenazas, presentan cierto grado de riesgo relativo. Para ello, la identificación de estas infraestructuras se estableció bajo los siguientes criterios: (1) Ser infraestructura estratégica física; (2)

pertenecer al sector energético, de transporte o al sector de servicios básicos en términos de instalaciones hospitalarias y educativas; (3) ubicarse en el rango de 0- 250 m desde la línea de costa. Este último rango fue tomado de acuerdo con la idea de establecer una delimitación arbitraria de la distancia máxima a la línea de costa, que permita al mismo tiempo abarcar suficiente área de estudio y un número representativo de infraestructura estratégica a analizar. Adicionalmente, se tuvo en cuenta que el Caribe Colombiano maneja un régimen de marea micromareal, con valores en el orden de 40-60 centímetros (Restrepo y López, 2008). Lo anterior se traduce en un recorrido limitado de la onda de marea en la longitud horizontal que no alcanzaría un valor más allá de los 250 m desde la línea de costa.

En primera instancia, la ubicación de las infraestructuras estratégicas se realizó con ayuda de la herramienta de Google Earth, teniendo en cuenta los criterios anteriormente mencionados. El formato del inventario diseñado contiene los siguientes ítems: Numeración, Coordenadas, Nombre, Ubicación, Servicio/sector al que pertenece y Distancia mínima aproximada a la costa.

4.3. Datos

A partir de conocimientos previos y teniendo en cuenta la revisión de estudios anteriores, se identificaron 3 principales amenazas costeras en el Caribe Colombiano. Estas corresponden a la erosión costera, el aumento del nivel del mar y el cambio en el flujo de energía del oleaje. Dichas amenazas aparte de ser frecuentes en el Caribe Colombiano, también corresponden a una preocupación ante la emergencia que se vive debido al cambio climático. Para cada una se realizó una pequeña caracterización y se tuvieron en cuenta dos variables como indicadores de medición y representación de peligro para cada amenaza (Tabla 4-1). De igual manera, la vulnerabilidad se analizó en términos de la exposición al peligro. Por ello, se consideraron también dos variables que corresponden a los parámetros o indicadores de representación de vulnerabilidad (Tabla 4-1).

Tabla 4-1. Indicadores de medición y fuente de información.

Amenaza	Indicador de medición del peligro	Fuente
Erosión costera	Tasa de variación línea de costa (m/año)	Imágenes satelitales Landsat
	Geomorfología costera	INVEMAR-DAMCRA
Aumento del nivel medio del mar	Tasa promedio del cambio del nivel medio del mar (mm/año)	AVISO
	Elevación (m)	DEM ALOS PALSAR
Cambio en el flujo de energía del oleaje	Porcentaje de cambio del flujo de energía del oleaje	Orejarena-Rondón et al. (2022)
	Elevación (m)	DEM ALOS PALSAR
Vulnerabilidad	Parámetro/indicador	Fuente
Exposición	Distancia a la costa (m)	Google Earth
	Geomorfología costera	INVEMAR-DAMCRA

4.3.1. Erosión costera

La amenaza de erosión costera se aborda desde un análisis espacio-temporal de la variación de la línea de costa en los últimos 30 años del área de estudio. Así como del análisis de las características de la geomorfología costera. Para la tasa de variación de la línea de costa, se emplearon imágenes satelitales correspondientes a los años 1991, 2001, 2011 y 2021, a partir de los cuales se realizó la extracción y digitalización de las líneas de costa. Dichas imágenes se descargaron con una resolución espacial de 30 m de los datasets *USGS Landsat 5 TM Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance*, *USGS Landsat 7 Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance* y *USGS Landsat 8 Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance* desde la plataforma de Google Earth Engine Code Editor.

Para la digitalización de las líneas de costas se calculó el Índice de agua “Modified Normalized Difference Water Index” (MNDWI) con el objetivo de tener una mejor visualización del límite tierra-agua en las imágenes satelitales. Para calcular dicho índice se utilizó la Ecuación 1,

$$MNDWI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde “*Green*” corresponde a los valores de píxel de la banda verde y “*SWIR*” a los valores de píxel de la banda infrarroja de onda corta. En este índice, el agua tiene valores positivos mientras que el suelo, vegetación y terrenos edificados poseen valores negativos (Xu, 2006).

Luego de esto, se calculó el cambio de la línea de costa mediante el Rango de Regresión Lineal (LRR) obtenidos con la herramienta DSAS (Digital Shoreline Analysis System). Con esta herramienta se logra verificar la existencia de patrones de erosión o acreción y se obtiene las tendencias evolutivas de periodos de tiempo específicos. Su metodología consiste en trazar transectos perpendiculares a una línea base establecida, que indican la distancia entre dicha línea y las líneas de costas de diferentes fechas. Dichos transectos sirvieron de orientación para la posterior poligonización y rasterización de los resultados obtenidos de las tasas de variación en m/año.

La información correspondiente a la variable de geomorfología fue descargada de la página web del INVEMAR en formato *Shapefile* a escala 1:100.000. Esta capa de datos fue elaborada por la Dirección de Asuntos Marinos, Costeros y Recursos Acuáticos (DAMCRA) a partir de diferentes estudios existentes sobre la geomorfología de la costa Caribe continental colombiana.

4.3.2. Aumento del nivel medio del mar

Para determinar la amenaza del aumento del nivel medio del mar se tuvo en cuenta la tasa promedio del cambio del nivel medio del mar (mm/año) y la elevación del terreno. Para el primer indicador, se empleó la base de datos satelital AVISO+ “Datos de Altimetría por Satélite”. Esta base de datos recolecta información de todas las misiones de altimetría por satélite. Los datos usados están referenciados al geode y corresponden a archivos de *Absolute Dynamic Topography* (ADT), definido como la sumatoria de *Mean Dynamic Topography* (MDT) y *Sea Level Anomalies* (SLA). Los datos descargados vienen en una cobertura global, con una malla de resolución espacial de $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ y como resolución temporal se emplearon datos diarios en un periodo de 23 años (1993-2015). Dado que el formato de descarga corresponde a archivos *NetCDF*, fue necesario utilizar el software Matlab, el cual permite leer y procesar este tipo de datos.

Para la organización y procesamiento de los datos se utilizó un código que permitió recortar la malla global a una malla más local del Caribe Colombiano. Luego, se seleccionaron nodos de coordenadas, de los cuales se extraería la información del ascenso del nivel medio del mar. En total, fueron 23 puntos de interés, ubicados a lo largo de la línea de costa (Anexo 9-3). Para cada punto, se obtuvieron valores diarios organizados en una matriz por año y después, se estimaron valores anuales para cada punto evaluado. Posteriormente, se calcularon las tendencias a largo plazo de los valores anuales. Para esto, se utilizó la prueba estadística *Mann-Kendall test (MKT)* (*Gradual trend test*), ya que dada su característica de prueba estadística no-paramétrica, resulta más conveniente al momento de obtener tendencias lineales de datos que no se ajustan a una distribución normal. Esto se explica debido a que estas pruebas no asumen ninguna forma especial para la función de distribución de datos (Yue *et al.*, 2002). De igual manera, se utilizó la pendiente de *Sen's* que, al ser insensible a valores atípicos, muestra la pendiente final de la tendencia calculada con MKT.

Finalmente, en el software de ArcGIS Pro, se graficaron los 23 puntos con el valor correspondiente a la tasa de ascenso del nivel medio del mar para cada punto cercano a la línea de costa del Caribe Colombiano. Allí, se prosiguió a realizar una interpolación de los valores en su zona de influencia dentro del área de estudio, con el propósito de tener datos interpolados en los lugares donde se ubican las infraestructuras estratégicas identificadas. Para ello, se utilizó la herramienta de interpolación Kriging, ya que consta de métodos geoestadísticos que incluyen la autocorrelación espacial mediante relaciones estadísticas entre los puntos medidos. De esta forma, se garantiza alguna medida de certeza o precisión de las predicciones realizadas (Esri, s.f.).

El segundo indicador de medición de peligro corresponde a la elevación del área de estudio, este se obtuvo de la descarga de archivos *TIFF* a lo largo de la línea de costa. El DEM (Modelo de Elevación Digital) corresponde al año 2010 y se descargó en una resolución espacial de 12.5 m desde la página oficial de Alaska Satellite Facility (ASF), utilizando el radar de apertura sintética de PALSAR, uno de los tres instrumentos de la misión Advanced Land Observing Satellite-1 (ALOS) de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA). (ASF, s.f.).

4.3.3. Cambio en el flujo de energía del oleaje

Para la amenaza de cambio en el flujo de energía del oleaje se consideraron 2 indicadores, el porcentaje de cambio del flujo de energía del oleaje y la elevación. Los datos utilizados para el primer indicador se obtuvieron del trabajo de Orejarena-Rondón et al. (2022) titulado “Wave energy flux in the Caribbean Sea: Trends and variability”. En su estudio se calculó el flujo de energía del oleaje en el mar Caribe, utilizando datos de reanálisis de las olas de un periodo de 60 años (1958-2017). Estos datos provienen de boyas in situ de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y de la Dirección General Marítima en el mar Caribe. Para el presente estudio se usaron los datos del porcentaje de cambio de energía del oleaje generados en 30 de las 47 boyas de información utilizadas por Orejarena-Rondón et al. (2022), que son las que corresponden a la zona inmediata a la línea costera del Caribe Colombiano. Luego, en el software de ArcGIS Pro, se georreferenciaron y se digitalizaron las boyas utilizadas, y posteriormente se interpolaron los datos al polígono correspondiente al área de estudio usando la herramienta Kriging, anteriormente explicada.

El siguiente indicador corresponde a datos de elevación que, así como se mencionó en la sección 4.3.2, se descargaron de información ALOS PALSAR del año 2010 a una resolución espacial de 12.5 m.

4.3.4. Vulnerabilidad

Para determinar la vulnerabilidad se tuvo en cuenta únicamente la exposición, es por ello que como indicadores/parámetros se utilizaron la distancia aproximada de la infraestructura a la línea de costa (m) y las unidades geomorfológicas del área de estudio. Como sabemos las infraestructuras estratégicas identificadas en este estudio tenían como requisito ubicarse en un rango de 0-250 m desde la línea de costa. Entonces, para medir la distancia a la que se encuentra localizada cada una de estas infraestructuras desde la costa, se utilizó la herramienta de regla en Google Earth y se tuvo en cuenta el año al que correspondía la imagen satelital proyectada para cada zona. Por otra parte, el indicador de geomorfología costera utilizado contiene los mismos datos especificados en la sección 4.3.1, donde se describe que fue elaborado por la DAMCRA a partir de diferentes estudios anteriores sobre la geomorfología de la costa Caribe Colombiana.

4.4. Elaboración de mapas de amenazas costeras

El objetivo de la realización de mapas de amenazas consiste en realizar una zonación del área de estudio de acuerdo con su nivel de amenaza para los tres fenómenos mencionados previamente. A partir de los indicadores de cada amenaza se elaboraron mapas temáticos (Anexos), cuyos datos fueron luego reclasificados de acuerdo con una escala numérica y de color que refleja el nivel de amenaza de cada clase obtenida dentro de los indicadores de medición de peligro. A la escala de colores se le asignó una puntuación de 1 para el menor rango o amenaza baja y una puntuación de 4 para el mayor rango o amenaza alta (Tabla 4-2).

Tabla 4-2 Escala de colores para mapas de amenazas.

Nivel de amenaza	Valor
Baja	1
Media	2
Media-Alta	3
Alta	4

La reclasificación de los indicadores de medida de peligro solo debe ser aplicada en el área de estudio, debido a que muestran valores relativos a la zona específica. Además, a todos los indicadores de las amenazas costeras estudiadas, se le asignó un peso de acuerdo a la relevancia que tiene cada indicador en la amenaza (Tabla 4-3). Los criterios y valores reclasificados se dieron a partir de una revisión a la literatura existente y a las características propias visibles de cada clase del indicador. Estos criterios de cada indicador se definen en función de la condición que hace que aumente o disminuya el grado de amenaza.

Los indicadores de medición de peligro a los que se le atribuye mayor peso (60%) corresponde a aquellos que directa o indirectamente representan medidas de la intensidad o magnitud de la amenaza costera en estudio, mientras que aquellos con menor peso (40%) guardan mayor relación con características del entorno (topografía y geomorfología) que, si bien son importantes, se consideran menos relevantes si las comparamos con los demás indicadores (Tabla 4-3).

Tabla 4-3. Clasificación de indicadores que integran las amenazas costeras estudiadas.

Amenaza	Erosión costera			
Indicador	Criterio	Clase	Valor	Peso
Tasa de variación línea de costa (m/año)	La amenaza es mayor a medida que aumenta el retroceso de la línea de costa	>-3.5 m/año	4	60%
		-3.5 m/año a -1.5 m/año	3	
		-1.5 m/año a -0.2 m/año	2	
		-0.2 m/año a 0.2 m/año	1	
		>0.2 m/año		
Geomorfología costera	Amenaza aumenta en costas bajas, constituidas de materiales no consolidados, no cohesivos y en áreas con intervención antrópica. La amenaza disminuye en zonas elevadas, con presencia de acantilados, materiales consolidados y estructuras naturales de protección costera	Área urbana, relleno antrópico, barra de arena, playa, playones, espigas, llanura costera, cordón litoral, islas, islotes, laguna costera	4	40%
		Terrazas marinas, terrazas aluvial costeras, abanicos, campos de dunas, cordón litoral antiguo, llanura costera, plataforma, plataforma continental, llanura marina, yardangs, salares y zonas de inundación	3	
		Pantano de agua dulce, terrazas coralinas, volcán de lodo, cuerpos de agua, llanura aluvial, terraza aluvial, llanura de inundación, llanura fluviolacustre, planicie aluvial, río, salitral, valle aluvial	2	
		Bajo coralino, plataforma y barras arrecifales, plataforma de abrasión elevada, colinas y montañas, estructura en roca, pantano de manglar, no definido, pedimentos	1	

Tabla 4-3. (Continuación)

Amenaza		Aumento del nivel del mar		
Indicador	Criterio	Clase	Valor	Peso
Tasa promedio del cambio del nivel medio del mar (mm/año)	Amenaza aumenta mientras la tasa de ascenso del nivel medio del mar sea mayor	>3.5 mm/año	4	60%
		3 mm/año - 3.5 mm/año	3	
		2.5 mm/año - 3 mm/año	2	
		<2.5 mm/año	1	
Elevación (m)	Amenaza aumenta a medida que disminuye la topografía del terreno	Elevación < 5 m	4	40%
		Elevación entre 5-10 m	3	
		Elevación entre 10-25 m	2	
		Elevación mayor a 25 m	1	
Amenaza		Cambio en el flujo de energía del oleaje		
Indicador	Criterio	Clase	Valor	Peso
Porcentaje de cambio del flujo de energía del oleaje	Amenaza aumenta a medida que aumenta el porcentaje de cambio de energía del oleaje	9-12%	4	60%
		6-9%	3	
		3-6%	2	
		0-3%	1	
Elevación (m)	Amenaza aumenta a medida que disminuye la topografía del terreno	Elevación < 5 m	4	40%
		Elevación entre 5-10 m	3	
		Elevación entre 10-25 m	2	
		Elevación mayor a 25 m	1	

Para la reclasificación de cada ráster de los indicadores que integran las amenazas costeras estudiadas, se utilizó la herramienta *Reclasificar* en ArcGIS Pro, cuya función es cambiar los valores de los píxeles en un ráster por unos nuevos. Posteriormente, se realiza el análisis multicriterio para cada amenaza, realizando un promedio ponderado a través de la herramienta de *Superposición Ponderada*, en la cual se inserta las capas de los indicadores por amenaza costera y a cada uno se le asigna el peso establecido. Es importante resaltar que, para realizar el análisis multicriterio, todos los datos deben estar en formato ráster y mantener la misma extensión, resolución espacial y referencia espacial. Al final, se obtienen 3 mapas de amenazas; el primero, corresponde al mapa de amenaza por erosión costera; el segundo, muestra el mapa de amenaza por aumento del nivel medio del mar y el tercero, corresponde

al mapa de amenaza por cambio en el flujo de energía del oleaje. Dichos mapas mantienen la escala de color presentada en la Tabla 4-2.

4.5. Elaboración de mapa sinóptico de amenazas múltiples

Para la elaboración del mapa sinóptico de amenazas múltiples, se integraron los 3 mapas de amenazas costeras mediante la suma de dichos mapas con la herramienta de *Calculadora Ráster*. De esta manera, las 3 amenazas poseen el mismo nivel de importancia en la evaluación sinóptica. La realización de un promedio ponderado no se consideró en esta superposición, debido a que, para el contexto del caribe colombiano, las 3 amenazas costeras se encuentran en un estado activo y la línea de costa está experimentando al mismo tiempo erosión costera, aumento del nivel medio del mar y cambios en el flujo del oleaje.

Como resultado de la sumatoria, se obtuvo un ráster con valores entre 5-12 que luego fueron reclasificados entre puntajes de 1 a 4, siendo (1) amenaza baja y (4) amenaza alta (Tabla 4-4). De esta forma, se mantiene una escala de color uniforme a lo largo de todo el documento.

Tabla 4-4. Escala de colores para la evaluación sinóptica de amenazas múltiples.

Valor reclasificado y nivel de amenaza	Valor de sumatoria
1 (Baja)	3-6
2 (Media)	7-8
3 (Media-Alta)	9-10
4 (Alta)	11-12

4.6. Elaboración de mapa de vulnerabilidad

De manera similar, para el mapa de vulnerabilidad por exposición se generaron mapas temáticos para cada indicador/parámetro (Anexos) y sus datos se reclasificaron acorde a una escala de color que evidencia el nivel de vulnerabilidad de cada clase que integra los indicadores de vulnerabilidad. La escala de colores contiene 4 categorías, estas van desde una vulnerabilidad baja (1) hasta una vulnerabilidad alta (4) (Tabla 4-5).

Tabla 4-5. Escala de colores para mapas de vulnerabilidad.

Nivel de vulnerabilidad	Valor
Baja	1
Media	2
Media-Alta	3
Alta	4

La reclasificación otorgada a las clases de los indicadores de vulnerabilidad al igual que el peso asignado a cada indicador se observa en la Tabla 4-6. De igual forma, los criterios de cada uno se encuentran basados en la condición que determina si una infraestructura es más vulnerable o menos vulnerable. La infraestructura más vulnerable es aquella con mayor cercanía a la línea de costa y ubicada en áreas con materiales no consolidados y con intervención antrópica. Los valores reclasificados de geomorfología se definieron a partir de revisión bibliográfica y la localización respecto a la costa se reclasificó de acuerdo a divisiones en los valores de distancia que abarcan el rango de estudio (0- 250 m).

Tabla 4-6. Clasificación de indicadores de la vulnerabilidad por exposición de infraestructura estratégica costera.

Indicador	Vulnerabilidad alta (4)	Vulnerabilidad media-alta (3)	Vulnerabilidad media (2)	Vulnerabilidad baja (1)	Peso
Localización respecto a la costa (m)	0-50 m	50-100 m	100-170 m	170-250 m	50%
Geomorfología costera	Área urbana, relleno antrópico, barra de arena, playa, playones, espigas, llanura costera, cordón litoral, islas, islotes, laguna costera	Terrazas marinas, terrazas aluvial costeras, abanicos, campos de dunas, cordón litoral antiguo, llanura costera, plataforma, plataforma continental, llanura marina, yardangs, salares y zonas de inundación	Pantano de agua dulce, terrazas coralinas, volcán de lodo, cuerpos de agua, llanura aluvial, terraza aluvial, llanura de inundación, llanura fluviolacustre, planicie aluvial, río, salitral, valle aluvial	Bajo coralino, plataforma y barras arrecifales, plataforma de abrasión elevada, colinas y montañas, estructura en roca, pantano de manglar, no definido, pedimentos	50%

Para el mapa final de vulnerabilidad, se promedió la capa vector reclasificada de la localización de la infraestructura estratégica respecto a la costa y la capa ráster de geomorfología costera, dando como resultado una capa en donde cada infraestructura estratégica tiene un valor (1-4) y un color (verde, amarillo, naranja y rojo) asociado al nivel de vulnerabilidad total por exposición.

4.7. Elaboración de mapa de riesgo relativo

Para la elaboración del mapa de riesgo se tuvo en cuenta una metodología basada en el análisis de posibles amenazas y la evaluación de las condiciones existentes de vulnerabilidad. Dichos factores combinados representan la probabilidad de daños potenciales a la población, la propiedad, los servicios y los medios de sustento expuestos (UNISDR, 2009). En este caso, se le llama mapa de riesgo relativo debido a que solo se tiene en cuenta la evaluación de la vulnerabilidad desde una esfera, atribuida a la exposición al peligro, que resalta como uno de los componentes principales de la vulnerabilidad. Así mismo, este mapa se elabora a partir de la superposición del mapa sinóptico de amenazas múltiples y el mapa de vulnerabilidad por exposición, realizando un promedio en función de la amenaza y la vulnerabilidad. Finalmente, se reclasifican valores y se incorporan dentro de la escala de colores de 1-4 que le atribuye el valor menor a un riesgo bajo y el valor mayor a un riesgo alto.

5. Resultados

5.1. Inventario

En la elaboración del inventario de infraestructura estratégica costera en riesgo, se identificaron 88 infraestructuras estratégicas que cumplen con los criterios definidos en metodología. En Anexos 9-1 se encuentra el inventario final y en la Figura 5-1, se puede visualizar la enumeración y ubicación de la infraestructura estratégica en riesgo.

De acuerdo a la clasificación de sector y servicio prestado, se observa que la mayor cantidad de infraestructura estratégica se ubica en el sector educativo y de transporte, con un porcentaje de 54.5% y 20.5%, respectivamente; mientras que la menor cantidad de infraestructura pertenece al sector salud con 15.9%, seguido del sector energético con 9.1% (Figura 5-2).

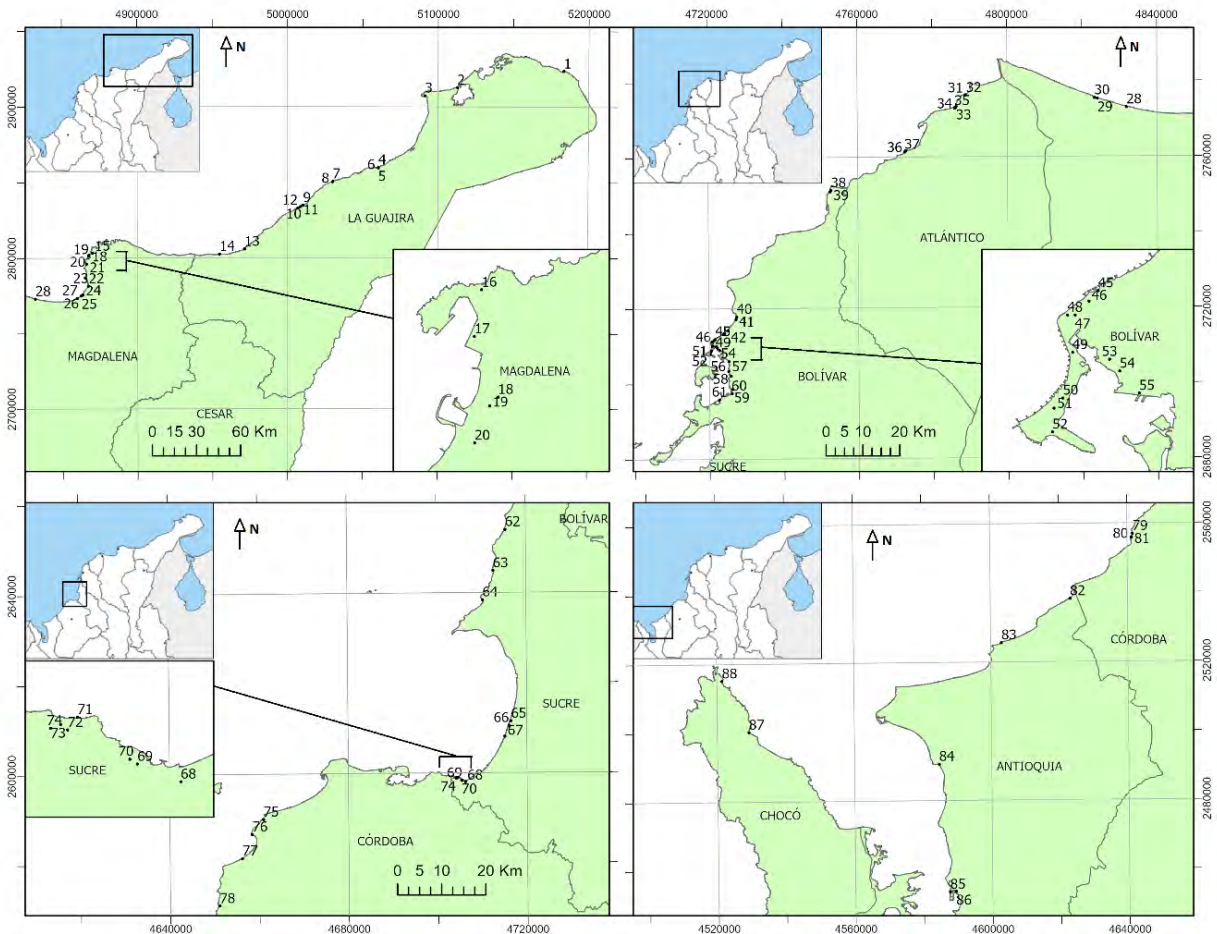


Figura 5-1. Localización de infraestructura estratégica costera en riesgo.

Los departamentos que cuentan con mayor número de infraestructura estratégica en riesgo corresponden a los departamentos de Bolívar y Magdalena. Bolívar alberga el 27.3% de infraestructura estratégica, concentrada en su mayoría en la Bahía de Cartagena (Figura 5-1). Luego, le sigue el departamento de Magdalena con el 18.2% del número total de infraestructura estratégica. De estos departamentos resalta la cantidad de infraestructura que se incluyen dentro del sector educativo. En tercer lugar, se encuentra el departamento de La Guajira con 15.9% de infraestructura estratégica, seguido del departamento de Sucre con un porcentaje de 14.8%. Después, se encuentran los departamentos de Córdoba y Atlántico que comparten un valor del 7.9% de todas las infraestructuras y, por último, Antioquia y Chocó con un porcentaje de 5.7% y 2.3%, respectivamente (Figura 5-2).

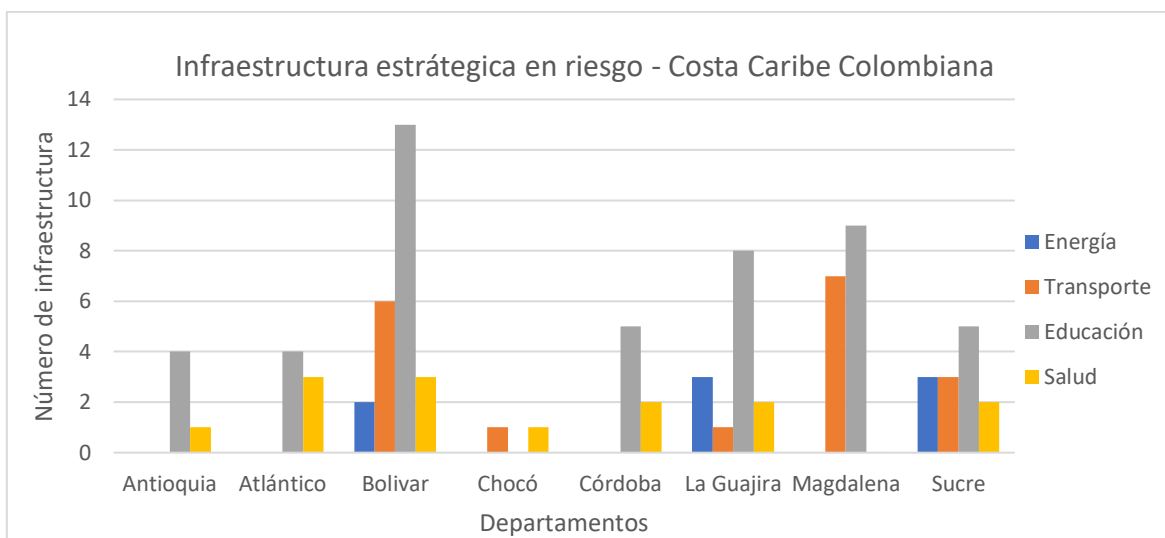


Figura 5-2. Resumen del inventario de infraestructura estratégica costera en riesgo en el Caribe Colombiano.

5.2. Mapas de amenazas costeras

5.2.1. Mapa de amenaza por erosión costera

Dado que la erosión costera supone la ganancia de terreno por parte del mar y pérdida de material sedimentario en la zona litoral, se hace esencial conocer cómo ha sido la variación de la línea de costa en los últimos años y la caracterización de las unidades geomorfológicas sobre las que la erosión tiene influencia directa. De acuerdo con lo anterior, en el mapa temático generado de variación de la línea de costa (Anexo 9-2), se puede observar zonas donde predomina la erosión y otras zonas mucho más estables y con tendencia a la acreción. Las zonas que muestran procesos más inclinados a la erosión corresponden a franjas de líneas de costa cerca de Manaure, Palomino y Camarones en la Guajira; Ciénega, Pueblo Viejo y Sitionuevo en el Magdalena; Barú en el departamento de Bolívar; Santiago de Tolú y Coveñas en Sucre y Los Córdoba en el departamento de Córdoba. Por otra parte, las zonas donde se evidencia más estabilidad y acreción se ubican en la alta Guajira, en la espiga de Puerto Velero-Atlántico, en la ciudad de Cartagena-Bolívar y desembocaduras del río Sinú y del río Atrato.

En el mapa de amenazas por erosión costera, el 28.05% (1299.68 km²) del área total de estudio incluida en este trabajo representa una zona de amenaza baja, el 49.64% (2299.78

km²) se cataloga como amenaza media, la amenaza media-alta abarca un 18.59% (861.40 km²) y, por último, un 3.72% (172.30 km²) del área total corresponde a amenaza alta. Además, en el mapa se evidencian amenazas bajas y medias en la alta Guajira, margen noroeste de la zona costera de Riohacha y Manaure-La Guajira, en zona litoral de Santa Marta-Magdalena, en la franja litoral de los municipios del Atlántico, a excepción de Barranquilla y parte de Tubará, en la mayoría de zonas de Cartagena- Bolívar, en el golfo de Urabá y varios municipios de Córdoba. Por otro lado, las zonas que registran amenaza alta y amenaza media-alta se ubican en franjas costeras de los municipios de Manaure, Riohacha y Dibulla-La Guajira, Pueblo Viejo y Sitionuevo-Magdalena, Turbará y Barranquilla-Atlántico, San Onofre y Santiago de Tolú-Sucre, Los Córdoba- Córdoba y, por último, Necoclí y Turbo-Antioquia (Figura 5-3 y Figura 5-4). Como se esperaba, varios de los lugares que mostraban mayor tasa de erosión (>-3.5 mm/año) coincide con las zonas que presentan una mayor amenaza, siendo el municipio de Sitionuevo-Magdalena un claro ejemplo.

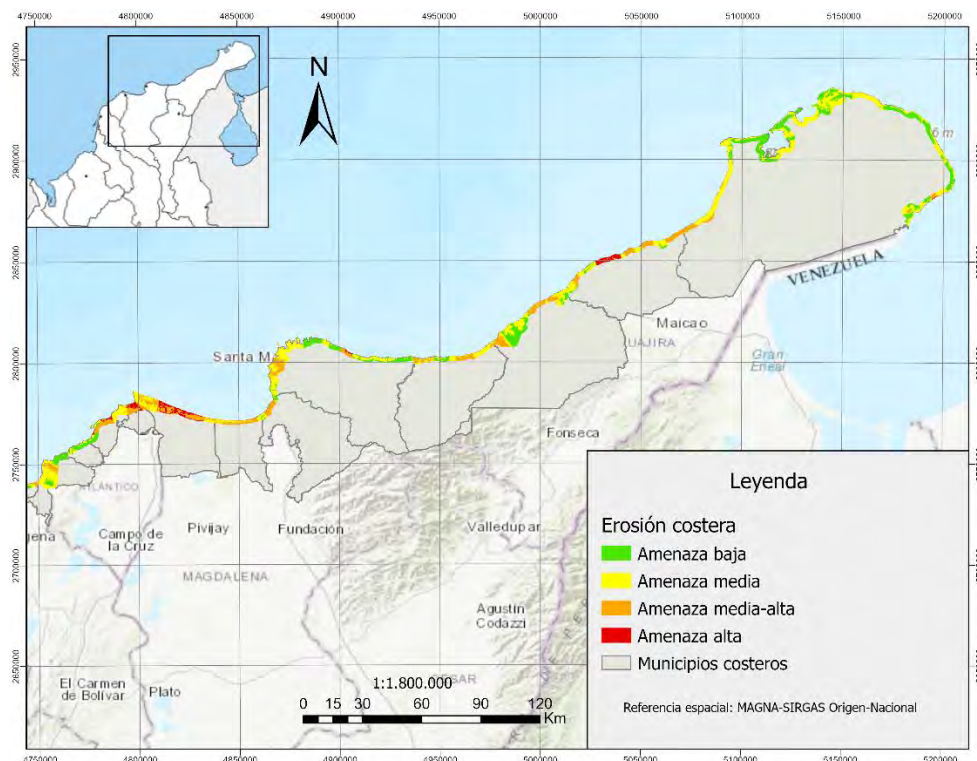


Figura 5-3. Mapa de amenaza por erosión costera-zona norte del Caribe.

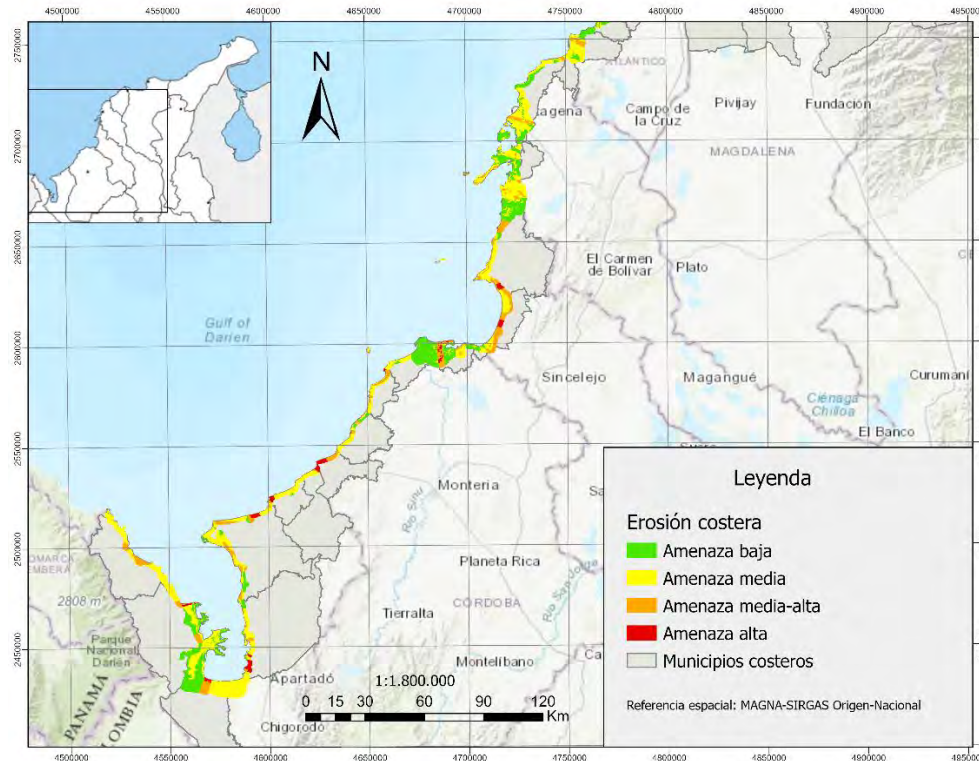


Figura 5-4. Mapa de amenaza por erosión costera-zona centro y sur del Caribe.

5.2.2. Mapa de amenaza por aumento del nivel medio del mar

Luego del procesamiento y organización de los datos, en la Tabla 5-1, se observa la tendencia a largo plazo calculada por la pendiente *Sen's* para cada punto ubicado a lo largo del Caribe Colombiano. Se estima que entre los años 1993-2015, el Caribe tiene en promedio una tasa de 3.31 mm/año con valores que van desde 2.28 mm/año, cerca de las costas de Ciénaga-Magdalena hasta 4.03 mm/año, frente a las costas de Necoclí-Antioquia. Por otra parte, en el mapa temático de la tasa de ascenso del nivel medio del mar (Anexo 9-3), se observa la ubicación de los 23 puntos de los cuales se extrajo la información satelital. A grandes rasgos, se evidencia que las mayores tasas de ascenso del nivel medio del mar (>3.5 mm/año) se registran en la alta Guajira, en una parte del golfo de Morrosquillo, en la línea costera del departamento de Córdoba y en el golfo de Urabá. Por su parte, las zonas que muestran menores tasas (<2.5 mm/año) corresponde a los municipios de Ciénaga y Pueblo Viejo en el departamento del Magdalena.

Tabla 5-1. Resumen de análisis MKT y Pendiente Sen's (tendencia de largo plazo)- Caribe Colombiano.

Puntos	Latitud	Longitud	Año inicial	Año final	Test Z	Pendiente Sen's (mm/año)
P1	12.625	-71.125	1993	2015	4.91	3.84
P2	12.625	-71.625	1993	2015	5.02	3.79
P3	12.625	-72.125	1993	2015	4.86	3.75
P4	12.125	-72.625	1993	2015	4.86	3.73
P5	11.875	-72.875	1993	2015	4.75	3.34
P6	11.625	-73.125	1993	2015	4.60	2.97
P7	11.375	-73.375	1993	2015	4.01	2.62
P8	11.375	-73.875	1993	2015	3.43	2.56
P9	11.375	-74.375	1993	2015	3.54	2.61
P10	11.125	-74.375	1993	2015	3.27	2.28
P11	11.125	-74.625	1993	2015	3.38	2.60
P12	11.125	-75.125	1993	2015	4.60	3.10
P13	10.875	-75.375	1993	2015	4.65	3.29
P14	10.625	-75.625	1993	2015	4.70	3.38
P15	10.375	-75.625	1993	2015	4.54	3.29
P16	10.125	-75.875	1993	2015	4.60	3.22
P17	9.875	-75.875	1993	2015	4.70	3.38
P18	9.625	-75.625	1993	2015	4.54	3.48
P19	9.375	-76.125	1993	2015	4.38	3.60
P20	9.125	-76.375	1993	2015	4.49	3.74
P21	8.875	-76.625	1993	2015	4.60	4.03
P22	8.625	-77.125	1993	2015	4.81	3.90
P23	8.375	-76.875	1993	2015	4.91	3.66

Nota: Todos los valores son significativos para un nivel de confianza del 99%, a excepción del valor en negrita, que es significativo para un nivel de confianza del 95%.

En el mapa de amenaza por aumento del nivel medio del mar (Figura 5-5 y 5-6), se observa que el área que abarca las zonas catalogadas con amenaza baja corresponde apenas al 0.56% (26.12 km²) del área total en estudio, le sigue la amenaza media con un 10.15% (470.89 km²), luego está el área de amenaza alta con un 28.98% (1344.1 km²) del área total y, por último, la amenaza media-alta con un porcentaje del 60.31% (2797.22 km²) del área de estudio.

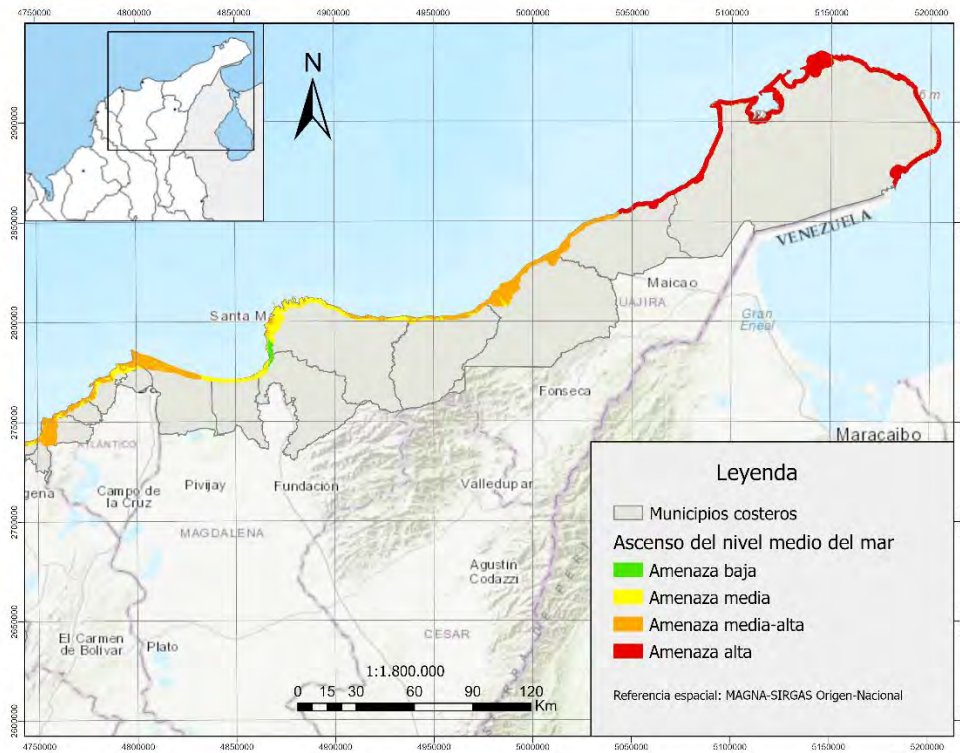


Figura 5-5. Mapa de amenaza por aumento del nivel medio del mar-zona norte del Caribe

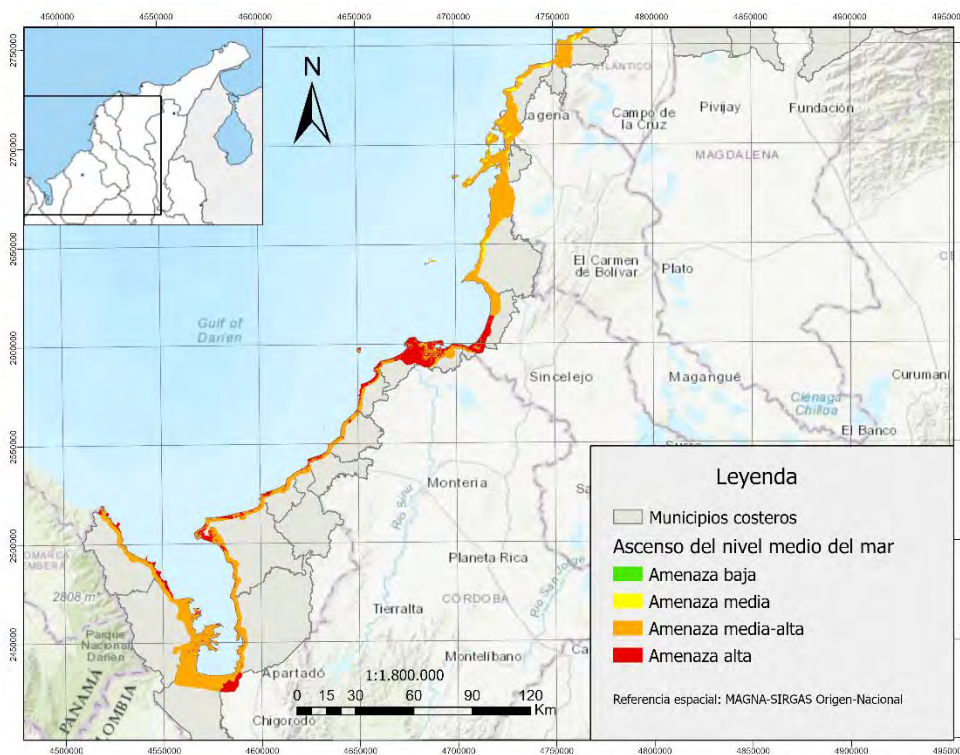


Figura 5-6. Mapa de amenaza por aumento del nivel medio del mar-zona centro y sur del Caribe

En la Figura 5-5 y Figura 5-6 se observa que las zonas donde hay mayor amenaza por aumento del nivel medio del mar corresponde a la alta Guajira, parte inferior del Golfo de Morrosquillo, municipios costeros de San Bernardo del Viento, San Antero y Moñitos en Córdoba, Necoclí en Antioquia, y las costas de Unguía y Acandí en el Chocó. Mientras que, las zonas de baja amenaza se ubican únicamente en el límite de los municipios de Ciénaga y Santa Marta en el departamento del Magdalena.

5.2.3. Mapa de amenaza por cambio en el flujo de energía del oleaje

En el mapa temático de porcentaje de cambio de energía del oleaje (Anexo 9-4) se evidencia mayor porcentaje de variación (9-12%) en la franja costera de La Guajira y a lo largo de la línea de costa de los municipios costeros de Atlántico y Magdalena. Por otra parte, los cambios menos significativos (0-3%) se registran en la franja costera desde Coveñas-Sucre hasta Necoclí-Antioquia.

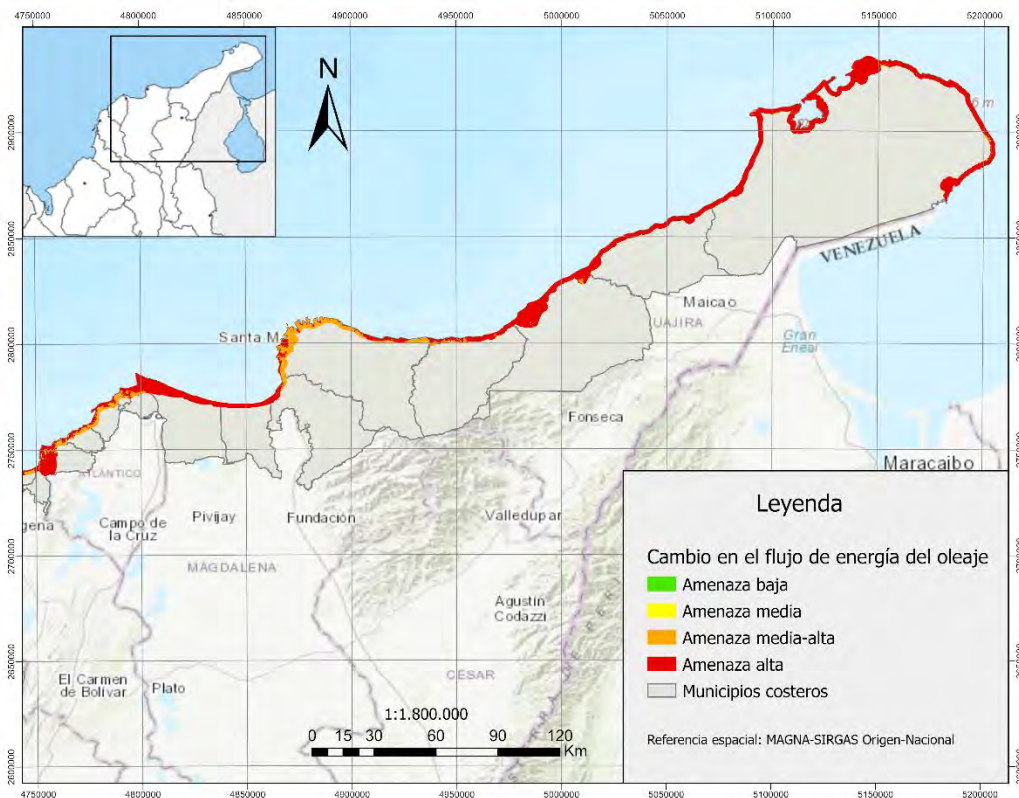


Figura 5-7. Mapa de amenaza por cambio en el flujo de energía del oleaje-zona norte del Caribe.

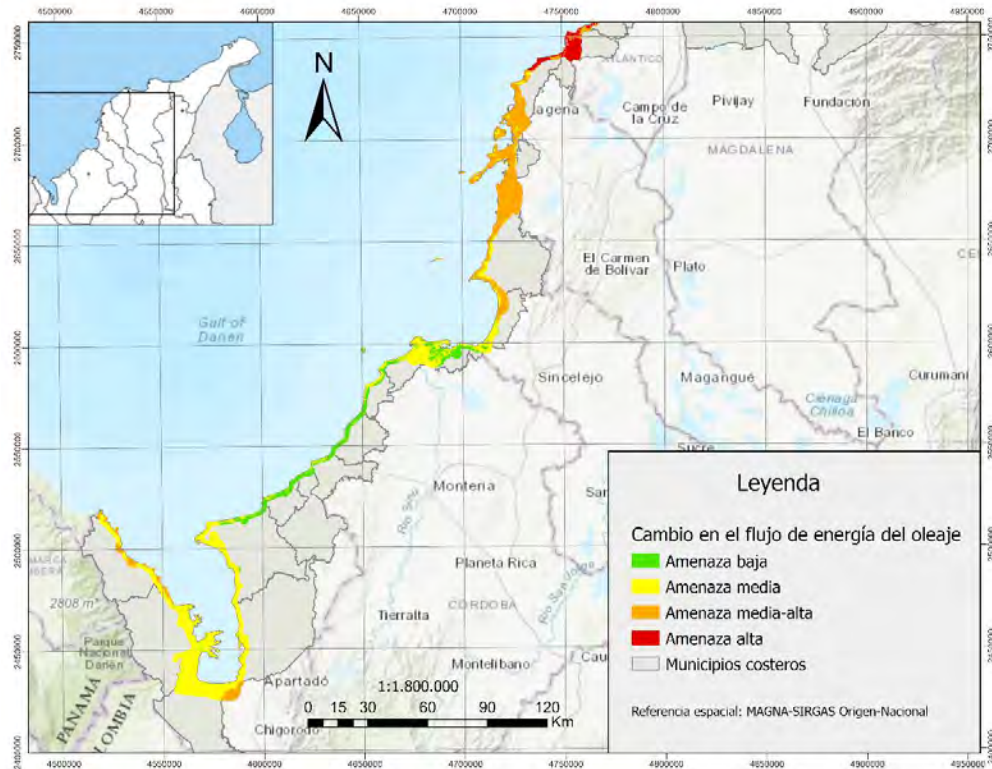


Figura 5-8. Mapa de amenaza por cambio en el flujo de energía del oleaje-zona centro y sur del Caribe.

Luego de superponer los mapas temáticos de porcentaje de cambio de energía del oleaje y elevación (Anexos 9-4 y Anexos 9-6), se generó el mapa de amenaza por cambio en el flujo de energía del oleaje (Figura 5-7 y Figura 5-8), el cual muestra que el mayor porcentaje del área total de estudio corresponde a la amenaza alta con un 37.85% (1755.48 km²), le sigue el área de amenaza media con un porcentaje de 29.35% (1361.23 km²), continúa el área de amenaza media-alta con un 25.92% (1202.32 km²) y finalmente, la amenaza baja con un 6.88% (319.31 km²) del área total de estudio. Además, se evidencia que la mayor parte de las líneas de costas de la zona norte del Caribe entran en la máxima categoría de amenaza, a excepción de pequeñas franjas en las ciudades de Santa Marta y Barranquilla, las cuales se categorizan como amenaza media-alta (Figura 5-7). En el caso de la zona centro y sur del Caribe, se puede observar 3 rangos de categorías, la categoría de amenaza media-alta se ve concentrada en las zonas costeras de los departamentos de Bolívar y Sucre. La categoría de amenaza media, por su parte, se localiza mayoritariamente en la zona costera de los departamentos del golfo de

Urabá y en San Bernardo del Viento-Córdoba. Por último, la amenaza baja se concentra en las costas del departamento de Córdoba, en Coveñas-Sucre y los municipios de Arboletes, San Juan de Urabá y Necoclí del departamento de Antioquia (Figura 5-7)

5.3. Mapa sinóptico de amenazas múltiples

La combinación de los mapas de amenaza por erosión costera, aumento del nivel medio del mar y flujo de energía del oleaje permitió integrar las 3 amenazas de estudio y zonificar el área de estudio con el propósito de determinar las zonas con diferentes grados de amenaza. Del área total de estudio incluida en este trabajo el 14.65% (678.28 km²) representa una zona de amenaza baja, el 42.71% (1977.93 km²) se cataloga como amenaza media, la amenaza media-alta cubre un 38.92% (1802.52 km²) y, por último, un 3.72% (172.24 km²) del área total corresponde a amenaza alta.

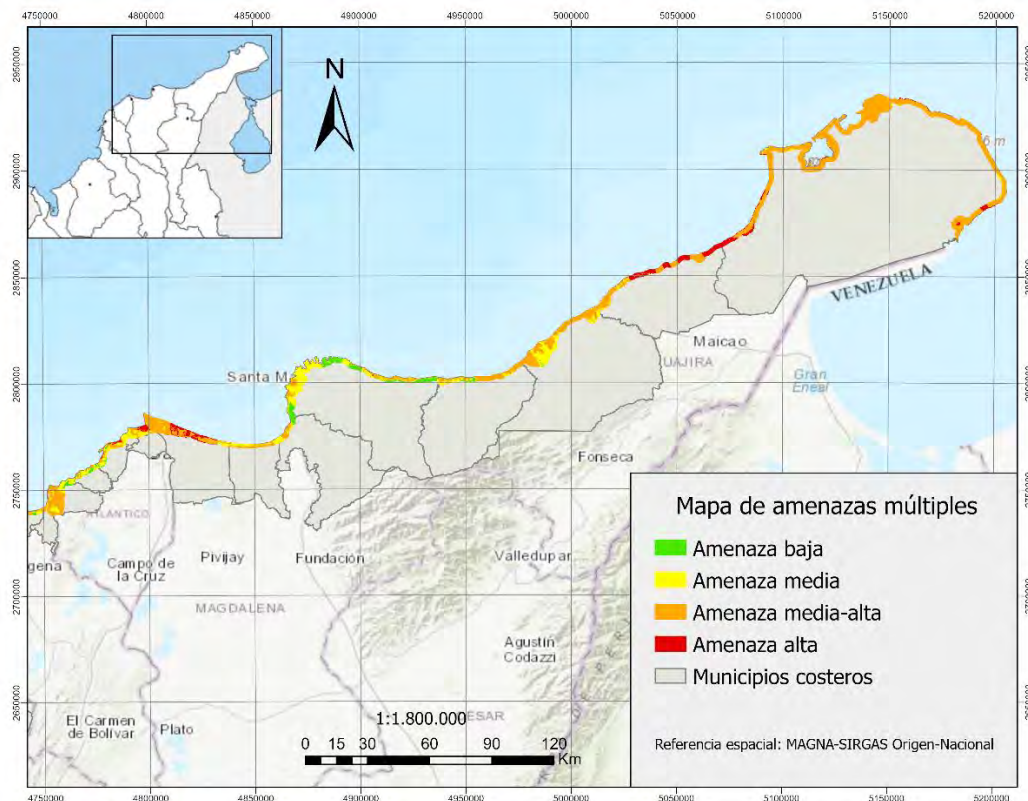


Figura 5-9. Mapa sinóptico de amenazas múltiples-zona norte Caribe.

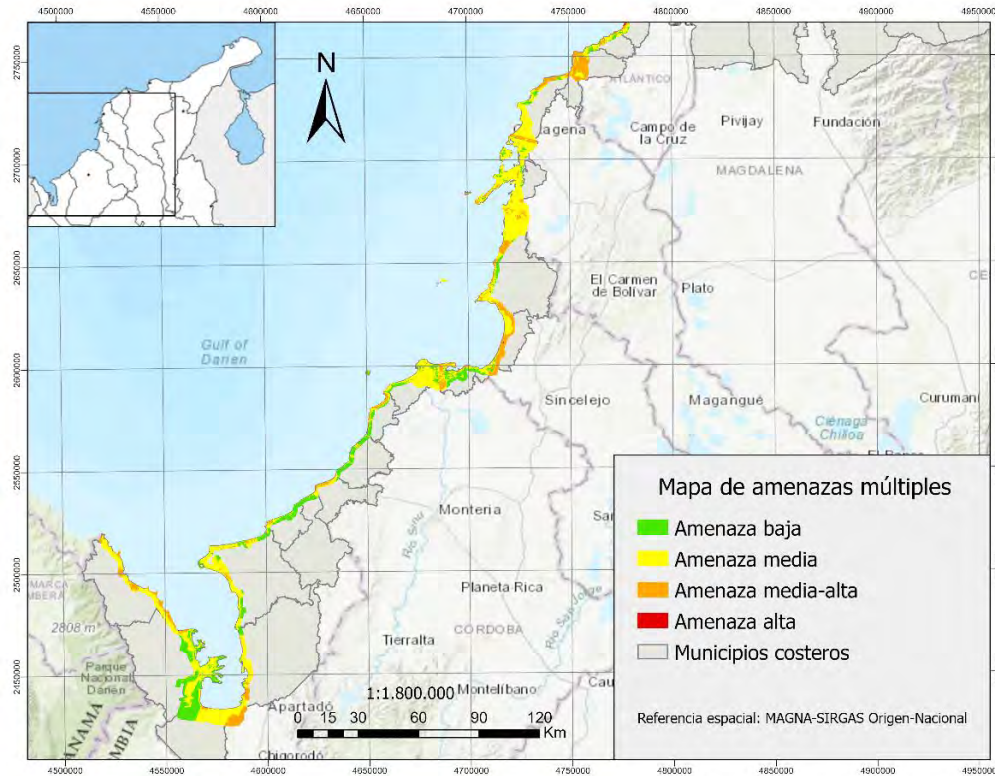


Figura 5-10. Mapa sinóptico de amenazas múltiples-zona centro y sur del Caribe.

Así mismo, se evidencia que en la zona costera del norte del Caribe predominan áreas con un nivel de amenaza de medio a alto. Sin embargo, existen áreas en el municipio de Manaure-La Guajira y Sitionuevo-Magdalena que se categorizan como amenaza alta. También, hay presencia de áreas en Riohacha, Santa Marta y Pueblo Nuevo que denotan amenaza media y baja (Figura 5-9). Respecto a las zonas costeras del centro del Caribe Colombiano, se logra apreciar que sobresalen áreas de amenaza media y unas pocas con niveles de amenaza baja y media alta en el golfo de Morrosquillo, Santa Catalina- Bolívar y Piojó-Atlántico. En el caso de la parte sur de las zonas costeras de la Región Caribe, se observa que prevalecen áreas extensas con amenaza baja y media. (Figura 5-10).

5.4. Mapa de vulnerabilidad

Para el mapa de vulnerabilidad se integra el mapa temático de localización de la infraestructura estratégica respecto a la costa y el mapa de geomorfología costera (Anexo 9-5 y 9-7). En el anexo 9-5 la infraestructura estratégica entra en 4 categorías de acuerdo con su distancia a la costa. La categoría con mayor número de infraestructuras corresponde al

rango de 170-250 m, ya que posee un porcentaje de 35.2 % del total de infraestructura, de este porcentaje el 27.3% representa infraestructura estratégica del sector educación, el 5.7% pertenece al sector salud y el 2.2% restante hace parte del sector energético. Luego, le sigue las categorías de 0-50 m y 50-100 m, ambas poseen el mismo porcentaje del 23.9% de la infraestructura estratégica total. La categoría de menor porcentaje es la que cubre el rango de 100-170 m con un porcentaje del 17%.

El mapa de vulnerabilidad permite ver el grado de vulnerabilidad de cada infraestructura estratégica respecto a su exposición (Figura 5-11). Para la zona costera evaluada se calculó el porcentaje de infraestructura estratégica que presenta determinado grado de vulnerabilidad. Para la vulnerabilidad baja, el porcentaje de infraestructura es de 4.5%; para la vulnerabilidad media, el porcentaje corresponde a un 14.8%, la vulnerabilidad media-alta, tiene la mayor cantidad de infraestructura estratégica con un porcentaje del 52.3%. Finalmente, en la categoría de vulnerabilidad alta se reúne un 28.4% de infraestructura.

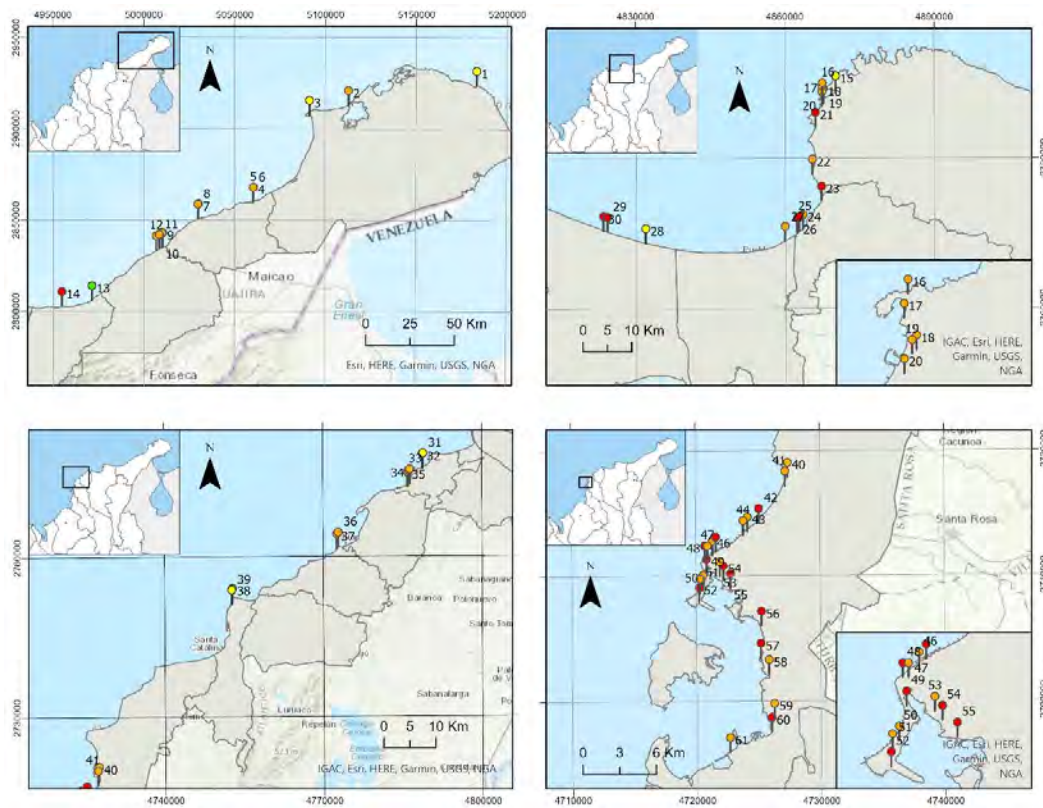


Figura 5-11. Mapa de vulnerabilidad por exposición

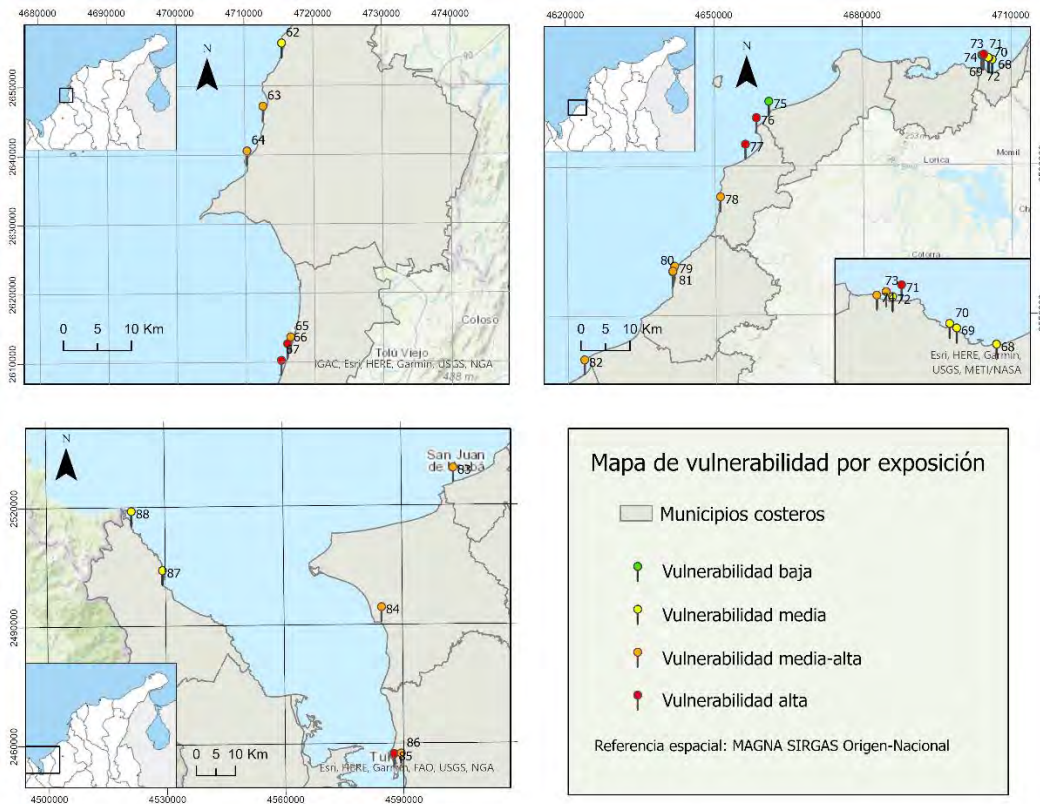


Figura 5-11. (Continuación). Mapa de vulnerabilidad por exposición.

5.5. Mapa de riesgo relativo

El mapa de riesgo relativo muestra el nivel de riesgo de las 88 infraestructuras estratégicas. Se estima que el 12.5% de toda la infraestructura en estudio se ubica dentro de la categoría de riesgo bajo. Por otra parte, un 32.9% corresponde a infraestructura estratégica en riesgo medio. Dentro de la categoría de riesgo media-alto, se encuentra el 34.1% de infraestructura, siendo esta categoría la de mayor cantidad de elementos. Por último, la categoría de mayor interés corresponde al riesgo alto, que posee un porcentaje del 20.5% del total de infraestructura. Este porcentaje equivale a una cantidad de 18 infraestructuras estratégicas que podrían requerir medidas de protección de manera inmediata. De estas, 8 pertenecen al sector de educación, 4 al sector salud, 4 al sector transporte y 2 al sector energético. Además, los departamentos que cuentan con mayor número de infraestructura estratégica en riesgo alto son La Guajira y Magdalena, con una cantidad de 4 en cada uno, le sigue los departamentos de Atlántico y Bolívar con 3 infraestructuras y los departamentos de Sucre y Córdoba con 2 (Figura 5-12).

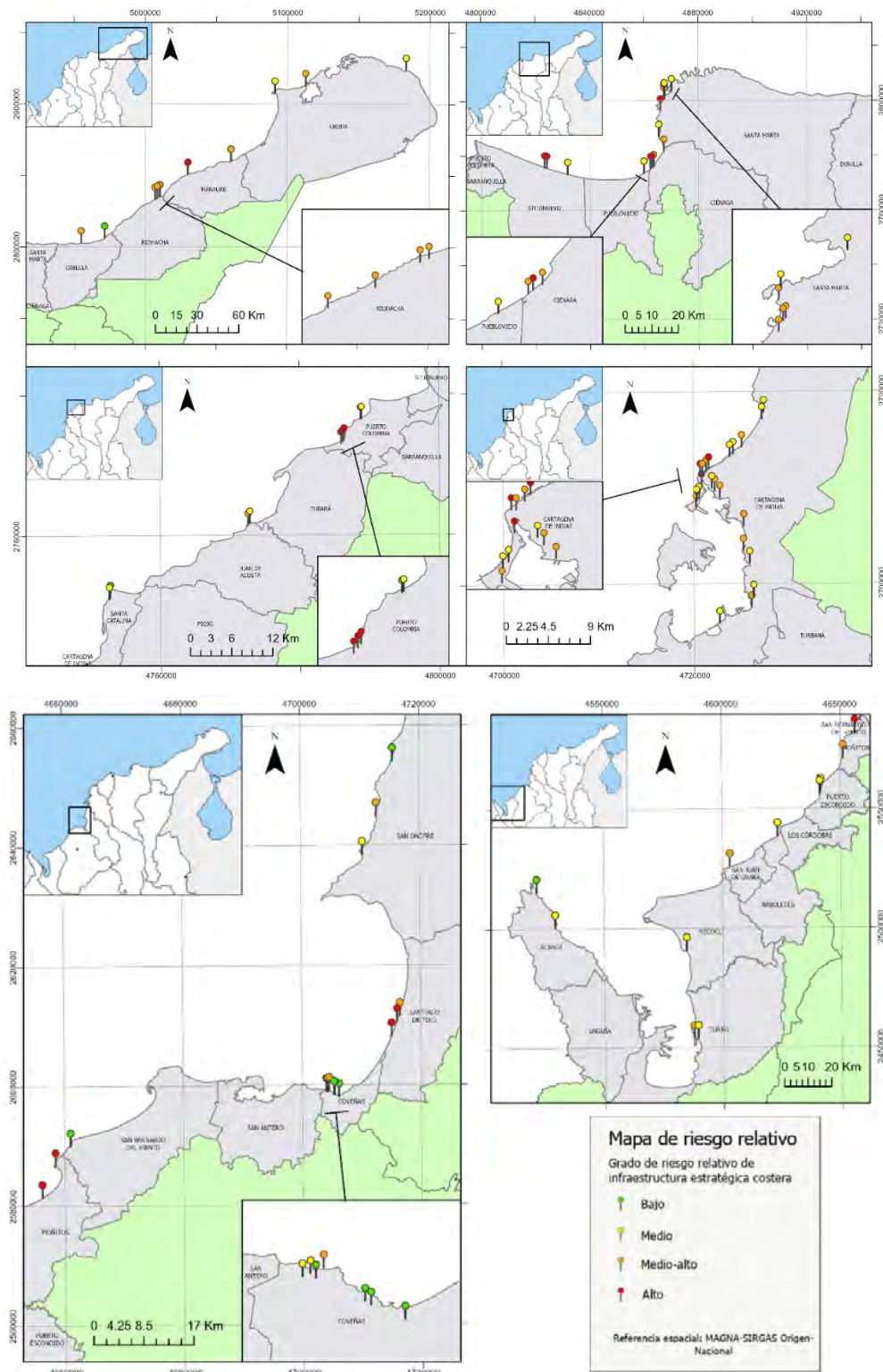


Figura 5-12. Mapa de riesgo relativo de infraestructura estratégica costera.

6. Discusiones

Las zonas costeras son escenarios muy dinámicos, donde influyen factores climáticos, oceanográficos y geológicos que constituyen la morfodinámica actual del litoral costero (Gutiérrez-Moreno et al., s.f.). La confluencia de estos factores hace propicio que estas áreas se vean amenazadas por diversos fenómenos naturales y sufran grandes presiones por parte de la actividad antrópica, especialmente por el desarrollo de actividades socio-económicas invasivas que le quitan espacio a la naturaleza para que ella misma se adapte a los cambios generados en su geomorfología. En consecuencia, debido a la creciente degradación de estas zonas costeras, cada vez se hace más necesario realizar estudios científicos orientados a la evaluación de riesgos y la preservación de ecosistemas y geoformas marinas-costeras. Garantizando una mejor gestión de riesgos a través del conocimiento previo de las amenazas y condiciones que hacen propenso un lugar a sufrir daños y pérdidas.

Del área total de estudio incluida en este trabajo se estimó que un 3.72% (172.24 km²) del área total corresponde a amenaza alta. Este último valor representa, precisamente, el área que requiere mayores estudios y medidas específicas que ayuden a minimizar el impacto de amenazas, ya que, de manera general, no es posible evitar la ocurrencia de estos fenómenos. De igual forma, es indispensable implementar medidas urgentes de protección costera en las zonas donde se ubica infraestructura estratégica con un alto nivel de riesgo. Estas infraestructuras corresponden a las indicadas en la Tabla 6-1.

Dentro de los indicadores influyentes se destaca la geomorfología costera, ya que todas las infraestructuras estratégicas de mayor riesgo se localizan en las áreas geomorfológicamente más vulnerables. En esta categoría se incluye las áreas urbanas, playas, playones, lagunas costeras, relleno antrópico, cordón litoral, espigas, islas y barras de arenas. Además, se denota que este alto nivel de riesgo se asocia a intervenciones de índole antropogénica, ya que muchas de estas infraestructuras en alto riesgo están relacionadas a impactos negativos de obras de protección costera mal implementadas (Figura 6-1), como es el caso de las infraestructuras ubicadas en Puerto Colombia y Cartagena, en donde la construcción de protección costera dura como espolones y rompeolas, ha traído problemas de desbalance sedimentario (Anexos 9-8).

Tabla 6-1 Infraestructura estratégica costera en alto riesgo

Nombre	Municipio	Departamento
E.S.E. Hospital de Puerto Colombia	Puerto Colombia	Atlántico
Inst. Educativa Técnica Comercial Diversificada Francisco Javier Cisneros	Puerto Colombia	Atlántico
Colegio La Sabiduría	Puerto Colombia	Atlántico
Hospital Naval de Cartagena	Cartagena	Bolívar
Institución Universitaria Mayor de Cartagena	Cartagena	Bolívar
Colegio Naval Crespo	Cartagena	Bolívar
Institución Educativa La Rada	La Rada, Moñitos	Córdoba
E.S.E Camu Moñitos	Moñitos	Córdoba
Hospital Armando Pabón López	Manaure	La Guajira
Institución Sagrado Corazón de Jesús	Manaure	La Guajira
Estación Complejo Ballena	El Pájaro- Manaure	La Guajira
Gasoducto troncal Ballena-Cartagena-Jobo (Promigas)	El Pájaro- Manaure	La Guajira
Universidad Jorge Tadeo Lozano	Rodadero- Santa Marta	Magdalena
Institución Educativa Alianza	Ciénaga	Magdalena
Carretera troncal del caribe km 19 vía Barranquilla-Ciénaga	Sitionuevo	Magdalena
Carretera troncal del caribe km 20 vía Barranquilla-Ciénaga	Sitionuevo	Magdalena
Aeropuerto Golfo de Morrosquillo	Santiago de Tolú	Sucre
Puerto Compas Tolú	Santiago de Tolú	Sucre

Lastimosamente, las estructuras duras han sido la primera estrategia de gestión para problemas de erosión costera en el Caribe, construidas de manera empírica y sin conocimiento de su funcionalidad y los posibles impactos negativos que trae, como la interrupción de la deriva litoral por la acumulación de sedimentos en una parte de la estructura y el déficit de sedimentos aguas abajo (Rangel-Buitrago et al., 2017). Por ello, es importante empezar a considerar la implementación de soluciones basadas en la naturaleza, o en su defecto, implementar estructuras híbridas que combinen los beneficios tanto de estructuras naturales como de estructuras grises/duras. No obstante, el tipo de solución implementada depende de varios factores que incluye aspectos sociales, económicos y si las condiciones naturales del lugar son viables para su implementación.



Figura 6-1. Infraestructuras estratégicas en riesgo. a) Carretera troncal del caribe km 19 vía Barranquilla-Ciénaga (El Tiempo, 2021). b). Aeropuerto Golfo de Morrosquillo (Tolú-Sucre). c) Aeropuerto Internacional Rafael Núñez (Cartagena-Bolívar).

Por otra parte, las amenazas costeras que se tuvieron en cuenta en esta investigación han sido ampliamente estudiadas. Para el caso de la erosión costera, una de las principales amenazas que tiene incidencia en el Caribe, varios autores han determinado que la evolución y reducción de esta zona litoral depende de varios procesos oceanográficos y geológicos, entre los que se encuentra el balance sedimentario, anomalías climáticas y la alteración (física y química) de las rocas (Gutiérrez-Moreno et al., s.f.; García-Echevarría, 2021). Si comparamos el mapa de amenaza por erosión costera (Figura 5-3, Figura 5-4) con el trabajo realizado por Rangel-Buitrago et al. (2015) para el periodo de 1983-2013, nos damos cuenta que se coincide en sectores que muestran alta erosión, por ejemplo, el tramo que abarca la línea de costa de los municipios de Ciénaga, Pueblo Viejo y Sitionuevo en el departamento de Magdalena, las costas de Salgar y Barranquilla-Atlántico, la línea de costa Los Córdoba-Córdoba, parte del municipio de Tolú en Sucre y una franja de las costas de Manaure en La Guajira. Asimismo, en el PNIEC presentado por el INVEMAR, se declaran como puntos críticos, que requieren una intervención a corto-mediano plazo, a el km 19 de la vía

Barranquilla-Ciénaga, la barra de la ciénaga de Mallorquín en Barranquilla, la zona entre Sabanilla y Salgar en Atlántico, el sector de Minuto y Puerto Rey en el municipio de Los Córdoba en Córdoba, el casco urbano de Tolú-Sucre, el sector Pájaro (San Tropel) en Manaure- La Guajira, entre otros (Guzmán et al., 2008).

Respecto al nivel del mar, se ha establecido que sus cambios son atribuidos a diferentes factores, entre ellos la expansión térmica, es decir, el cambio de volumen debido a la variación mínima de la temperatura del océano. También, influye la fusión de los glaciares de montaña y de los casquetes de hielo, la modificación del almacenamiento de agua terrestre como extracción de acuíferos y construcción de embalses, cambios en la dinámica atmosfera-océano en las escalas temporales estacional, interanual y decenal y, por último, los movimientos verticales en tierra firme, provocados por procesos geológicos que hacen que en algunas zonas se experimenten tasas de hundimiento mayores debido a la combinación de ascenso del nivel del mar y subsidencia (IDEAM, 2010). Con los datos utilizados en este estudio, se estimó que entre los años 1993-2015, el Caribe Colombiano tiene en promedio una tasa de 3.31 mm/año de ascenso del nivel medio del mar, un valor que concuerda con el rango de ascenso de $2,5 \pm 1,3$ mm/año reportado por Torres & Tsimplis (2013) para el periodo de 1993-2010 en toda la cuenca Caribe.

En relación al cambio en el flujo de energía del oleaje, se estima que sus valores han mostrado un descenso en los últimos años para la zona Caribe Colombiana. Esta tendencia coincide con registros de disminución de la altura del oleaje en el Caribe y variaciones en los patrones de velocidad del viento (Orejarena-Rondón et al., 2022). El estudio del flujo de energía del oleaje es importante para determinar el potencial que tiene Colombia en el aprovechamiento de energía no convencional de los océanos. Torres y Andrade (2006) establecen que los sectores al norte de la Península de la Guajira y Bocas de Ceniza en Barranquilla cuentan con un gran potencial en los valores de flujo promedio de energía del oleaje. Estos sectores identificados, al mismo tiempo, coinciden con las áreas que registran mayores variaciones en el porcentaje de cambio en el flujo de energía del oleaje (10-12%).

7. Conclusiones y consideraciones

El estudio de amenazas y vulnerabilidades son indispensables para la evaluación de riesgos costeros a lo largo de la zona litoral del Caribe Colombiano. Dicha evaluación representa un paso importante en la gestión del riesgo de desastres, específicamente en la etapa previa, que consiste en prevenir, mitigar, preparar y alertar de posibles daños generados a la población, bienes y servicios. De esta manera, se contribuye a que el grado de pérdidas esperadas ante un suceso potencialmente peligroso, sea menor. En este caso, los elementos en riesgo estudiados corresponden a las infraestructuras estratégicas, las cuales son esenciales para el funcionamiento normal de la sociedad. A partir de la elaboración de mapas de amenazas costeras y vulnerabilidad por exposición, se estableció que, de las 88 infraestructuras estratégicas identificadas, 11 tienen una etiqueta de riesgo relativo bajo, 29 son consideradas de riesgo medio, 30 entran en la categoría de riesgo medio-alto y 18 son infraestructuras que están en alto riesgo relativo. Estas últimas requieren medidas de intervención inmediata que garantice su protección ante amenazas costeras, ya que su afectación podría traer problemas relacionados a la interrupción de funciones en el sector energético, hospitalario, educativo y de transporte. Finalmente, se sugiere que, de acuerdo a las condiciones y características del entorno donde se ubican estas infraestructuras, se implementen medidas efectivas que, en lo posible, no afecten negativamente la geomorfología natural de la costa.

Si bien, la aproximación de estudios de riesgos costeros desde el uso de herramientas y de Sistemas de Información Geográficos son importantes para la realización de mapeos y zonificación de riesgo, también se hace indispensable un trabajo de campo, que permita, por ejemplo, verificar ciertos indicadores tomados en cuenta en el estudio. Además, para realizar un estudio más completo de riesgos, es necesario tomar en cuenta otros indicadores como la vulnerabilidad física y social de las infraestructuras estratégicas.

8. Bibliografía

- Agudelo, P., Restrepo, A. F., Molares, R., Tejada, C. E., Torres, R., y Osorio A. F. (2006). Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el caribe colombiano. *Boletín CIOH*, 23.
- Alaska Satellite Facility [ASF]. (s.f.). Alos Palsar>About. <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/alos-palsar-about/>
- Alcaraz, C., & Zeadally, S. (2015). Critical infrastructure protection: Requirements and challenges for the 21st century. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 8, 53-66. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2014.12.002>
- Allen, T. R., Crawford, T., Montz, B., Whitehead, J., Lovelace, S., Hanks, A. D., ... Kearney, G. D. (2018). Linking Water Infrastructure, Public Health, and Sea Level Rise: Integrated Assessment of Flood Resilience in Coastal Cities. *Public Works Management & Policy*, 1087724X1879838. doi:10.1177/1087724x18798380
- Alonso, D., Vides, M., y Londoño, M. (2001). Amenazas y riesgos ambientales de la zona costera Colombiana. *Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia*. Invemar.
- Avendaño, J., Rodríguez Rodríguez, A., y Gómez López, D. I. (2019). Servicios Ecosistémicos Marinos y Costeros de Colombia: Énfasis en Manglares Y Pastos Marinos. Invemar.
- Ávila-Bernal, S. M. (2021). Administración de la infraestructura estratégica en el Sector Defensa de Colombia. Relación con la estrategia adoptada por España. *Revista Estrategia Organizacional*, 10(1). <https://doi.org/10.22490/25392786.4552>
- Ávila-Toscano, J. H., Vivas Cortés, O. A., Herrera Flórez, A., y Jiménez Díaz, M. (2016). Gestión del riesgo de desastres en el Caribe colombiano desde la óptica de organismos de socorro y administraciones locales: el caso del sur de Atlántico. *Revista Luna Azul*, 42, 68-88. http://vip.ucaldas.edu.co/lunazul/index.php?option=com_content&view=article&id=129
- Benassai, G., Di Paola, G., & Aucelli, P. P. C. (2015). Coastal risk assessment of a micro-tidal littoral plain in response to sea level rise. *Ocean & Coastal Management*, 104, 22-35. doi:10.1016/j.ocecoaman.2014.11.015.
- Cardona, O. D., Van Aalst, M. K., Birkmann, J., Fordham, M., Mc Gregor, G., Rosa, P., Pulwarty, R. S., Schipper, E. L. F., Sinh, B. T., Décamps, H., Keim, M., Davis, I., Ebi, K. L., Lavell, A., Mechler, R., Murray, V., Pelling, M., Pohl, J., Smith, A. O., & Thomalla, F. (2012). Determinants of risk: Exposure and vulnerability. In *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 9781107025066, pp. 65-108). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.005>
- Cendrero, A., Sánchez-Arcilla Conejo, A., y Zazo Cardeña, C. (2005): Impactos sobre las zonas costeras. En, J. Moreno (Ed.), Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. Ministerio de Medio Ambiente – UCLM, Madrid, 469-524 pp.
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe [CIOH] (s.f.). Climatología del caribe. *CIOH* *Org-Oceanografía* *operacional*. <https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/ClimatologiaCaribe5.php>
- Cybersecurity and Infrastructure Security Agency [CISA]. (s.f.). Critical Infrastructure sectors. <https://www.cisa.gov/critical-infrastructure-sectors>
- Cybersecurity and Infrastructure Security Agency [CISA]. (s.f.). National Infrastructure Protection Plan. <https://www.cisa.gov/national-infrastructure-protection-plan>
- Dawson, D., Shaw, J., & Roland Gehrels, W. (2016). Sea-level rise impacts on transport infrastructure: The notorious case of the coastal railway line at Dawlish, England. *Journal of Transport Geography*, 51, 97-109. doi:10.1016/j.jtrangeo.2015.11.00

- De Andrés, M., y Barragán, J. M. (2016): Desarrollo Urbano en el Litoral a Escala Mundial. Método de Estudio para su Cuantificación. *Revista de Estudios Andaluces*, vol. 33 (1), 64-83. <http://dx.doi.org/10.12795/rea.2016.i33.04>
- El Tiempo (2021). Unos 30 mil metros cúbicos de piedra serán utilizados en el kilómetro 20 [Fotografía]. La erosión costera amenaza la vía Barranquilla-Ciénaga. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/el-mar-erosiona-el-km-19-de-la-via-cienaga-barranquilla-589668>
- Esri (s.f.). Cómo funciona Kriging—Ayuda.. Arcgis for Desktop <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>
- European Commission (s.f.). Critical Infrastructure. https://ec.europa.eu/home-affairs/pages/page/critical-infrastructure_es
- Fabbri, K. P. (1998). A methodology for supporting decision making in integrated coastal zone management. *Ocean & Coastal Management*, 39(1-2), 51–62. doi:10.1016/s0964-5691(98)00013-1.
- García-Echevarría, M. (2021). Vulnerabilidad costera en cuatro sitios del suroeste del Caribe Colombiano ante el ascenso del nivel del mar. [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia.
- Giannopoulos, G., Dorneanu, B., & Jonkeren, O. (2013). Risk assessment methodology for critical infrastructure protection. *JRC—Scientific and Policy Report, European Commission; JRC: Ispra, Italy.*
- González, J. C. (3 de diciembre de 2019). Infraestructuras críticas: definiendo los sectores para su protección en Colombia. *Segurilatam*. https://www.segurilatam.com/seguridad-por-sectores/infraestructuras-criticas/infraestructuras-criticas-definiendo-los-sectores-para-su-proteccion-en-colombia_20191203.html
- Griggs, G. (2020). Coastal airports and rising sea levels. *Journal of Coastal Research*, 36(5), 1079. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-20A-00004.1>
- Guerrero, A., Vásquez, L., y Sánchez, R. (2017). Banco de escenarios tsunami para el Caribe colombiano: caso de estudio, Cartagena de Indias. *Bol. Cient. CIOH* (35):63-79. ISSN 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.432
- Gutiérrez-Moreno, L. C., Gutiérrez-Rojas, Y., Noriega, O., Rangel-Buitrago, N., Fonseca, C., Ortega, E., y García, H. (s.f.) Erosión Costera. Caracterización, Diagnóstico y Análisis de Vulnerabilidades y Amenazas en el Departamento del Magdalena. *CORPAMAG—UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO*. https://www.corpamag.gov.co/archivos/riesgosAmbientales/2017_Doc04_ErosionCostera.pdf
- Guzmán, W., Posada, B. O., Guzmán, G., y Morales, D. (2008). Programa Nacional de Investigación para la Prevención, Mitigación y Control de la Erosión Costera en Colombia-PNIEC: Plan de Acción 2009-2019. INVEMAR. 72p.
- Iguarán, A. (11 de Marzo de 2021). Intervienen enrocado en km 19 para evitar colapso de la vía por la erosión. *El Heraldo*. <https://www.elheraldo.co/magdalena/intervienen-enrocado-en-km-19-para-evitar-colapso-de-la-por-la-erosion-800582>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2001). Vulnerabilidad y adaptación de la zona costera Colombiana al ascenso acelerado del Nivel del Mar. [https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-library/latin-america-and-caribbean/venezuela-amp-colombia/IDEAM.--2001.--Colombian-Coastal-Zone-Vulnerability--Adaptation-to-SLR.--\[ESP\].pdf](https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-library/latin-america-and-caribbean/venezuela-amp-colombia/IDEAM.--2001.--Colombian-Coastal-Zone-Vulnerability--Adaptation-to-SLR.--[ESP].pdf)
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (1998). Generalidades del efecto del fenómeno frío del Pacífico (La niña). *Capítulo 4*. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005192/nina/capitulo4.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2010). Sistemas Morfogénicos del Territorio Colombiano. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. ISBN - 978-958-8067-26-1.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] (2010). Análisis de las tendencias del nivel del mar a nivel local y su relación con las tendencias mostradas por los modelos internacionales. IDEAM—METEO/020-2010. Nota técnica.

- <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/23877/TENDENCIAS+DEL+NIVEL+DEL+MAR.pdf/2fc812e5-d4e4-4628-ac61-a5b34aa500f1>.
- INVEMAR. (2017). Análisis de vulnerabilidad marino costera e insular ante el cambio climático para Colombia como insumo para la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.
- IOC/UNESCO, IMO, FAO, UNDP (2011): "A Blueprint for Ocean and Coastal Sustainability". An inter-agency paper towards the preparation of the UN Conference on Sustainable Development (Rio+20), Paris: IOC/UNESCO. pp42.
- Klein, R., & Nicholls, R. (1999). Assessment of Coastal Vulnerability to Climate Change. *AMBIO A Journal of the Human Environment, Volumen (28)*, 182-187.
- Lisa Institute (2019). Infraestructuras críticas: definición, planes, riesgos, amenazas y legislación. <https://www.lisainstitute.com/blogs/blog/infraestructuras-criticas>.
- Masria, A., Negm, A., Iskander, M., & Saavedra, O. (2014). *Coastal Zone Issues: A Case Study (Egypt)*. *Procedia Engineering, 70*, 1102–1111. doi:10.1016/j.proeng.2014.02.122
- Mitchell, M., Isdell, R. E., Herman, J., & Tombleson, C. (2021). Impact assessment and management challenges of key rural human health infrastructure under sea level rise. *Frontiers in Marine Science, 8*, 631757. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.631757>
- Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., & Nicholls, R. J. (2015). *Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment*. *PLOS ONE, 10(3)*, e0118571. doi:10.1371/journal.pone.0118571
- Orejarena-Rondón, A. F., Sayol, J. M., Marcos, M., Otero, L., Restrepo, J. C., Hernández-Carrasco, I., & Orfila, A. (2019). Coastal impacts driven by sea-level rise in Cartagena de Indias. *Frontiers in Marine Science, 6*, 614. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00614>
- Orejarena-Rondón, A. F., Restrepo, J. C., Correa-Metrio, A., & Orfila, A. (2022). Wave energy flux in the Caribbean Sea: Trends and variability. *Renewable Energy, 181*, 616-629. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.081>
- Osorio, A. F., Mesa, J. C., Bernal, G. R., y Montoya, R. D. (2009). Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el mar Caribe colombiano empleando el modelo WWIII y diferentes fuentes de datos. *Boletín Científico CIOH No. 27*, ISSN 0120-0542, 37-56
- Posada, B. O., y Henao, W. (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. *INVEMAR*, Serie Publicaciones Especiales No. 13, Santa Marta.
- Poveda, G., Waylen, P. R., & Pulwarty, R. S. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 234(1)*, 3–27. doi:10.1016/j.palaeo.2005.10.031
- Ramírez-Chávez, E. (2010). Estimación de la vulnerabilidad costera ante amenazas hidrometeorológicas de la franja Tijuana-Ensenada [Tesis de maestría]. El Colegio de la Frontera Norte (El COLEF).
- Rangel-Buitrago, N. G., Anfuso, G., & Williams, A. T. (2015). Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean & Coastal Management, 114*, 129–144. doi:10.1016/j.ocecoaman.2015.06.024.
- Rangel-Buitrago, N., Williams, A. T., & Anfuso, G. (2017). 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. doi:10.1016/j.ocecoaman.2017.04.006
- Restrepo, J. C., Otero, L., Casas, A. C., Henao, A., & Gutiérrez, J. (2012). Shoreline changes between 1954 and 2007 in the marine protected area of the Rosario Island Archipelago (Caribbean of Colombia). *Ocean & Coastal Management, 69*, 133–142. doi:10.1016/j.ocecoaman.2012.07.027
- Restrepo, J. D., & López, S. A. (2008). Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences, 25(1)*, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.09.002>
- Semana (6 de Agosto de 2010). El mar sitia a Cartagena. *Semana*. <https://www.semana.com/el-mar-sitia-cartagena/120239-3/>

- Taborda-Herrera, H. (10 de enero de 2020). Marea alta y fuerte oleaje contra la ciudad. *El Universal*. <https://www.eluniversal.com.co/cartagena/marea-alta-y-fuerte-oleaje-contra-la-ciudad-XE2226752>
- Talavera-Déniz, E. (2011). Análisis y determinación de vulnerabilidad costera mediante CVI de la mitad sur de la isla de Gran Canaria [Tesis de maestría]. Universidad de las Palmas de Gran Canaria.
- Taylor, S. (2021). The Vulnerability of Health Infrastructure to the Impacts of Climate Change and Sea Level Rise in Small Island Countries in the South Pacific. *Health Services Insights*, 14, 117863292110208. doi:10.1177/11786329211020857
- Torres, R. R. y Andrade, C. A. (2006). Potencial en Colombia para el Aprovechamiento de la Energía no Convencional de los Océanos. *Boletín Científico CIOH* 24 ISSN 0120-0542, 11-25. https://doi.org/10.26640/01200542.24.11_25.
- Torres, R. R., & Tsimplis, M. N. (2013). Sea-level trends and interannual variability in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(6), 2934–2947. doi:10.1002/jgrc.20229
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction Secretariat [UNISDR] (2009). Terminology on Disaster Risk Reduction. United Nations International Strategy for Disaster Reduction, Geneva, Switzerland. [unisdr.org/en/library/lib-terminology-eng.htm](https://www.unisdr.org/en/library/lib-terminology-eng.htm).
- United States Geological Survey [USGS] (s.f). National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Atlantic Coast. <https://pubs.usgs.gov/of/1999/of99-593/pages/cvi.html>.
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. doi:10.1080/01431160600589179
- Yue S., Pilon, P., & Cavadias, G. (2002). Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho test to detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259(1), 254-271.

9. Anexos

Anexos 9-1. Inventario de infraestructura estratégica costera en riesgo.

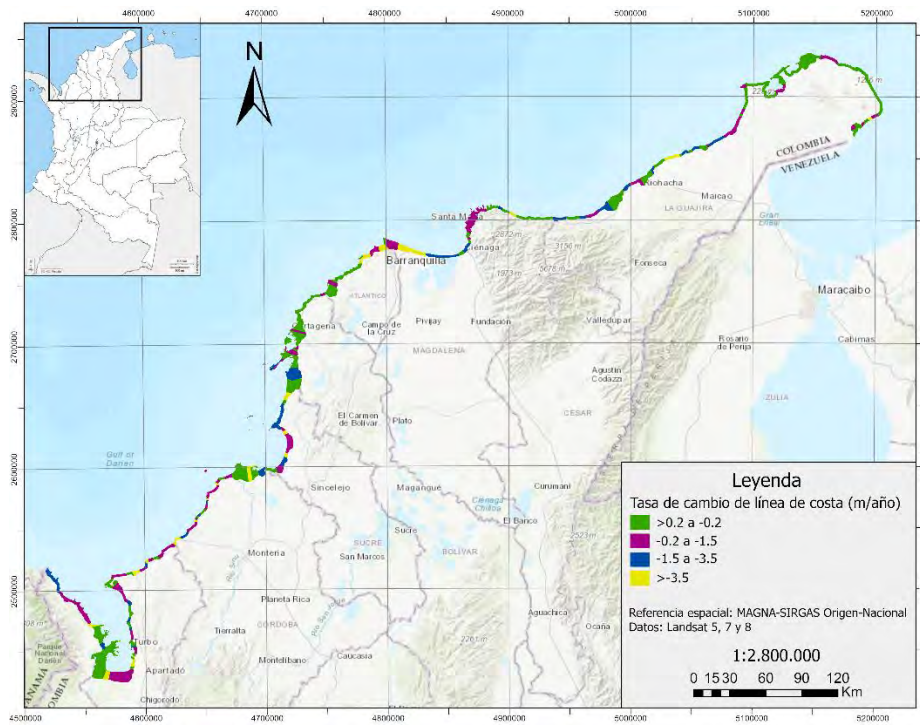
Numeración	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Nombre	Municipio	Departamento	Servicio	Distancia al mar	Año
1	12.352	-71.312	Centro de salud Puerto Estrella	Puerto Estrella- Uribia	La Guajira	Salud	69 m	2021
2	12.256	-71.963	Puerto Bolívar (Cerrejón)- La Guajira	Uribia	La Guajira	Transporte	0 m	2021
3	12.208	-72.161	Centro etnoeducativo integral Rural Uchitu'u	Cabo de la vela- Uribia	La Guajira	Educación	218 m	2021
4	11.779	-72.445	Hospital Armando Pabón López	Manaure	La Guajira	Salud	67 m	2021
5	11.779	-72.446	Institución Sagrado Corazón de Jesús	Manaure	La Guajira	Educación	54 m	2021
6	11.778	-72.446	Institución Educativa Urbana Mixta No 1	Manaure	La Guajira	Educación	145 m	2021
7	11.696	-72.724	Estación Complejo Ballena	El Pájaro- Manaure	La Guajira	Energía	103 m	2021
8	11.695	-72.726	Gasoducto Troncal Ballena-Cartagena-Jobo (Promigas)	El Pájaro- Manaure	La Guajira	Energía	169 m	2021
9	11.554	-72.905	Institución Educativa Divina Pastora	Riohacha	La Guajira	Educación	216 m	2021
10	11.553	-72.908	Institución Educativa Sagrada Familia	Riohacha	La Guajira	Educación	242 m	2021
11	11.545	-72.922	Institución Educativa José Antonio Galán	Riohacha	La Guajira	Educación	220 m	2021
12	11.538	-72.937	Institución Educativa Distrital Familia de Nazareth	Riohacha	La Guajira	Educación	65 m	2021
13	11.292	-73.263	Institución Educativa Rural Miguel Pinedo Barros	Punta de los remedios- Dibulla	La Guajira	Educación	230 m	2021
14	11.262	-73.415	Termoguajira	Dibulla	La Guajira	Energía	65 m	2021
15	11.268	-74.190	Escuela mixta María Auxiliadora	Taganga- Santa Marta	Magdalena	Educación	173 m	2021

16	11.255	-74.215	Terminal de gránales líquidos del Caribe S.A.S. – TERLICA S.A.S.	Santa Marta	Magdalena	Transporte	29 m	2021
17	11.250	-74.215	Puerto de Santa Marta	Santa Marta	Magdalena	Transporte	0 m	2021
18	11.244	-74.213	Colegio Parroquial de Bachillerato Comercial	Santa Marta	Magdalena	Educación	249 m	2021
19	11.243	-74.214	Instituto Mixto Los Cariñositos	Santa Marta	Magdalena	Educación	204 m	2021
20	11.239	-74.215	Colegio Cristiano La Esperanza	Santa Marta	Magdalena	Educación	245 m	2021
21	11.202	-74.227	Universidad Jorge Tadeo Lozano	Rodadero- Santa Marta	Magdalena	Educación	96 m	2021
22	11.117	-74.233	Aeropuerto Internacional Simón Bolívar	Santa Marta	Magdalena	Transporte	42 m	2021
23	11.068	-74.216	Muelle Carbonero (Drummond)	Ciénaga	Magdalena	Transporte	25 m	2021
24	11.017	-74.250	Institución Educativa La María	Ciénaga	Magdalena	Educación	214 m	2021
25	11.013	-74.257	Institución Educativa Alianza	Ciénaga	Magdalena	Educación	77 m	2021
26	11.010	-74.261	Institución Educativa El Carmen, sede Guillermo F. Morán	Ciénaga	Magdalena	Educación	49 m	2021
27	10.996	-74.283	Centro Educativo Mis Primeras Letras	Pueblo viejo	Magdalena	Educación	198 m	2021
28	10.991	-74.540	Carretera troncal del caribe kilómetro 26 vía Barranquilla-Ciénaga	Sitionuevo	Magdalena	Transporte	60 m	2021
29	11.012	-74.610	Carretera troncal del caribe kilómetro 20 vía Barranquilla-Ciénaga	Sitionuevo	Magdalena	Transporte	13 m	2021
30	11.013	-74.618	Carretera troncal del caribe kilómetro 19 vía Barranquilla-Ciénaga	Sitionuevo	Magdalena	Transporte	7 m	2021
31	11.020	-74.933	Colegio La Enseñanza	Salgar- Puerto Colombia	Atlántico	Educación	166 m	2021
32	11.019	-74.934	Puesto de Salud de Salgar	Salgar- Puerto Colombia	Atlántico	Salud	181 m	2021

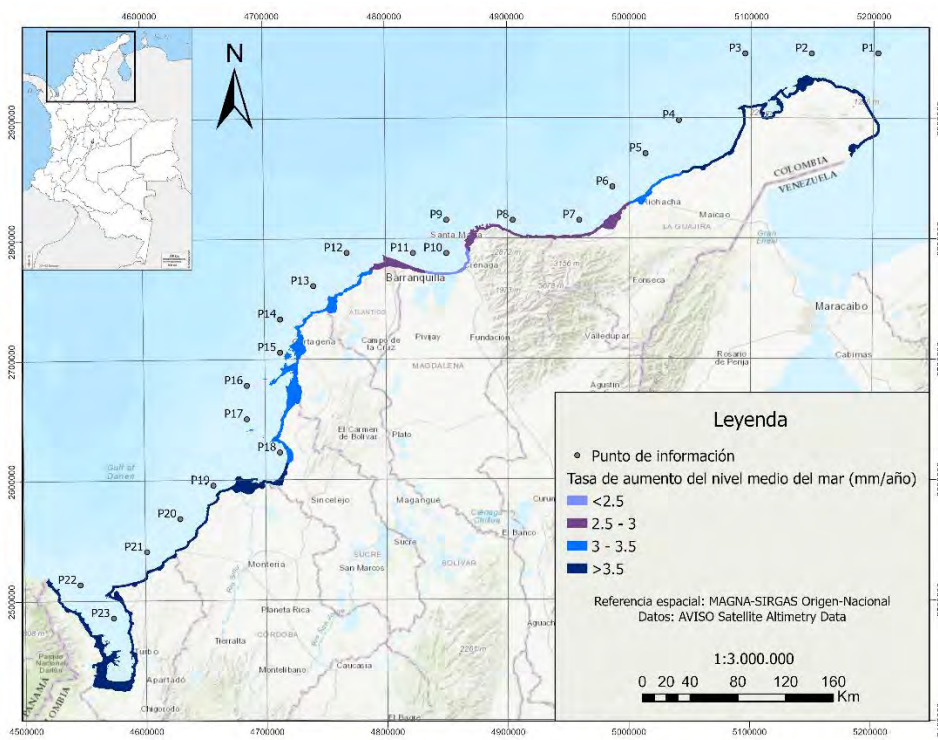
33	10.992	-74.956	Colegio La Sabiduría	Puerto Colombia	Atlántico	Educación	250 m	2021
34	10.990	-74.957	Inst. Educativa Técnica Comercial Diversificada Francisco Javier Cisneros	Puerto Colombia	Atlántico	Educación	170 m	2021
35	10.987	-74.960	E.S.E. Hospital de Puerto Colombia	Puerto Colombia	Atlántico	Salud	190 m	2021
36	10.885	-75.079	Institución Educativa Santa Verónica	Santa Verónica- Juan de Acosta	Atlántico	Educación	169 m	2021
37	10.882	-75.082	Puesto de salud Santa Verónica	Santa Verónica- Juan de Acosta	Atlántico	Salud	152 m	2021
38	10.790	-75.262	Institución Educativa Miguel Nevado Nevado-Sede Villa	Galerazamba- Santa Catalina	Bolívar	Educación	180 m	2021
39	10.787	-75.263	Institución Educativa Miguel Nevado Nevado	Galerazamba- Santa Catalina	Bolívar	Educación	160 m	2021
40	10.486	-75.491	Instituto Una Nueva Luz de Esperanza	La Boquilla- Cartagena	Bolívar	Educación	145 m	2021
41	10.480	-75.493	Institución Educativa Técnica de La Boquilla - INETEB	La Boquilla- Cartagena	Bolívar	Educación	197 m	2021
42	10.453	-75.512	Aeropuerto Internacional Rafael Nuñez- Cartagena	Cartagena	Bolívar	Transporte	100 m	2021
43	10.447	-75.521	Colegio El Carmelo	Cartagena	Bolívar	Educación	194 m	2021
44	10.444	-75.524	Colegio de La Esperanza	Cartagena	Bolívar	Educación	147 m	2021
45	10.432	-75.544	Colegio Modelo de la Costa	Cartagena	Bolívar	Educación	50 m	2021
46	10.429	-75.546	Colegio Salesiano San Pedro Claver	Cartagena	Bolívar	Educación	146 m	2021
47	10.426	-75.550	Universidad de Cartagena	Cartagena	Bolívar	Educación	242 m	2021
48	10.426	-75.552	Institución Universitaria Mayor de Cartagena	Cartagena	Bolívar	Educación	95 m	2021
49	10.416	-75.551	Hospital Naval de Cartagena	Cartagena	Bolívar	Salud	100 m	2021

50	10.404	-75.553	Clínica Santa Cruz de Bocagrande	Cartagena	Bolívar	Salud	212 m	2021
51	10.402	-75.556	Colegio Británico	Cartagena	Bolívar	Educación	220 m	2021
52	10.396	-75.556	Nuevo Hospital de Bocagrande	Cartagena	Bolívar	Salud	91 m	2021
53	10.414	-75.541	Colegio Canadiense de Cartagena	Cartagena	Bolívar	Educación	228 m	2021
54	10.411	-75.538	Gimnasio Bilingüe Altamar de Cartagena	Cartagena	Bolívar	Educación	10 m	2021
55	10.406	-75.533	Sociedad portuaria de Cartagena	Cartagena	Bolívar	Transporte	0 m	2021
56	10.379	-75.510	Terminal de Contenedores de Cartagena – Contecar S.A	Cartagena	Bolívar	Transporte	0 m	2021
57	10.356	-75.511	Termocartagena	Cartagena	Bolívar	Energía	34 m	2021
58	10.344	-75.505	Puerto de Mamonal	Cartagena	Bolívar	Transporte	0 m	2021
59	10.312	-75.500	Refinería de Cartagena	Cartagena	Bolívar	Energía	100 m	2021
60	10.302	-75.502	Puerto Buenavista	Cartagena	Bolívar	Transporte	0 m	2021
61	10.287	-75.533	Puerto Bahía	Cartagena	Bolívar	Transporte	0 m	2021
62	9.908	-75.596	Centro Educativo Sabanetica	Sabanetica- San Onofre	Sucre	Educación	195 m	2020
63	9.825	-75.621	Centro Educativo Alto de Julio	Alto de Julio- San Onofre	Sucre	Educación	92 m	2020
64	9.767	-75.642	Puesto de Salud Rincón del Mar	Rincón del Mar- San Onofre	Sucre	Salud	37 m	2018
65	9.524	-75.584	Colegio Santa Teresita	Santiago de Tolú	Sucre	Educación	230 m	2021
66	9.515	-75.588	Aeropuerto Golfo de Morrosquillo	Santiago de Tolú	Sucre	Transporte	81 m	2021
67	9.493	-75.596	Puerto Compas Tolú	Santiago de Tolú	Sucre	Transporte	0 m	2021
68	9.401	-75.677	Clínica San Rafael	Coveñas	Sucre	Salud	198 m	2021
69	9.404	-75.683	I.E. Ismael Contreras Meneses- Sede 2	Coveñas	Sucre	Educación	166 m	2021

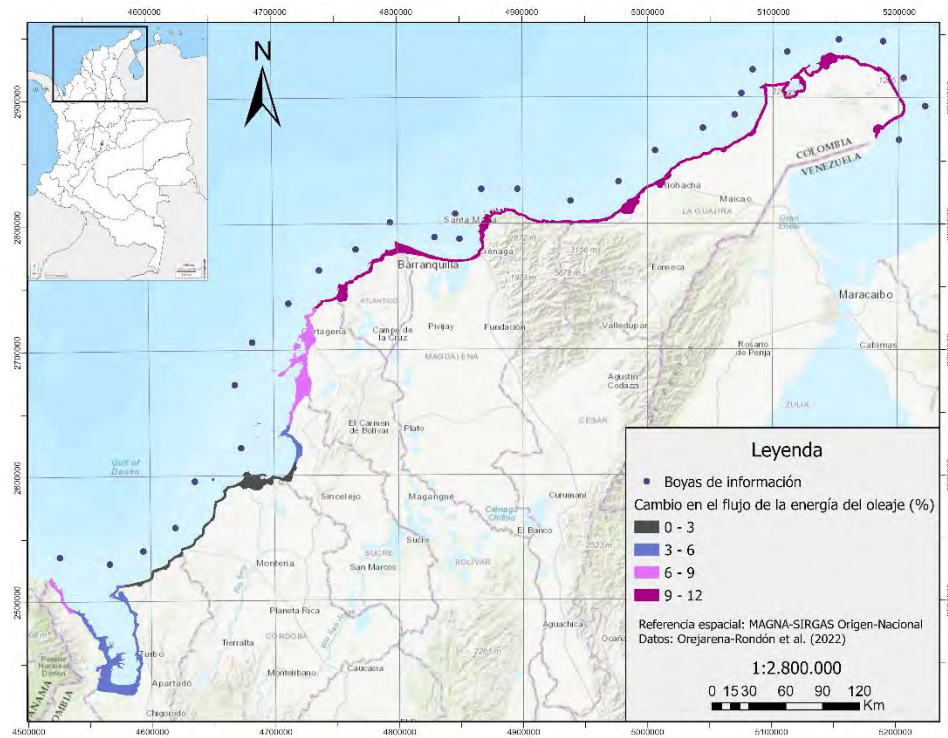
70	9.405	-75.684	Colegio Naval de Coveñas	Coveñas	Sucre	Educación	195 m	2021
71	9.411	-75.692	Puerto Ecopetrol-Coveñas	Coveñas	Sucre	Transporte	0 m	2021
72	9.409	-75.693	Oleoducto Caño Limón Coveñas	Coveñas	Sucre	Energía	208 m	2021
73	9.410	-75.694	Terminal petrolera de Coveñas	Coveñas	Sucre	Energía	80 m	2021
74	9.409	-75.696	Oleoducto de Colombia (ODC)	Coveñas	Sucre	Energía	213	2021
75	9.325	-76.087	Institución Etnoeducativa Paso Nuevo	Paso Nuevo- San Bernardo del Viento	Córdoba	Educación	210 m	2021
76	9.295	-76.110	Institución Educativa La Rada	La Rada, Moñitos	Córdoba	Educación	44 m	2021
77	9.247	-76.130	E.S.E Camu Moñitos	Moñitos	Córdoba	Salud	71 m	2021
78	9.151	-76.176	Institución Educativa Río Cedro	Río Cedro- Moñitos	Córdoba	Educación	224 m	2021
79	9.025	-76.260	Institución Educativa Puerto Escondido	Puerto Escondido	Córdoba	Educación	69 m	2021
80	9.016	-76.264	E.S.E Camu Puerto Escondido	Puerto Escondido	Córdoba	Salud	60 m	2021
81	9.015	-76.263	Institución Educativa Puerto Escondido Sede San Pío X	Puerto Escondido	Córdoba	Educación	52 m	2021
82	8.855	-76.426	Institución Educativa José Manuel Restrepo	Arboletes	Antioquia	Educación	128 m	2020
83	8.739	-76.607	Institución Educativa Rural Monseñor Escobar Vélez	Damaquiel-San Juan de Urabá	Antioquia	Educación	123 m	2020
84	8.421	-76.772	Hospital San Sebastián de Urabá	Necoclí	Antioquia	Salud	202 m	2020
85	8.087	-76.742	Institución Educativa Santa Fé La Playa	Turbo	Antioquia	Educación	38 m	2021
86	8.088	-76.726	Institución Educativa Ángel Milán Perea	Turbo	Antioquia	Educación	216 m	2021
87	8.503	-77.275	Aeropuerto Alcides Fernández	Acandí	Chocó	Transporte	140 m	2021
88	8.637	-77.347	Hospital Lascario Barbosa Avendaño	Capurgana- Acandí	Chocó	Salud	78 m	2021



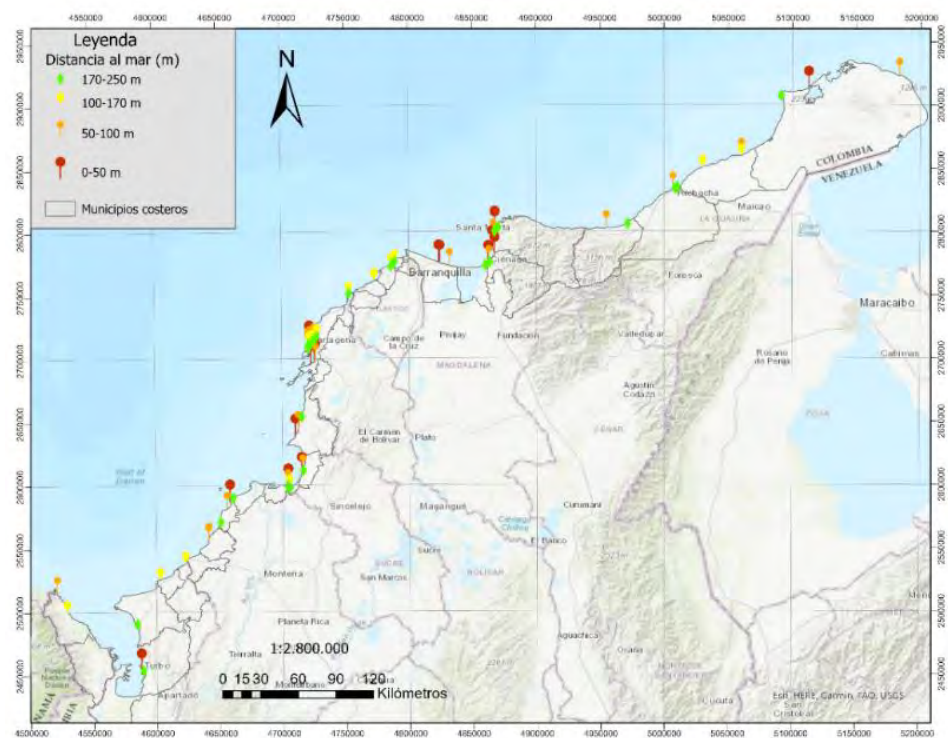
Anexos 9-2. Mapa temático de variación de la línea de costa.



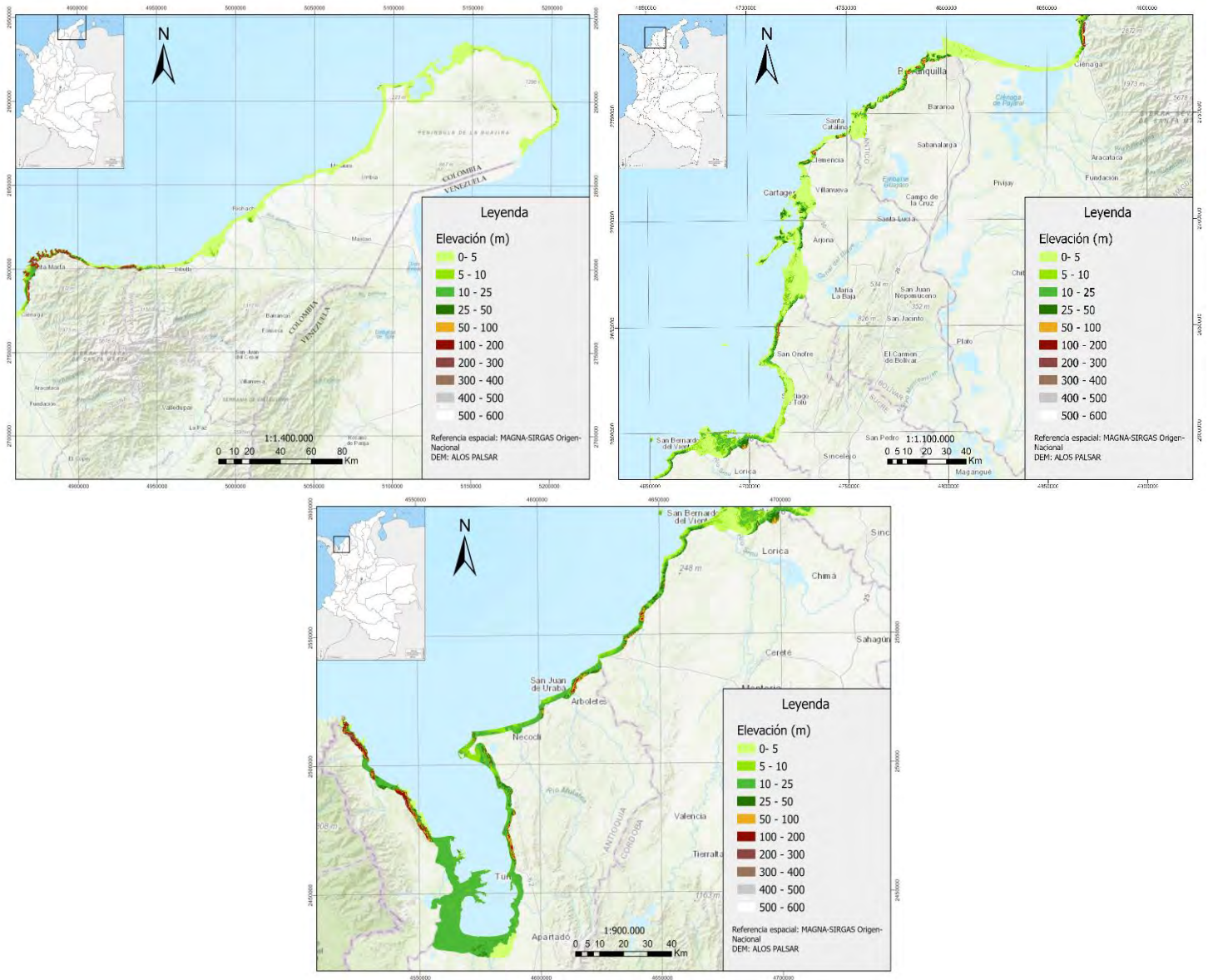
Anexos 9-3. Mapa temático de tasa de ascenso del nivel medio del mar.



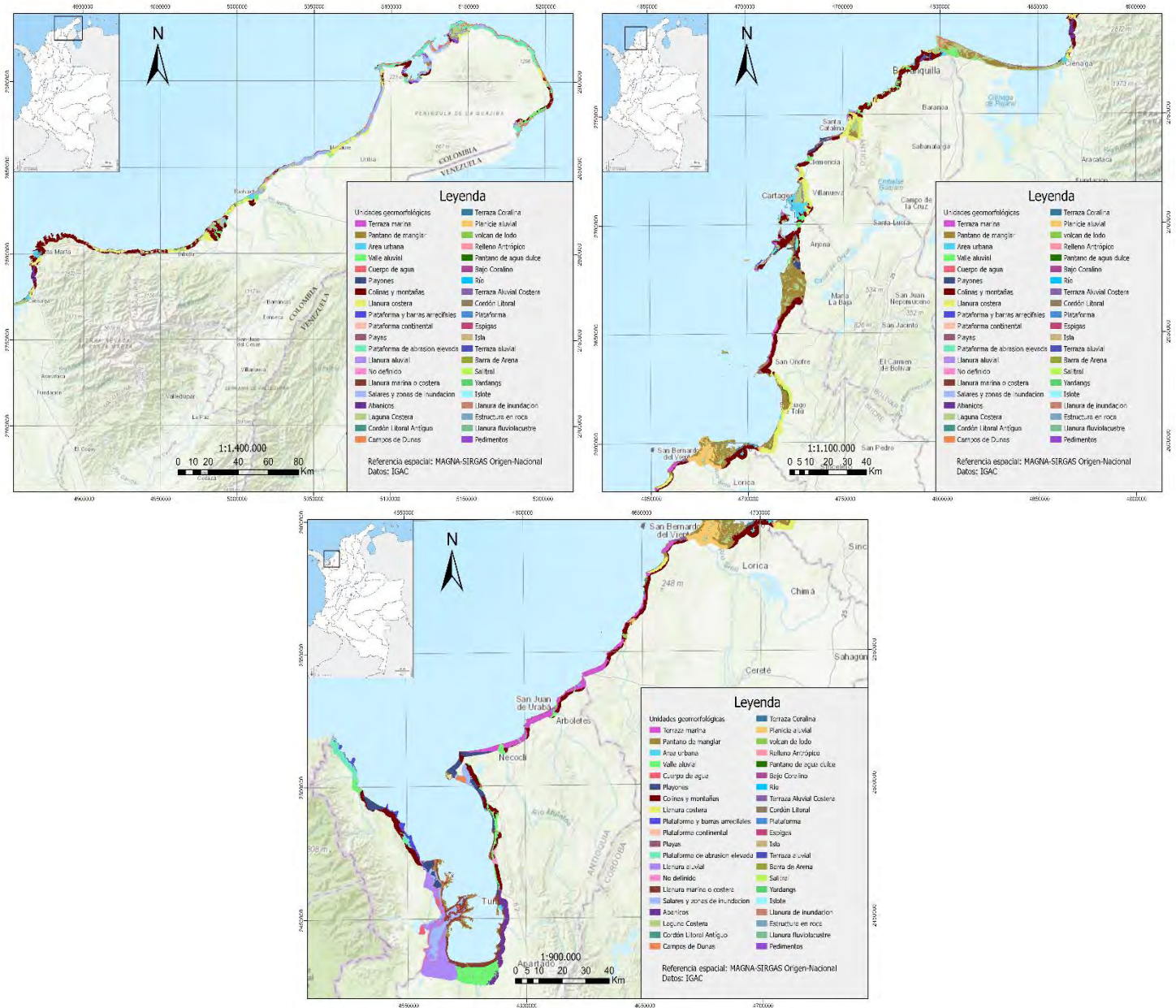
Anexos 9-4. Mapa temático de porcentaje de cambio de flujo de energía del oleaje.



Anexos 9-5. Mapa temático de localización de infraestructura desde la línea de costa.



Anexos 9-6. Mapa temático de elevación.



Anexos 9-7. Mapa temático de geomorfología costera.



Anexos 9-8. Estructuras duras en el área de estudio. a) Zona de Manaure- La Guajira. b) Zona de Ciénaga- Magdalena. c) Zona de Puerto Colombia- Atlántico. d) Zona de Cartagena- Bolívar